

УДК 624.21.095: 691.328.5

**РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ
ДЛЯ ПРОКЛАДНОГО ШАРУ БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА**

Д-р техн. наук А. А. Пługін, асист. Н. О. Муригіна, канд. техн. наук А. С. Малішевська,
д-р техн. наук Д. А. Пługін, асп. М. А. Муригін

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A COMPOSITE MATERIAL FOR THE LAYER
OF A BALLAST-FREE BRIDGE FLOOR**

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, N. O. Murygina, cand. of eng. scien. A. S. Malishevskaya,
Dr. Sc. (Tech.) D. A. Plugin, postgraduate student M. A. Murygin



DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296619>

***Анотація.** Для сполучення залізобетонних плит безбаластного мостового полотна з металевими балками залізничних мостів традиційно застосовується зручний для укладання і сприятливий за фізико-механічними характеристиками гумодерев'яний прокладний шар, що має недостатню довговічність через гниття деревини. Виконано аналіз напружено-деформованого стану залізобетонної плити безбаластного мостового полотна, встановлено, що міцність матеріалу прокладного шару між плитами і балками мосту має бути не менше 5 МПа, а модуль деформації не більше 10000 МПа. Експериментально встановлено, що гумодерев'яний прокладний шар зазнає значних деформацій за рахунок гуми і раптово крихко руйнується, а його модуль деформації складає 58,3 МПа для сосни і 144 МПа для дубу. Розроблено та запатентовано конструктивно-технологічне рішення прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу, що складається з нетканого матеріалу об'ємної структури НМОС із анізотрично орієнтованих поліефірних волокон, цементу, дрібного заповнювача і добавок-прискорювачів твердіння. Досліджено залежності модуля деформації та міцності на стиск прокладного шару з цього матеріалу від відношення кількості піску до кількості цементу в мінеральній суміші П/Ц, витрат мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС М/НМ, товщини НМОС. Такий прокладний шар також зазнає значних деформацій, проте руйнування з порушенням структурної цілісності не спостерігається. Встановлено, що модуль деформації та умовна міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі збільшенням П/Ц і зменшенням М/НМ.*

Прокладний шар із рулонного композиційного матеріалу має модуль деформації 144 МПа за П/Ц не більше 0,11 М/НМ 1000 кг/м³. Такі склади рекомендовано застосовувати для прокладного шару, спосіб улаштування якого запатентовано.

Ключові слова: залізничний металевий міст, безбаластне мостове полотно, залізобетонна плита, прокладний шар, рулонний композиційний матеріал, поліефірне волокно, цемент, модуль деформації.

Abstract. To connect the reinforced concrete slabs of the ballastless bridge deck with the metal girders of the railway bridges, a rubber-wood lining layer, which is convenient for laying and has favorable physical and mechanical characteristics, is traditionally applied, which has insufficient durability due to wood rot. An analysis of the stress-strain state of a reinforced concrete slab of a ballastless bridge deck was performed, and it was established that the strength of the material of the lining layer between the slabs and the bridge girders after 6–8 hours after laying should be at least 1 MPa, at the age of 2 days or more – at least 5 MPa, the modulus of deformation should not be more than 10,000 MPa. The value of the modulus of deformation and compressive strength of the rubber-wood lining layer was determined. Such a lining layer undergoes significant deformations due to the rubber and suddenly breaks down. The modulus of deformation is 58.3 MPa for pine and 144 MPa for oak. A structural and technological solution of the laying layer made of rolled composite material, consisting of a non-woven material of a volumetric structure of NWMVS from anisometrically oriented polyester fibers, cement, fine sand aggregate and hardening accelerator additives, was developed and patented. The dependences of the modulus of deformation and compressive strength of the paving layer made of rolled composite material on the ratio of the amount of sand to the amount of cement in the mineral mixture S/C, the consumption of the mineral mixture per unit of volume of NWMVS M/NM, and the thickness of NWMVS were investigated. Such a lining layer also undergoes significant deformations, however, destruction with a violation of structural integrity is not observed. It was established that the modulus of deformation and conditional compressive strength of the composite material decrease with an increase in the content of S/C sand in the mineral mixture and a decrease in the consumption of the mineral mixture per unit area and volume of NWMVS M/NM. The laying layer made of rolled composite material has a modulus of deformation of 144 MPa for S/C no more than 0.11, M/NM 1000 kg/m³. Such compositions are recommended to be inserted for the lining layer, the method of which is patented.

Keywords: railway metal bridge, безбаластне мостове полотно, reinforced concrete slab, lining layer, rolled composite material, polyester fiber, cement, deformation modulus.

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

На більшості металевих мостів (рис. 1) улаштовується безбаластне мостове полотно (БМП), раніше – на дерев'яних поперечинах (рис. 1, а), у наш час – на залізобетонних плитах (рис. 2) [1]. Мостове полотно укладається на головні балки балкових прогонових споруд (рис. 1, а) або подовжні балки балкової клітки прогонів з наскрізними фермами (рис. 1, б). Мостове полотно на дерев'яних поперечинах через його низьку довговічність і дефіцит якісної деревини вже понад 30 років у плановому порядку замінюється БМП із залізобетонних плит.

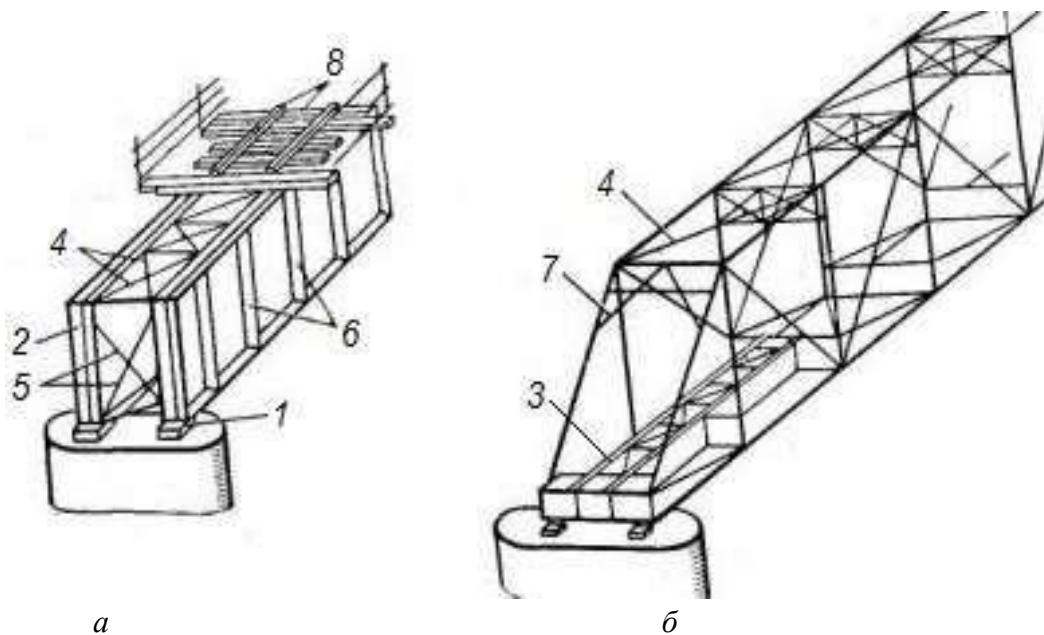


Рис. 1. Схеми конструкції прогонових будов металевих мостів:
а – балкової з їздою поверху; *б* – з наскрізною фермою з їздою понизу;
 1 – опорні частини; 2 – головна балка; 3 – подовжня балка; 4 – подовжні зв'язки;
 5 – поперечні зв'язки; 6 – ребра жорсткості; 7 – порталне заповнення;
 8 – мостове полотно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

Традиційним елементом сполучення плит БМП зі сталевими подовжніми балками мосту є гумодерев'яний прокладний шар (рис. 2, б). Проте він має невисоку довговічність, тому розроблення нових матеріалів для прокладного шару є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Плити БМП (рис. 2, а) [1] виготовляють шириною відносно осі колії 3200 мм, чотирьох основних типорозмірів на 3 і 4 пари підрейкових площадок довжиною відносно осі колії 1390 і 1890 мм для епюри шпал 1840 шт./км і 1490 і 1990 мм – для епюри шпал 2000 шт./км. Кожний із цих типорозмірів має різновиди, призначені для укладання на мости з відстанню між подовжніми балками в осях 1900, 2000, 2100 і 2200 мм.

Плити БМП укладаються на гумодерев'яний прокладний шар завдяки його перевагам – простоті й технологічності. Його невисока

довговічність обумовлена біологічними пошкодженнями деревини, які призводять до втрати нею фізико-механічних властивостей і швидко спричиняють розлади колії [2].

Довговічними є різновиди наливного полімеркомпозиційного прокладного шару [3, 4]. Проте через трудомісткість улаштування епоксидно-кам'яновугільна композиція не набула розповсюдження [3], а поліуретанова еластична композиція у сполученні з розташуванням рейок у рейкових каналах плит БМП в Україні знайшла застосування лише в трамвайних коліях [4]. Через це можна вважати доцільним розроблення нового довговічного швидкотверднучого композиційного матеріалу і конструктивно-технологічного рішення прокладного шару під БМП із нього, які б поєднували переваги і виключали недоліки гумодерев'яного та полімеркомпозиційного прокладних шарів, і актуальним завданням.

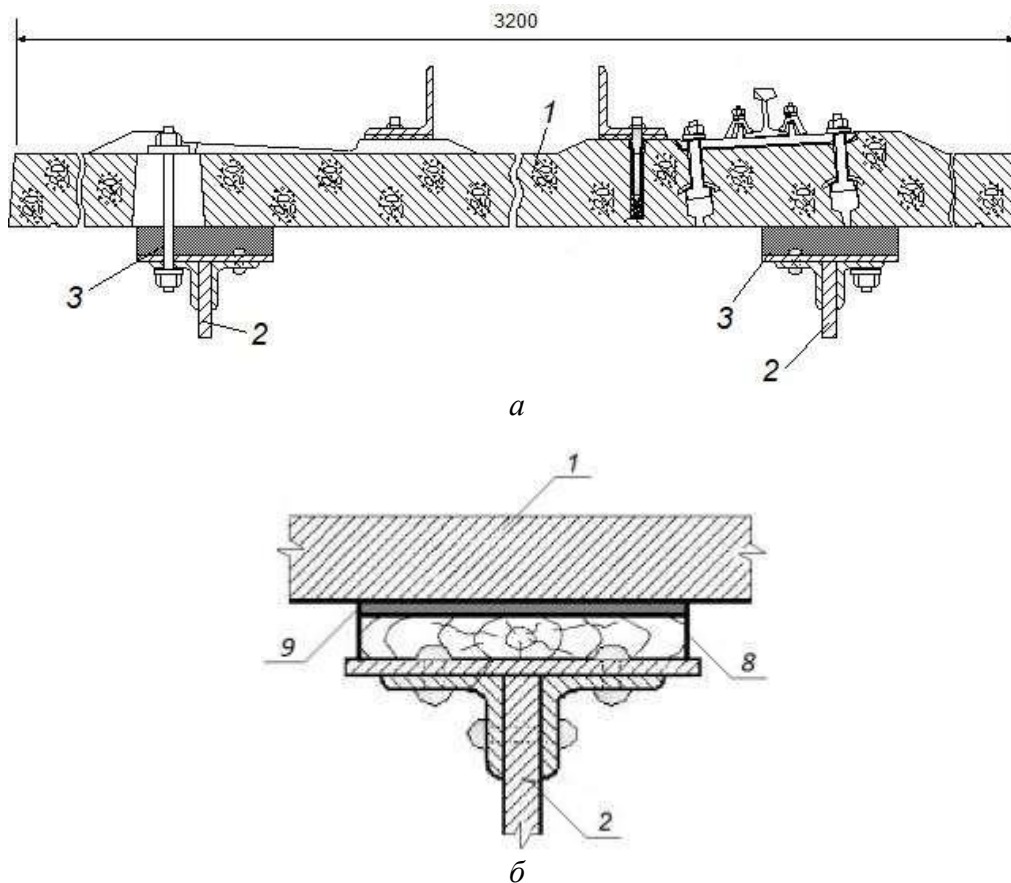


Рис. 2. Безбаластне мостове полотно на залізобетонних плитах:
a – конструкція БМП; *б* – гумодерев'яний прокладний шар;
1 – плита БМП; 2 – верхня полка подовжньої (головної) балки прогонової будови;
3 – прокладний шар; 4 – дерев'яна дошка прокладного шару; 5 – гумова частина
гумодерев'яного прокладного шару; 7 – високоміцна шпилька; 8 – отвір у плиті для
високоміцної шпильки

Такий матеріал буде особливо корисним у зв'язку з тим, що на сьогодні в Україні через воєнну агресію росії зруйнована велика кількість залізничних мостів, як залізобетонних, так і металевих з наскрізними фермами (рис. 3, а), балкових (рис. 3, б). Металеві прогонові будови в багатьох випадках підлягають ремонту, оскільки, по-перше, менше пошкоджуються навіть під час падіння з опор (рис. 3); по-друге, у них можуть замінюватися та

підсилюватися окремі елементи. Залізобетонні прогонові будови ламаються, їхній бетон подрібнюється, вони не підлягають ремонту, і їх доцільно замінювати на балкові металеві. Отже, на переважній більшості зруйнованих мостів під час їхнього відновлення буде влаштовуватися безбаластне мостове полотно, яке доцільно укласти на прокладний шар із зазначеної композиції.



а



б

Рис. 3. Зруйновані під час воєнних дій в Україні металеві залізничні мости: *а* – балковий [6]; *б* – з наскрізними фермами [7]

Виконано аналіз переваг і недоліків безбаластних конструкцій мостового полотна на різному прокладному шарі. За роботою [7], умови експлуатації баластної та безбаластної колій на мостах з короткими та довгими прогоновими будовами принципово відрізняються. На мостах з баластною колією довготривалі деформації прогину внаслідок повзучості та усадки бетону залізобетонних прогонових будов або втоми металу металевих прогонових будов можна не враховувати, оскільки виправлення колії у профілі може бути здійснене підбиванням. На мостах з безбаластною колією та короткими прогоновими будовами довготривалі

деформації прогину також можна не враховувати, але для довгих прогонових будов такі деформації та подальші розлади колії від них мають враховуватися.

Автори роботи [8] виконали аналіз напружено-деформованого стану залізобетонного безбаластного мостового полотна в умовах динамічних впливів від високошвидкісного рухомого складу: зроблено висновки про наявність значних відривних зусиль БМП від подовжніх балок і недоцільність застосування прокладного шару за межами мосту, проте пропозицій щодо корегування деформативних властивостей прокладного шару для зниження цих зусиль не надано.

Постановка мети та завдання досліджень

Мета дослідження – обґрунтування складу і фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу для прокладного шару безбаластного мостового полотна, який матиме більшу довговічність, ніж гумодерев'яний шар.

Завдання досліджень:

- виконати аналіз напружено-деформованого стану залізобетонної плити безбаластного мостового полотна та обґрунтувати потрібні фізико-механічні властивості композиційного прокладного шару;

- розробити конструктивно-технологічне рішення і матеріал прокладного шару з композиційного матеріалу;

- визначити величину модуля деформації і міцності на стиск гумодерев'яного прокладного шару;

- дослідити залежності модуля деформації та міцності на стиск прокладного шару з композиційного матеріалу від показників його складу.

Основний матеріал досліджень

Обґрунтування потрібних фізико-механічних властивостей прокладного шару. У роботах [2, 3, 9] різними розрахунковими засобами виконувався аналіз напружено-деформованого стану безбаластного мостового полотна та прокладного шару під ним під поїзними навантаженнями, передбаченими інструкцією [10]. У роботі [3] розрахунками, виконаними точними методами, встановлено вимоги до необхідної міцності прокладного шару БМП на момент монтажу та експлуатації. За результатами розрахунків встановлено, що міцність на першу добу має бути не менше 1 МПа, другу добу – не менше 5 МПа.

Для обґрунтування фізико-механічних характеристик прокладного шару в роботах [9, 11] виконано розрахункові експерименти і аналіз НДС плити БМП і самого шару. Експерименти проводилися за

методикою [12] методом скінчених елементів у просторовій постановці за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Розрахункову схему склали з 38992 об'ємних фізично нелінійних ізопараметричних скінчених елементів № 234 і 236 з кількістю вузлів 45126. У моделі контакт між прокладним шаром і плитою не розкривається, прокладний шар опирали на абсолютно жорстку основу. Змінними параметрами приймали модуль деформації прокладного шару (3, рис. 2, а) зі значеннями 2000, 10000, 35000 МПа як у полімерних композитів, деревини сосни, бетону класу С32/40 відповідно та силу натягу високоміцних шпильок (рис. 2, а) кріплення плити до подовжньої балки – 49, 98 і 128 кН. Натяг шпильок моделювали навантаженням, прикладеним через пластину-шайбу.

Модель плити БМП завантажували етапами кроками по 20 % на кожному етапі, на першому – власною вагою плит і натягом шпильок, на другому – власною вагою, натягом шпильок і тимчасовим навантаженням 245 кН однієї осі рухомого складу. Розрахунок здійснювали кроково-ітераційним методом. Деякі найбільш наочні поля напружень наведені на рис. 4.

Розтягувальні напруження до 1,81 МПа, що наближаються до границі міцності бетону на розтяг, були виявлені на верхній грані плит саме в місцях, де під час експлуатації часто утворюються тріщини [2] (рис. 4, а). За результатами аналізу напружено-деформованого стану БМП у роботах [9, 11, 13] для зниження напружень у плитах і самому прокладному шарі запропоновано застосовувати жорсткий прокладний шар з модулем деформації понад 10000 МПа, а натяг шпильок здійснювати силою, що не перевищує 98 кН, бо за більших величин натягу напруження у плиті збільшуються та наближаються до величин границі міцності бетону. Проте відомо, що застосування дерев'яного прокладного шару без гуми призводило до збільшення

пошкоджуваності БМП, отже, доцільно переосмислити результати робіт [9, 11, 13], а також дослідити деформативні

характеристики гумодерев'яного прокладного шару.

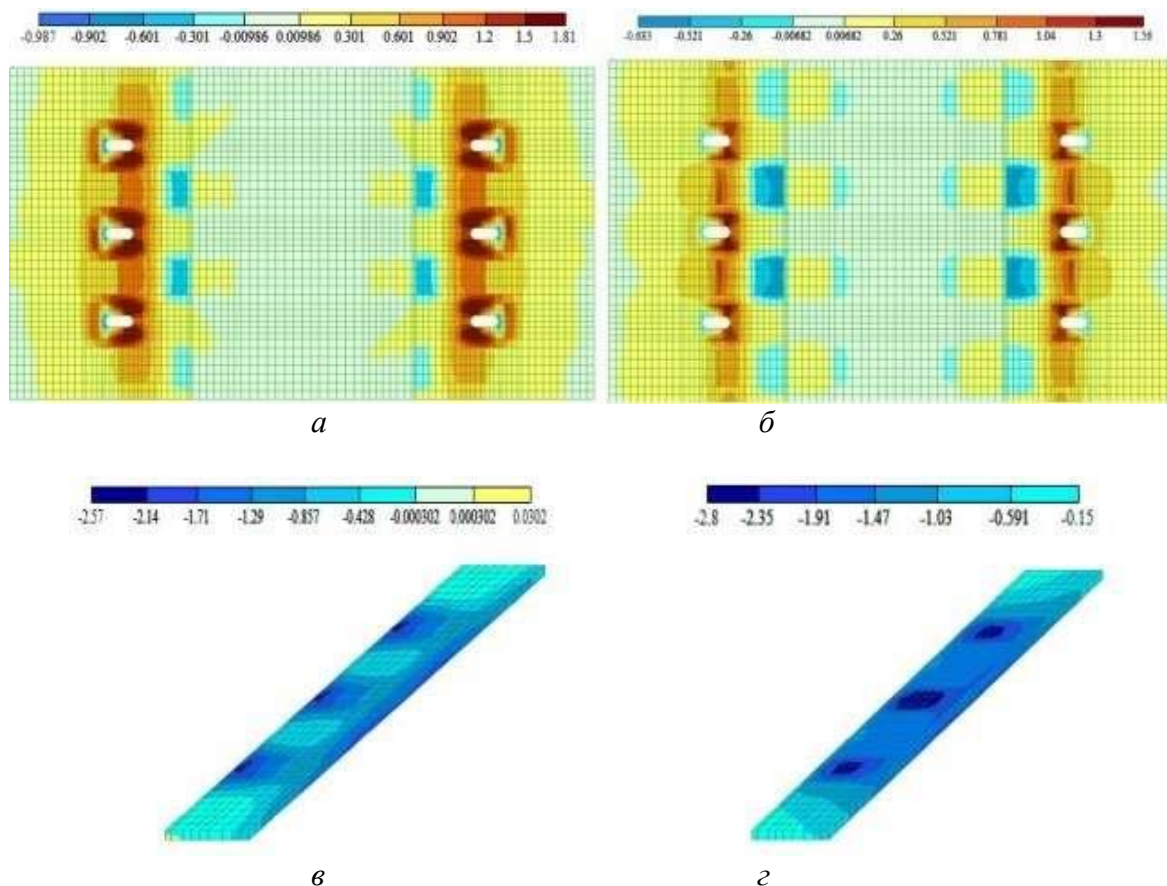


Рис. 4. Ізополя напружень у верхній грані плити БМП (а, б) і прокладному шарі (в, з) для значень модуля деформації прокладного шару і натягу шпильок відповідно 35000 МПа і 128 кН (а, в); 5000 МПа і 49 кН (б, з)

На рис. 5 наведено отримані за результатами розрахунків оновлені залежності максимальних напружень у плиті БМП (а-в) і прокладному шарі (г) від величини сили затягування високоміцних шпильок за різних величин модуля деформації прокладного шару (а) і модуля деформації прокладного шару за різних значень сили затягування шпильок (б-г).

Із рис. 5 видно, що на величину напружень впливає більшою мірою сила натягу шпильок, меншою – модуль деформації прокладного шару, зі

зниженням їхніх значень напруження також зменшуються.

Отже, міцність матеріалу прокладного шару через 6–8 год твердіння має бути не менше 1 МПа, у віці дві доби та більше – не менше 5 МПа, модуль деформації має бути не більше 10000 МПа, бажано близьким до модуля деформації гумодерев'яного прокладного шару. Аналіз показує, що найбільш придатною для прокладного шару може бути швидкотверднуча дисперсно-армована композиція на основі мінеральної в'язучої речовини [14, 15].

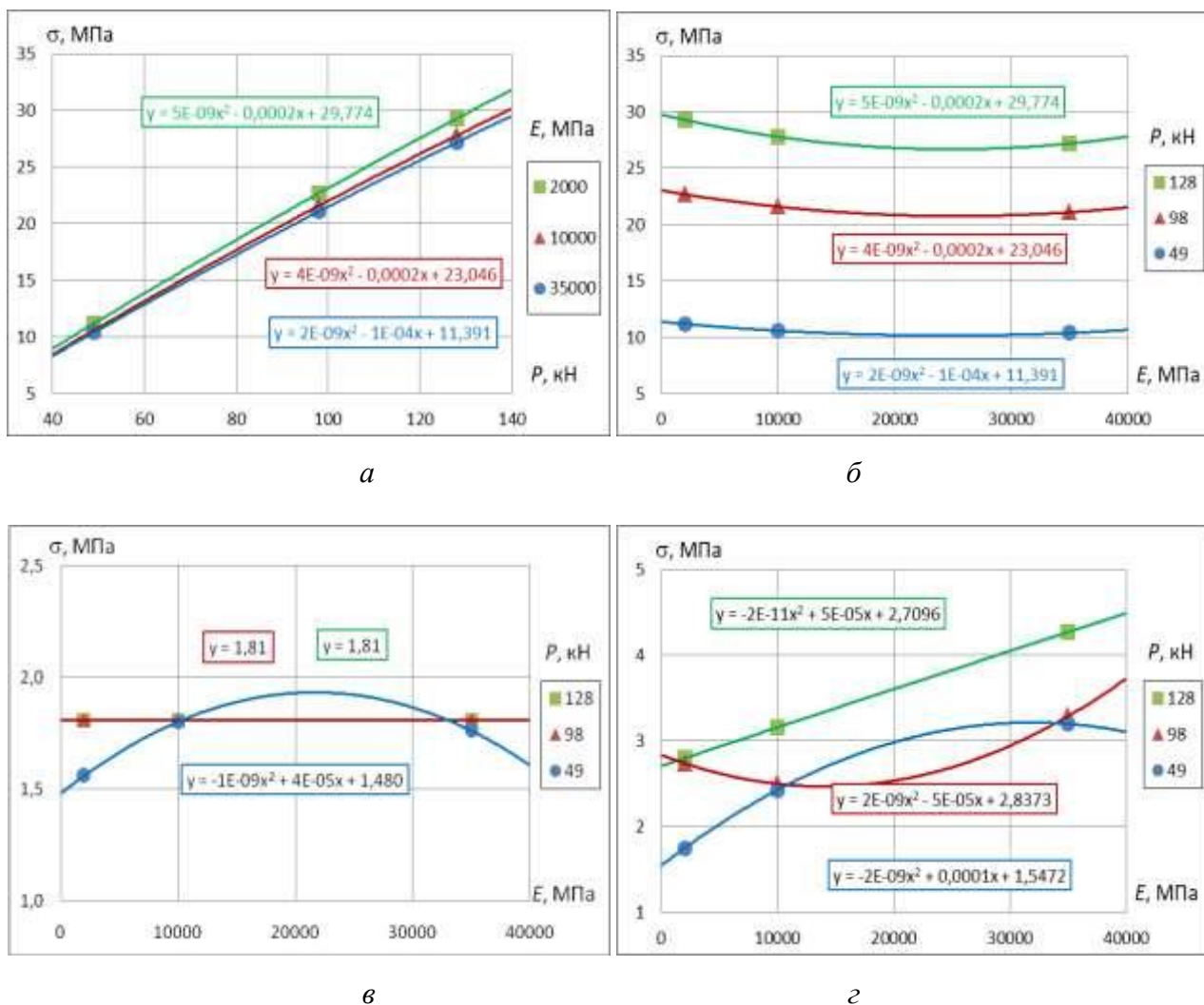


Рис. 5. Залежності максимальної величини напружень σ від модуля деформації прокладного шару E за різних зусиль натягу шпильок P :
 а, б – у плиті БМП стискальних (а) і розтягувальних у верхній грані (б);
 в – прокладному шарі стискальних

Аналітичний огляд в'язучих речовин і композиційних матеріалів, придатних для улаштування прокладного шару під безбаластним мостовим полотном. Виконано аналіз літературних джерел щодо в'язучих речовин і композиційних матеріалів, здатних забезпечити визначені властивості прокладного шару під безбаластним мостовим полотном. Для матеріалів на основі портландцементу міцність на стиск 5 МПа є з великим запасом досяжною величиною навіть за природного твердіння.

Проте досягнення міцності на стиск навіть 1 МПа через менш ніж 24 год природного твердіння потребує вживання заходів з прискорення твердіння.

Аналіз літературних джерел показав, що прискорення твердіння досягається введенням хімічних добавок – солей-електролітів, суперпластифікаторів (аніонактивних поверхнево-активних речовин) [16, 17], застосуванням цементів, що містять багатокомпонентні мінеральні добавки [18], введенням золи нанодисперсної фракції [14]. У разі

застосування добавок суперпластифікаторів прискорення твердіння і набуття більш високих фізико-механічних властивостей обумовлене в основному зниженням водоцементного відношення. У разі введення солей-електролітів прискорення твердіння та підвищення показників фізико-механічних властивостей багато авторів пов'язують зі взаємодією цих солей з алюмінатними фазами портландцементного клінкера з утворенням *AFm* і *Aft*-фаз – гідросульфо-, гідронітро-, гідрокарбо-, гідрохлоралюмінатів кальцію [19–23].

Уведення золи нанодисперсної фракції, на думку авторів роботи [14], прискорює гідратацію цементу за рахунок того, що наночастинки золи відіграють роль центрів кристалізації. Вважаємо це трактування дещо обмеженим, оскільки такі частинки в лужному середовищі швидко розчиняються і взаємодіють з вапном, отже, прискорюють утворення гідросилікатів кальцію та сприяють їхньому більш рівномірному розподілу по структурі продуктів гідратації.

Автори робіт [24, 25] для гідроізоляційних цементних композицій проникної дії пропонують комплекс хімічних добавок – солей-електролітів і суперпластифікатора (аніонактивної поверхнево-активної речовини), який за рахунок утворення *AFm* і *Aft*-фаз не тільки забезпечує водонепроникність конструкцій із бетону, що ізолюються, а й здатний суттєво прискорити твердіння портландцементу і відіграти роль інгібітора корозії сталі. Крім того, у роботах [25, 26] для запобігання утворенню усадкових тріщин пропонується дисперсне армування полімерними волокнами, яке, як ми вважаємо, сприятиме підвищенню також і ранньої міцності.

Проте поєднання хімічних і мінеральних добавок з дисперсним армуванням стосовно прокладного шару БМП необхідно ретельно досліджувати та обґрунтовувати. Так, автори роботи [14] досягли максимального підвищення

статичної міцності цементної композиції добавками керамічного порошку та 0,25 % базальтового волокна. Подальше збільшення вмісту волокна обумовило зниження статичної міцності, але подальше зростання динамічної міцності.

За результатами аналітичного огляду літературних джерел висунуто гіпотезу: отримати прокладний шар БМП, який набуває необхідної міцності за 6–8 год і має довговічність не менше 50 років, з застосуванням композиційного матеріалу з портландцементу з комплексною хімічною добавкою (забезпечує прискорення твердіння та є інгібітором корозії сталі) і полімерних волокон (забезпечують міцність).

Конструктивно-технологічне рішення прокладного шару з композита з цементу і полімерних волокон. Розроблено конструктивно-технологічне рішення прокладного шару з запропонованого композиційного матеріалу (рис. 6) [27], згідно з яким послідовність його улаштування така: композиційний матеріал попередньо виготовляють у вигляді рулонів із нетканого матеріалу об'ємної структури НМОС, цементу, дрібного заповнювача – піску і добавок-прискорювачів твердіння (рис. 6, а); на попередньо очищену верхню полицю балок мосту встановлюють локальні опори висотою, що відповідає проектній товщині прокладного шару (рис. 6, б), рулони просочують водою, розкочують, укладають у декілька шарів загальною товщиною на 20–40 % більше за проектну товщину прокладного шару та укладають плити БМП у проектне положення (рис. 7). Ущільнення композита забезпечується вагою плит.

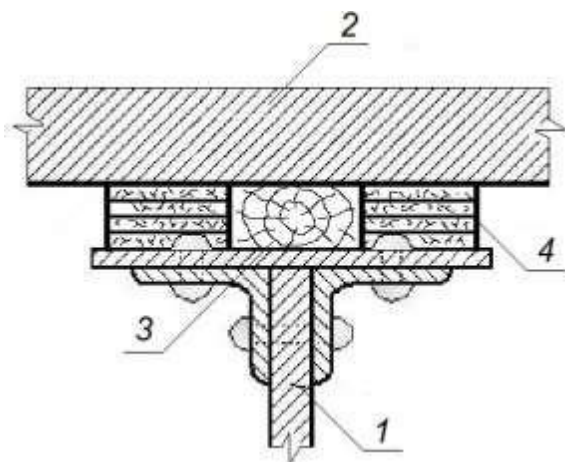
Експериментальне дослідження та обговорення результату. Досліджено фізико-механічні властивості гумодерев'яного прокладного шару з сосни та дубу і прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу. Зразки гумодерев'яного прокладного шару складала з дерев'яних кубів з розміром

ребра 50 мм і квадратних пластин розміром 50×50 мм із транспортерної стрічки товщиною 10 мм (рис. 7). Отже, відношення товщини армованої гуми до деревини у прокладному шарі склало 1:5. Зразки стискали на гідравлічному пресі поступово, вимірюючи відстань між

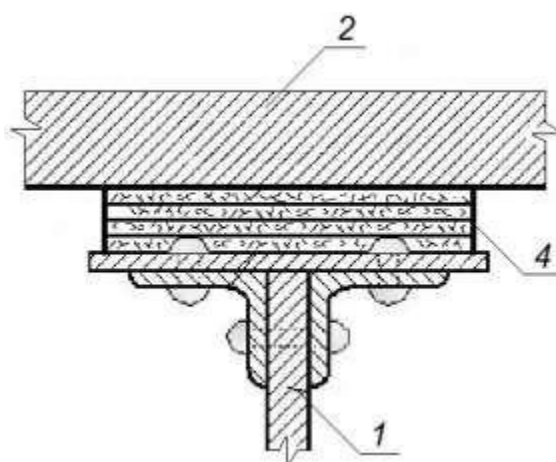
плитами пресу. За результатами вимірювань трьох зразків будували діаграму деформування (графік залежності між напруженням та деформацією), за якою визначали модуль деформації E і міцність на стиск f гумодерев'яного прокладного шару.



a



б



в

Рис. 6. Улаштування прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу: *a* – заготівля рулонного композиційного матеріалу; *б, в* – схема улаштування прокладного шару в місці встановлення локальної опори (*a*) і поза місцями встановлення локальних опор (*в*); 1 – подовжня сталеві балка залізничного мосту; 2 – залізобетонна плита безбаластного мостового полотна; 3 – дерев'яна локальна опора; 4 – шари рулонного композиційного матеріалу



Рис. 7. Зразки гумодерев'яного прокладного шару

Для виготовлення зразків прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу застосовано мінеральну суміш і НМОС із анізотрично орієнтованих поліефірних волокон (синтепон) товщиною 10 мм густиною 100 г/м^2 і 20 мм густиною 200 г/м^2 . Для мінеральної суміші застосовано портландцемент СЕМ І 42,5 R EN 197-1, пісок ДСТУ Б В.2.7-32-95 Безлюдівського родовища з модулем крупності 1,0-1,1 (дуже дрібний).

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

3,33; 6,67; 10; 15; 20 кг/м^2 , що відповідає 167; 334; 500; 750; 1000 кг/м^3 .

Компоненти суміші зважували, висипали у змішувач і ретельно перемішували не менше 3 хв. Із НМОС нарізали листи розміром $200 \times 200 \text{ мм}$. Форму-рамку для приготування НМОС розміром $200 \times 200 \text{ мм}$ (рис. 8) встановлювали на вібромайданчик і викладали поліетиленовою плівкою так, щоб краї плівки висувалися вище бортів форми (рис. 8, а). На дно форми укладали лист НМОС, вмикали вібромайданчик і повільно та рівномірно насипали зверху попередньо зважену суху суміш (рис. 8, б). Вібрування продовжували, розрівнюючи суміш пензлем, до видимого припинення проникнення суміші вглиб НМОС. Плівку брали за краї, видаляли композицію з форми та загортали у плівку (рис. 8, а, 8, в).

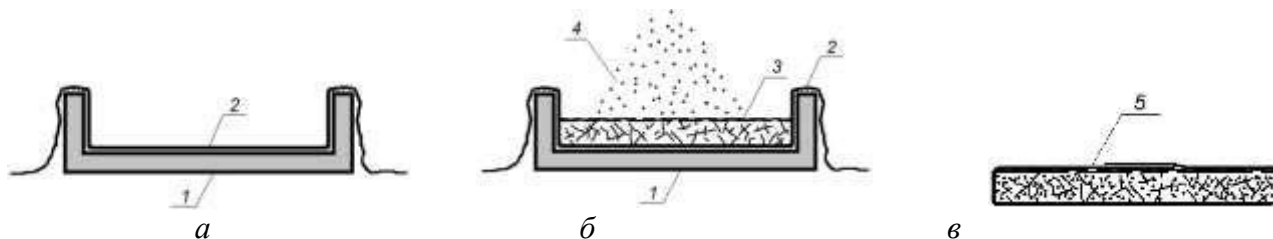


Рис. 8. Виготовлення зразків композиції для експериментальних досліджень:
 а – вкладання у форму поліетиленової плівки; б – укладання у форму листа НМОС і засипання мінеральною сумішшю; в – видалення композиції з форми і загортання у плівку;
 1 – форма; 2 – поліетиленова плівка; 3 – НМОС; 4 – суха суміш; 5 – готовий зразок

Виготовлення зразків прокладного шару здійснювали у такий спосіб. У плівці, у яку загорнуто лист композиції розміром 200×200 мм, шилом проколювали отвори в шахматному порядку на відстані 30 мм один від одного. Лист композиції, загорнутий у плівку з отворами, занурювали у воду на 3 хв, після чого разом із плівкою нарізали на клаптики розміром 50×50 мм. З клаптиків видаляли плівку, пошарово укладали їх у матрицю прес-форми (рис. 9, а, б). Кількість шарів приймали такою, яка забезпечувала заповнення матриці доверху. Зразок притискали пуансоном, на який встановлювали штучний вантаж (рис. 9, в). Сумарну масу пуансона і штучного вантажу приймали відповідною технологічному тиску на прокладний шар під час укладання БМП:

$$p = m/(nlb) = 2500/(2 \cdot 189 \cdot 20) = 0,33 \text{ кг/см}^2, \quad (1)$$

де m – маса плити БМП, 2500 кг;
 n – кількість подовжніх балок, 2;
 l – довжина плити, 189 см;
 b – ширина прокладного шару (балки), 20 см.

Отже, сумарна маса пуансона і штучного вантажу складала $5 \cdot 0,33 = 8,25$ кг, час витримки під тиском – 3 хв. Після витримання зразка під тиском матрицю перегортали і витискали зразок за допомогою виштовхувального кільця (3, рис. 9, а). За допомогою електронного штангенциркуля вимірювали висоту зразка h і визначали ступінь його стиснення:

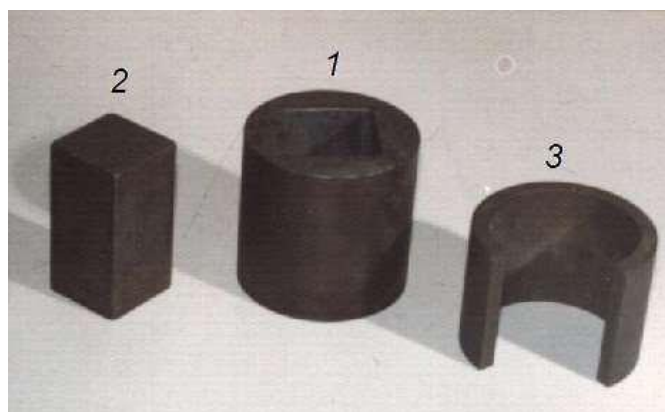
$$K_{ст} = h/h_0, \quad (2)$$

де h_0 – первинна висота зразка (матриці).

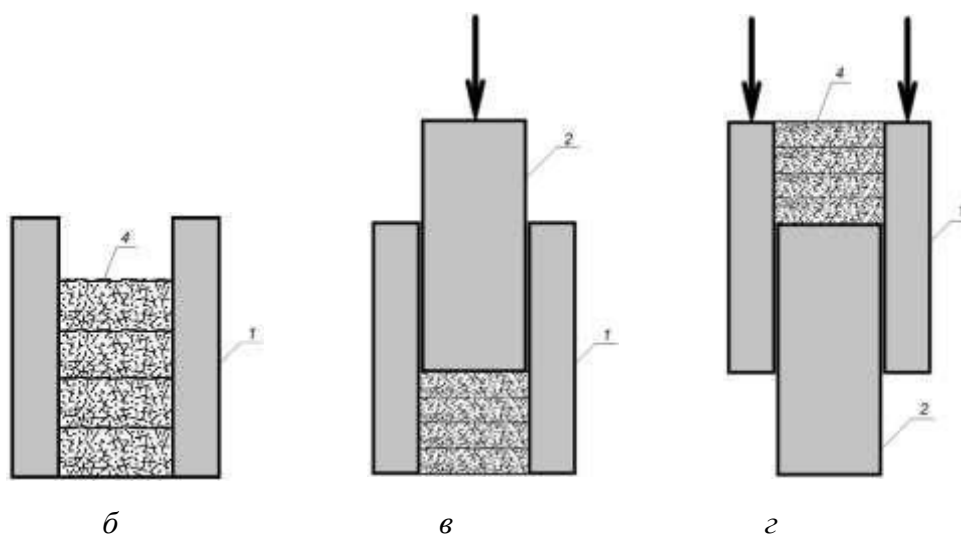
Кожного складу композиції виготовляли по дев'ять зразків. Відформовані зразки накривали поліетиленовою плівкою і витримували за температури 20 ± 3 °С. Через 6 і 24 год, а також 28 діб твердіння випробували по три зразки з визначенням маси, розмірів, середньої густини ρ , початкового модуля пружності (модуля деформації) E та міцності на стиск f . Для визначення E та f зразки стискали на гідравлічному пресі ступінчасто, вимірюючи відстань між плитами пресу, за результатами вимірювань трьох зразків будували діаграму деформування (графік залежності між напруженням і деформацією), за якою і визначали $E = \sigma/\epsilon$ на початковій ділянці кривої деформування та f прокладного шару як напруження σ у місці перелому кривої. У віці 28 діб визначали також водопоглинання за масою W_m .

Діаграми деформування гумодерев'яного прокладного шару та прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу, виготовленого з НМОС різної товщини δ , з різним вмістом крупного заповнювача П/Ц і різними витратами мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС М/НМ наведено на рис. 10. Діаграми залежностей початкового модуля пружності E та міцності на стиск f прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу на основі портландцементу і нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною 10 і 20 мм від масового відношення кількості піску до цементу П/Ц і витрат мінеральної суміші на 1 м^3 НМОС наведено на рис. 11.

Із рис. 11, а видно, що гумодерев'яний прокладний шар за рахунок деформації гуми зазнає значних деформацій і раптово крихко руйнується. Модуль його деформації та міцність на стиск складає для деревин сосни $E = 58,3$ МПа і $f = 5,5$ МПа, деревини дубу – $E = 144,3$ МПа і $f = 7,9$ МПа (таблиця).



a



д

Рис. 9. Формування зразків прокладного шару для випробувань:
a – прес-форма; *б* – пошарове укладання композита в матрицю прес-форми;
в – ущільнення зразка пуансоном; *г* – витиснення зразка з матриці пуансоном за допомогою виштовхного кільця; *д* – затверділі зразки;
1 – матриця; *2* – пуансон; *3* – виштовхне кільце; *4* – зразок

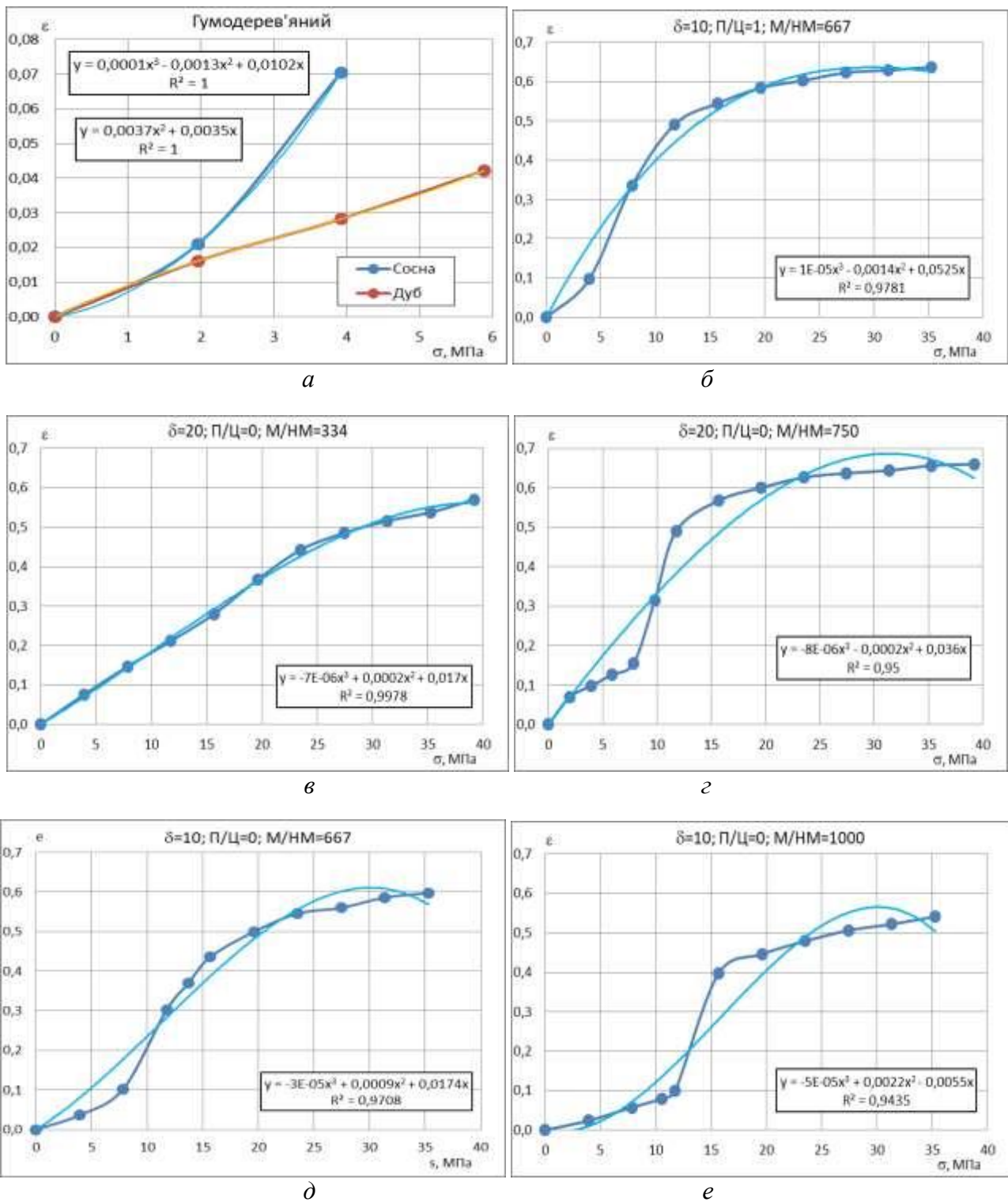


Рис. 10. Діаграми деформування (залежності відносної деформації ϵ від стискального напруження σ) захисного шару: *а* – гумодерев'яного з відношенням товщини армованої гуми до товщини деревини 1:5 із сосни та дуба; *б–е* – із рулонного композиційного матеріалу на основі портландцементу і нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною δ 20 мм (*в, г*) і 10 мм (*б, д, е*) з різним масовим відношенням кількості піску до кількості цементу П/Ц і витратами мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС М/НМ

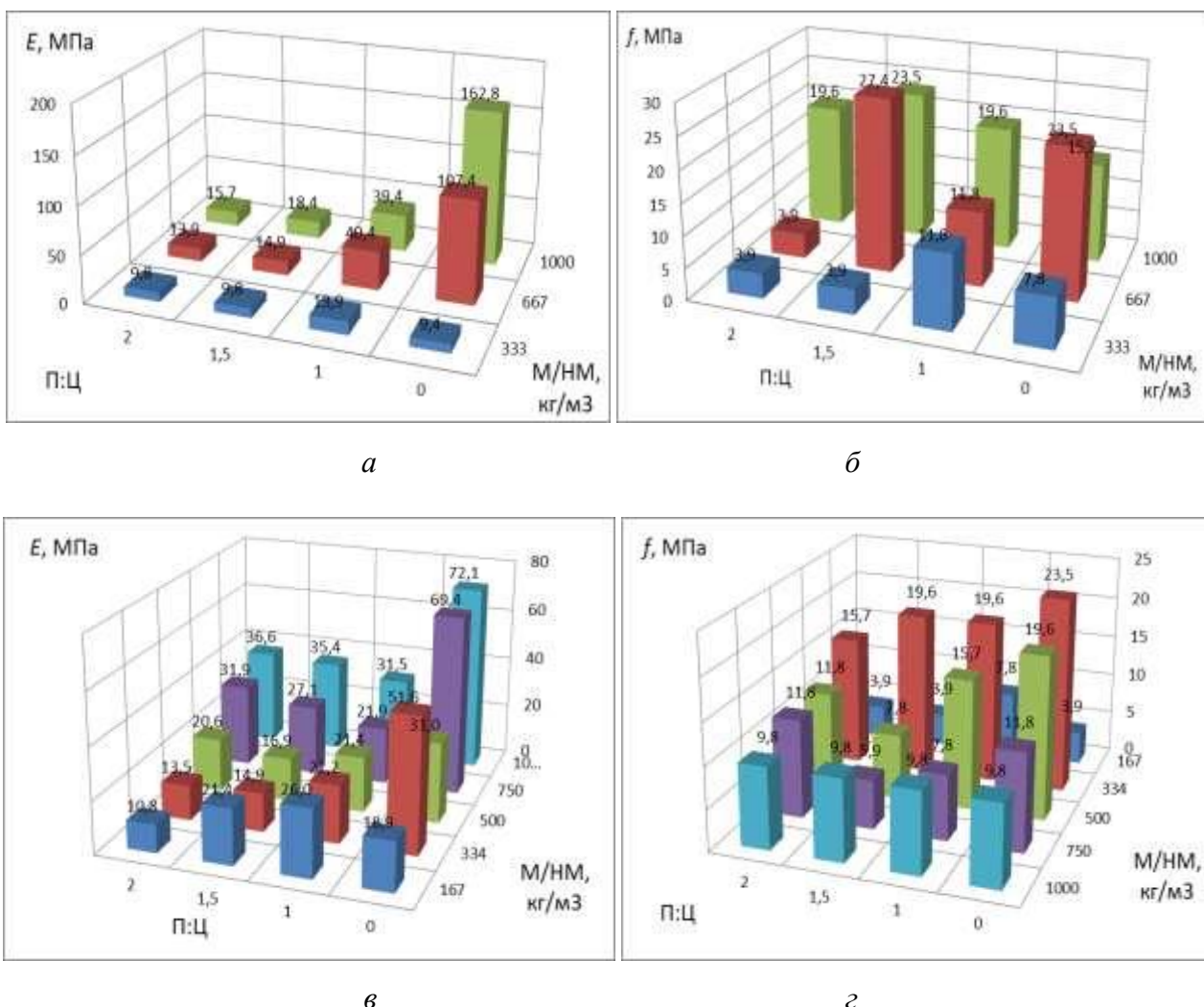


Рис. 11. Залежності початкового модуля пружності E (а, в) і міцності на стиск f (б, г) прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу на основі портландцементу і нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною 10 мм (а, б) і 20 мм (в, г) від масового відношення кількості піску до цементу П/Ц і витрат мінеральної суміші на 1 м^3 НМОС

Прокладний шар із рулонного композиційного матеріалу також зазнає значних деформацій, проте руйнування з порушенням структурної цілісності не спостерігається. Модуль його деформації (початковий модуль пружності) визначали за діаграмами руйнування як тангенс їхнього кута нахилу на ділянці, що відповідає фактичним напруженням у прокладному шарі до 3 МПа (рис. 4, в, г). У зв'язку з відсутністю видимого руйнування

міцність на стиск приймали умовно за місцем найбільшої кривизни діаграм рис. 10, б–г.

Із рис. 11 видно, що модуль деформації та міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі збільшенням вмісту в мінеральній суміші піску П/Ц і зменшенням витрат мінеральної суміші на одиницю площі та об'єму НМОС М/НМ.

Порівняльні фізико-механічні характеристики гумодерев'яного і композиційного прокладного шарів різного складу

Прокладний шар			Початковий модуль пружності E , МПа	Міцність на стиск f , МПа	
Гумодерев'яний гума/деревина 1:5	Сосна		58,3	5,5	
	Дуб		144,3	7,9	
Із рулонного композиційного матеріалу	δ , мм	П/Ц	М/НМ, кг/м ³		
	10	1	667	40,4	
	20	0	334	51,6	
	20	0	750	69,4	
	10	0	667	107,4	
	10	0	1000	162,8	
	10	0,31	667	58,3	не менше 11,8
	10	0,79	1000	58,3	не менше 11,8
10	0,11	1000	144,3	не менше 11,8	

У таблиці наведено значення модуля деформації E і міцності на стиск f гумодерев'яного прокладного шару з сосни та дубу та прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу складів з близькими до них значеннями E та f (із НМОС товщиною 10 і 20 мм, витратами мінеральної суміші М/НМ 666 і 1000 кг/м³, відношенням П/Ц 0 та 1). Для уточнення складів, що забезпечать деформативні характеристики, аналогічні гумодерев'яному прокладному шару, здійснено апроксимацію залежностей E від П/Ц (рис. 12). Ці залежності добре апроксимуються з коефіцієнтами кореляції 0,99 квадратним рівняннями для М/НМ 667 і 1000 кг/м³ відповідно:

$$y = 22,86x^2 - 93,52x + 107,9; \quad (3)$$

$$y = 48,64x^2 - 170,3x + 162,5, \quad (4)$$

де $y = E$, $x = \text{П/Ц}$.

Із рис. 12 видно, що залежність (3) може забезпечити модуль деформації прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу лише такий, як у

гумодерев'яного прокладного шару з сосни $E = 58,3$ МПа. Підставивши це значення в рівняння (3), отримаємо

$$22,86x^2 - 93,52x + 49,6 = 0. \quad (5)$$

У результаті розв'язання цього рівняння отримаємо значення $x = \text{П/Ц} = 0,31$, яке забезпечить модуль деформації прокладного шару $E = 58,3$ МПа.

Залежність (4) може забезпечити модуль деформації прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу як і гумодерев'яного прокладного шару як із сосни $E = 58,3$ МПа, так і дуба $E = 144,3$ МПа. Підставивши ці значення в рівняння (4), отримаємо

$$48,64x^2 - 170,3x + 104,2 = 0, \quad (6)$$

$$48,64x^2 - 170,3x + 18,2 = 0. \quad (7)$$

У результаті розв'язання цих рівнянь отримаємо значення $x = \text{П/Ц} = 0,79$ і $0,11$, які забезпечать модуль деформації прокладного шару $E = 58,3$ і $144,3$ МПа відповідно.

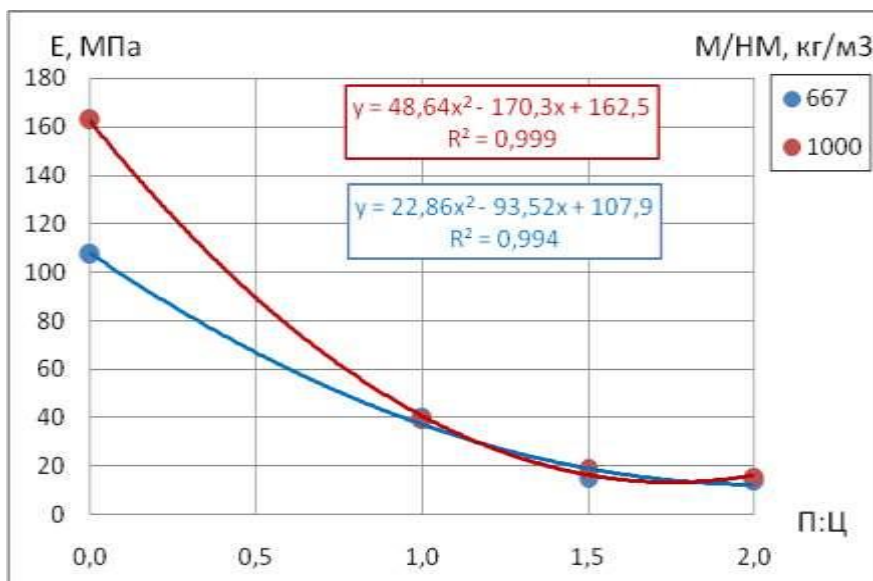


Рис. 12. Залежність початкового модуля пружності E прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу на основі портландцементу і нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною 10 мм від масового відношення кількості піску до цементу П:Ц за різних витрат мінеральної суміші на 1 м^3 НМОС

Уточнені в такий спосіб склади рулонного композиційного матеріалу для прокладного шару наведені в таблиці. Такі склади рекомендовано застосовувати для прокладного шару, який улаштовується згідно з роботою [27].

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

Розроблено та запатентовано конструктивно-технологічне рішення прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу, що складається з нетканого матеріалу об'ємної структури НМОС із анізотрично орієнтованих

поліефірних волокон, цементу, дрібного заповнювача піску і добавок-прискорювачів твердіння.

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

Досліджено залежності модуля деформації та міцності на стиск прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу від відношення кількості піску до кількості цементу в мінеральній суміші П:Ц, витрат мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС M/HM , товщини НМОС. Такий прокладний шар також зазнає значних деформацій, проте руйнування з порушенням структурної цілісності не спостерігається.

Встановлено, що модуль деформації та умовна міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі

збільшенням вмісту в мінеральній суміші піску П/Ц і зменшенням витрат мінеральної суміші на одиницю площі та об'єму НМОС М/НМ. Прокладний шар із рулонного композиційного матеріалу має модуль

деформації 144 МПа за П/Ц не більше 0,11, М/НМ 1000 кг/м³. Такі склади рекомендовано застосовувати для прокладного шару, спосіб улаштування якого запатентовано.

Список використаних джерел

1. ЦП-0137. Інструкція з укладання та експлуатації безбаластного мостового полотна (БМП) на залізобетонних плитах. Київ: Укрзалізниця, 2006. 100 с.
2. Забіяка О. А. Механізм тріщиноутворення у плитах безбаластного полотна та опорах залізничних мостів і підвищення їх тріщиностійкості: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків, 2015. 217 с.
3. Зверєва А. С. Полімермінеральні композити з регульованими деформативними властивостями для основ залізобетонних транспортних споруд: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків, 2021. 246 с.
4. Досвід застосування нових конструкцій безбаластного залізничного полотна у Польщі та оцінка перспектив їх застосування в Україні / Т. Шуба, В. Чистяк, В. Перестюк та ін. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2011. Вип. 122. С. 201-221.
5. Дорослий погляд на світ. URL: <https://i.lb.ua/027/55/54992e30a8e95.jpeg> (дата звернення: 10.11.2023).
6. Весь діловий та активний Малин. URL: <https://malyn.media/wp-content/uploads/2022/04/zaliznychnyy-mist-cherez-Irpin-2.jpg> (дата звернення: 10.11.2023).
7. Ballastless track on bridges /ed. By S. Freudenstein, K. Geisler, T. Molter, M. Missler, Ch. Stolz. Munich. *Ballastless Tracks*. 2017. P. 45-72. DOI:10.1002/9783433606889.ch4.
8. Поляков В. Ю., Данг Н. Т. Безбаластное мостовое полотно на ВСМ. *Мир транспорта*. 2018. Вып. 16 (2). С. 36–55.
9. Аналіз напружено-деформованого стану плит безбаластного мостового полотна і прокладного шару під ними / А. А. Плугін, С. В. Мірошніченко, О. В. Лобяк та ін. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014. Вип. 148 (2). С. 104-110.
10. ЦП-0093. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах. Київ: Укрзалізниця, 2002. 301 с.
11. Plugin A., Murygina N., Miroshnichenko S., Kaliuzhna O. Materials for Connecting Railway Reinforced Concrete Bridge Deck with Steel Bridge Structures. *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering*. Cham: Springer International Publishing. 2022. P. 318-328. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_32.
12. Городецький А. С., Євзеров І. Д. Комп'ютерні моделі конструкцій. Київ: Факт, 2007. 394 с.
13. Грибко О. В. Капітальний ремонт мосту на основі нового конструктивно-технологічного рішення прокладного шару залізобетонного безбаластного мостового полотна мостів на ВШМ. Пояснювальна записка і розрахунки до дипломного проекту зі спеціальності 273 «Залізничний транспорт». Харків: УкрДУЗТ, 2022. 67 с.
14. Fediuk R., Smoliakov A., Muraviov A. Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using Composite Binders. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. Article ID 2316347. URL: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/2316347/>.
15. Reiterman P., Holcapek O., Jogl M., Konvalinka P. Physical and Mechanical Properties of Composites Made with Aluminous Cement and Basalt Fibers Developed for High Temperature

Application. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 4. P. 1-10. DOI: 10.1155/2015/703029.

16. Taylor H. F. Cement chemistry. London: Academic Press, 1990. 459 p.

17. Kurdowski W. Cement and Concrete Chemistry. Springer, 2014. 700 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7945-7.

18. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction, SSP. *Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 12(2). P. 107-112. DOI: 10.1515/sspjce-2017-0026.

19. Pöllmann H. Syntheses, properties and solid solution of ternary lamellar calcium aluminate hydroxide salts (AFm-phases) containing SO_4^{2-} , CO_3^{2-} and OH^- . *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*. 2006. Vol. 182(2). P. 173-181.

20. Matschei T., Lothenbach B., Glasser F. P. The AFm phase in Portland cement. *Cement and concrete research*. 2007. Vol. 37(2). P. 118-130.

21. Balonis M., Lothenbach B., Le Saout G., Glasser F.P. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems. *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40.7. P. 1009-1022.

22. Balonis M., Medala M., Glasser F.P. Influence of calcium nitrate and nitrite on the constitution of the AFm and AFt cement hydrates - experiments and thermodynamic modelling. *Advances in Cement research*. 2011. Vol. 23(3). P. 129-143.

23. Plugin A. A., Runova R. F. Bonding Calcium Chloride and Calcium Nitrate into Stable Hydration Portland Cement Products: Stability Conditions of Calcium Hydrochloraluminum and Calcium Hydronitroaluminates. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. Vol. 36. P. 69-73. DOI:10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69.

24. Evaluation of the corrosion resistance of the armature under the protective layer «Viatron» / E. V. Kondrashchenko, V. I. Babushkin, T. A. Kostyuk, V. A. Bobko, O. Yu. Proshchin. *Visnik NTU «KhPI»*. 2004. Vol. 41. P. 20-22.

25. Гідроізоляційні цементні композити проникної дії / А. А. Плугін, Т. О. Костюк, О. Ю. Прошин та ін. Харків: Ко легіум, 2018. 268 с.

26. Interaction of Mineral and Polymer Fibers with Cement Stone and their Effect on the Physical-Mechanical Properties of Cement Composites / A. A. Plugin, T. O. Kostyuk, O. A. Plugin, D. O. Bondarenko, Yu. A. Sukhanova, N. N. Partala. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2017. Vol. 31. P. 59-68. DOI:10.4028/www.scientific.net/JERA.31.59.

27. Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна МПК E04B (2006.01): пат. 153601 Україна: 5/10. № u 2022 04806. Заявл. 19.12.2022; опубл. 26.07.2023, Бюл. № 30. 1 с.

Плугін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Муригіна Надія Олександрівна, асистент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8843-285X. E-mail: murygina@kart.edu.ua.

Малішевська Аліна Сергіївна, кандидат технічних наук, асистент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4780-7691. E-mail: kttolik@gmail.com.

Плугін Дмитро Артурович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4359-4369. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@gmail.com.

Муригін Максим Андрійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38 (057) 730-10-58.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Murygina Nadia, assistant of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8843-285X. E-mail: murygina@kart.edu.ua.

Malishevskaya Alina, candidate of engineering sciences, assistant of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4780-7691.

E-mail: ktolik@gmail.com.

Plugin Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of building materials and structures department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4359-4369. Tel.: +38 (057) 730-10-63.

E-mail: plugin.da@gmail.com.

Murygin Maksym, postgraduate student of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Статтю прийнято 9.12.2023 р.