

УДК 691.533

<https://doi.org/10.31713/vt1202641>

Левчик О.О. [1; ORCID ID: 0009-0003-6260-5750],
аспірант

¹ Національний університет водного господарства та
природокористування, м. Рівне

ВПЛИВ ВОДОПОГЛИНАННЯ ОСНОВИ НА АДГЕЗІЙНУ МІЦНІСТЬ ГІПСОВІСНИХ РЕМОНТНИХ РОЗЧИНІВ

Досліджено вплив водопоглинання основи на формування адгезійної міцності гіпсовісних ремонтних розчинів у віці 1 та 28 діб. Як основи використано бетони класів С16/20 та С30/35, для яких визначено водопоглинання за масою, після чого методом відриву оцінено міцність зчеплення ремонтних розчинів. Для встановлення впливу факторів складу реалізовано трифакторний план експерименту другого порядку та отримано квадратичні регресійні моделі. Середнє водопоглинання бетону С16/20 становило 6,4 %, а С30/35 – 3,4 %. За однакових параметрів складу середня адгезійна міцність до основи з бетону С16/20 була вищою – 0,42 проти 0,37 МПа у віці 1 доби та 1,15 і 1,05 МПа у віці 28 діб. Відносна різниця адгезійної міцності між основами зменшилася з 13,5 до 9,3 %, що вказує на більш істотний вплив порово-капілярної структури та вологообміну на початковій стадії формування контактної зони. Регресійний аналіз показав, що найвагомішим фактором складу для обох основ є міцність гіпсового в'язучого, а чутливість до водов'язучого відношення є вищою для основи з більшим водопоглинанням. Отримані результати обґрунтовують необхідність урахування властивостей основи під час проєктування складу ремонтного матеріалу та підготовки поверхні.

Ключові слова: ремонтний розчин, гіпсові в'язучі, адгезійна міцність, водопоглинання, контактна зона, вологообмін, регресійна модель.

Вступ. Аналіз останніх досліджень.

Ефективність відновлення бетонних і залізобетонних конструкцій визначається не лише міцністю ремонтного матеріалу, а й здатністю системи «основа – ремонтний розчин» працювати як єдиний композит. Контактна зона є критичною ділянкою ремонтної



системи, оскільки саме тут поєднуються процеси змочування, капілярного всмоктування, перенесення вологи, гідратації в'язучого, механічного зачеплення та формування фізико-хімічних зв'язків. Порушення хоча б одного з цих механізмів може спричинити локальне зростання пористості, появу мікротріщин і передчасне відшарування ремонтного шару [1, 2].

Властивості поверхневого шару основи є одними із ключових чинників формування адгезійного контакту. Водопоглинання за масою опосередковано характеризує доступний для води відкритий порово-капілярний простір. З одного боку, капілярне всмоктування може сприяти проникненню рідкої фази та тонкодисперсних компонентів ремонтної суміші в поверхневі пори й посилювати механічне зачеплення. З іншого боку, надмірне водопоглинання з приконтактного шару змінює локальне водов'язуче відношення та умови гідратації, тому вплив водопоглинання основи на міцність зчеплення не може вважатися однозначним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні огляди ремонтних гіпсовмісних систем показують, що міцність і довговічність контакту визначаються сукупністю характеристик основи та ремонтного шару: шорсткістю і чистотою поверхні, її вологісним станом, пористістю, сумісністю деформацій, способом ущільнення та умовами твердіння [1, 2]. Важливу роль відіграє механічне зачеплення: збільшення шорсткості та видалення слабого поверхневого шару здатні підвищувати міцність зчеплення, хоча надмірно агресивна підготовка може спричинити мікротріщини у приповерхневій зоні бетону [6, 7].

Окрему групу досліджень присвячено вологообміну між ремонтною розчиною сумішшю і бетонною основою. Встановлено, що початковий ступінь насичення основи впливає на перенесення води, ступінь гідратації та пористість міжфазної зони для ремонтних систем сприятливим виявлявся проміжний рівень насичення поверхневого шару, тоді як надмірно сухий, так і перенасичений стан можуть погіршувати структуру контакту [3–5, 8]. Чисельне моделювання також підтверджує, що на ранній стадії ненасичена основа відбирає воду з розчинової суміші, змінюючи локальний перебіг гідратації, а на подальших стадіях напрямок перенесення вологи може змінюватися [9].

Дослідження «старий бетон – ремонтна суміш» підтверджують, що поверхнева вологість суттєво впливає на товщину та будову перехідної зони, а суха основа може бути несприятливою для

подальшого розвитку міцності зчеплення [10]. Водночас більшість робіт оцінює вологість поверхні або ступінь її насичення, тоді як зв'язок між інтегральним показником водопоглинання бетону різних класів і адгезійною міцністю гіпсовмісних ремонтних розчинів, особливо з урахуванням рецептурних факторів та раннього віку твердіння, потребує додаткової експериментальної оцінки. Нормативні документи, зокрема серії EN 1504, розглядають міцність зчеплення як одну з базових експлуатаційних характеристик ремонтних матеріалів, що підкреслює практичну значущість такого аналізу [13].

Метою роботи є встановлення закономірностей формування адгезійної міцності гіпсовмісних ремонтних розчинів на бетонних основах класів C16/20 та C30/35, що характеризуються різним водопоглинанням, у віці 1 та 28 діб. Для досягнення мети визначено водопоглинання бетонних основ, досліджено міцність зчеплення методом відриву, реалізовано трифакторний план експерименту та побудовано регресійні моделі для оцінювання впливу рецептурних факторів на адгезійну міцність.

Матеріали та методи дослідження

В'яжуче виготовляли шляхом змішування будівельного гіпсу - 60 %, з міцністю відповідно до матриці планування (табл. 2), портландцементу - 20%, меленого доменного гранульованого шлаку - 20%, Для регулювання термінів тужавлення до складу суміші вводили сповільнювач тужавлення – винну кислоту, у кількості 0,2% від маси гіпсу. У ході досліджень в кожній точці виготовляли розчини на основі ГЦШВ з вмістом компонентів згідно умов планування.

У дослідженні як основи використано зразки бетонів класів C16/20 та C30/35, які відрізнялися щільністю структури та водопоглинанням. Перед випробуваннями поверхню зразків очищували від пилу, залишків цементного молока та слабо зв'язаних частинок. Однакова підготовка поверхні забезпечувала зіставні умови випробування та давала змогу оцінити зв'язок між водопоглинанням бетонної основи і формуванням адгезійного контакту.

Водопоглинання бетону за масою визначали відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [11]. Зразки висушували за температури 105 ± 5 °C до сталої маси, охолоджували до кімнатної температури та зважували; отримане значення приймали як масу сухого зразка m_1 . Далі зразки занурювали у воду температурою 20 ± 2 °C і витримували

до водонасичення. Після видалення надлишкової вологи з поверхні зразки повторно зважували, а отриману масу приймали як m_2 .

$$W_m = ((m_2 - m_1) / m_1) \cdot 100, \% \quad (1)$$

де W_m – водопоглинання бетону за масою, %; m_1 – маса сухого зразка, г; m_2 – маса зразка після водонасичення, г.

Адгезійну міцність визначали методом відриву згідно ДСТУ EN 1542:2022 [12] після нанесення досліджуваних ремонтних розчинів на підготовлені бетонні основи. Зразки витримували у нормальних умовах твердіння, після чого визначали міцність зчеплення у віці 1 та 28 діб.

Для дослідження закономірностей формування властивостей гіпсовмісних ремонтних сумішей було реалізовано трифакторний план експерименту другого порядку типу V_3 . Як незалежні змінні прийнято три технологічні фактори, що характеризують склад та умови формування структури ремонтного розчину. Матрицю планування реалізовано для двох бетонних основ – C16/20 та C30/35, у відповідних точках плану рецептурні параметри ремонтних розчинів були однаковими, а змінювався тип бетонної основи.

Фактор X_1 характеризував міцність гіпсової складової R_g , яку варіювали в межах від 5 до 15 МПа. Фактор X_2 характеризував вміст в'язучого, %, який змінювали на трьох рівнях: 33, 50 та 67 %. Фактор X_3 – водов'язуче відношення, яке змінювали в межах 0,4, 0,5 0,6.

Результати досліджень та їх обговорення

Результати визначення водопоглинання бетонів різних класів наведено в табл. 1. Для досліджених зразків бетон C30/35 характеризувався нижчим водопоглинанням порівняно з C16/20, що узгоджується з його щільнішою структурою та меншою часткою відкритих капілярних пор.

Таблиця 1.

Водопоглинання бетонних зразків

Клас бетону	Маса сухого зразка m_1 , г	Маса насиченого зразка m_2 , г	Водопоглинання W_m , %
C16/20	2322	2450	5,5
C16/20	2336	2503	7,1
C16/20	2340	2495	6,6
C30/35	2395	2470	3,1
C30/35	2400	2485	3,5
C30/35	2390	2471	3,4

Середнє значення водопоглинання основи з бетону C16/20 становило 6,4 %, тоді як для бетону C30/35 – 3,4 %. Таким чином, у досліджених зразках бетон C16/20 характеризувався більшою водопоглинальною здатністю, що може бути пов'язано з більш розвиненою системою відкритих капілярних пор. Бетон C30/35, навпаки, мав нижче водопоглинання та, відповідно, меншу здатність до водонасичення через відкритий поровий простір. Отримана відмінність є важливою для оцінювання умов вологообміну на межі контакту, оскільки капілярний транспорт визначає перерозподіл води в перші години після нанесення ремонтного матеріалу [4, 5, 9].

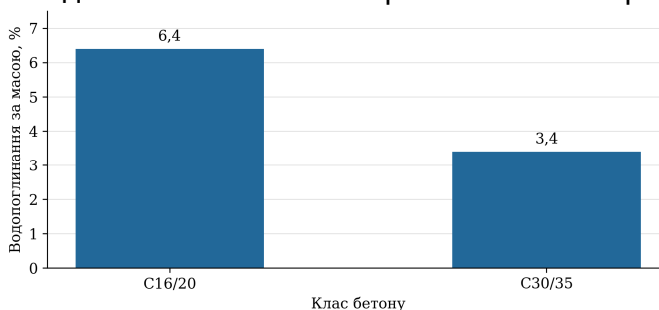


Рис. 1. Середнє водопоглинання бетонних основ різних класів

Порівняння результатів випробувань показало, що за прийнятих умов основа з бетону C16/20, яка мала вище водопоглинання, у середньому забезпечувала більші значення адгезійної міцності порівняно з бетоном C30/35. Для C16/20 середня адгезійна міцність у віці 1 доби становила 0,42 МПа, а для C30/35 – 0,37 МПа. Відносна різниця міцності між середніми значеннями у віці 1 доби становила близько 13,5 %.

У віці 28 діб середня адгезійна міцність для бетону C16/20 дорівнювала 1,15 МПа, тоді як для C30/35 – 1,05 МПа. Відносна різниця зменшилася до 9,3 %. Більш виражена різниця у ранньому віці вказує на істотну роль властивостей основи на початковій стадії формування контактної зони. У процесі подальшого твердіння вплив умов вологообміну зменшується, тоді як зростає роль гідратації в'язучого та формування власної структури ремонтного шару. Така інтерпретація узгоджується з даними про розвиток мікроструктури ремонтного розчину та зміну напрямку перенесення вологи в часі [4, 5, 8, 9].

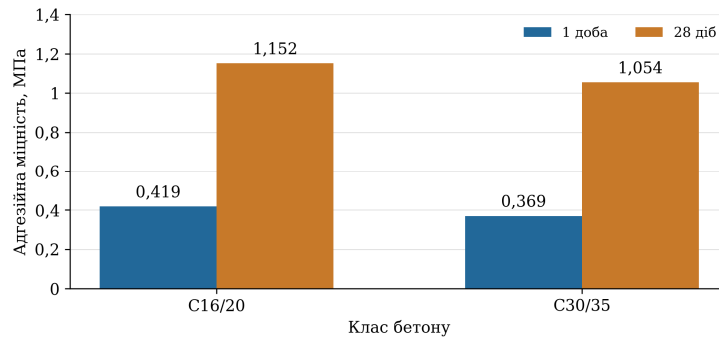


Рис. 2. Середні значення адгезійної міцності ремонтних розчинів до бетонів C16/20 та C30/35

Таблиця 2.

Експериментальні значення адгезійної міцності розчинів до бетонних основ

№	X ₁	X ₂	X ₃	R _г	Вміст в'язучого, %	В/В _{яж}	C16/20 1 доба	C16/20 28 діб	C30/35 1 доба	C30/35 28 діб
1	1	1	1	15	67	0,40	0,75	1,93	0,66	1,68
2	1	1	-1	15	67	0,60	0,53	1,45	0,48	1,33
3	1	-1	1	15	33	0,40	0,64	1,29	0,57	1,30
4	1	-1	-1	15	33	0,60	0,40	1,12	0,35	1,09
5	-1	1	1	5	67	0,40	0,28	0,95	0,39	0,95
6	-1	1	-1	5	67	0,60	0,20	0,63	0,18	0,64
7	-1	-1	1	5	33	0,40	0,33	0,82	0,23	0,76
8	-1	-1	-1	5	33	0,60	0,19	0,75	0,39	0,69
9	1	0	0	15	50	0,50	0,61	1,50	0,44	1,30
10	-1	0	0	5	50	0,50	0,43	0,96	0,38	0,85
11	0	1	0	10	67	0,50	0,53	1,61	0,45	1,33
12	0	-1	0	10	33	0,50	0,41	0,88	0,29	0,76
13	0	0	1	10	50	0,40	0,49	1,21	0,32	1,15
14	0	0	-1	10	50	0,60	0,30	1,05	0,27	0,95
15	0	0	0	10	50	0,50	0,33	1,11	0,29	0,96
16	0	0	0	10	50	0,50	0,36	1,07	0,31	1,05
17	0	0	0	10	50	0,50	0,35	1,25	0,28	1,12

За результатами статистичної обробки експериментальних даних отримано квадратичні регресійні моделі, що описують адгезійну міцність ремонтних розчинів до бетонів С16/20 та С30/35 у віці 1 і 28 діб. Моделі наведено в кодованому вигляді в табл. 3.

Таблиця 3.

Математичні моделі адгезійної міцності у кодованому вигляді

Бетонна основа, вік	Рівняння регресії
С16/20, 1 доба	$f_{1д} = 0,410 + 0,150X_1 + 0,032X_2 + 0,087X_3 + 0,0639X_1^2 + 0,0139X_2^2 - 0,0611X_3^2 + 0,035X_1X_2 + 0,030X_1X_3 - 0,010X_2X_3$ (2)
С16/20, 28 діб	$f_{28д} = 1,191 + 0,318X_1 + 0,171X_2 + 0,120X_3 + 0,0066X_1^2 + 0,0216X_2^2 - 0,0934X_3^2 + 0,120X_1X_2 + 0,0325X_1X_3 + 0,070X_2X_3$ (3)
С30/35, 1 доба	$f_{1д} = 0,313 + 0,093X_1 + 0,033X_2 + 0,050X_3 + 0,0840X_1^2 + 0,0440X_2^2 - 0,0310X_3^2 + 0,0338X_1X_2 + 0,0438X_1X_3 + 0,0413X_2X_3$ (4)
С30/35, 28 діб	$f_{28д} = 1,052 + 0,281X_1 + 0,133X_2 + 0,114X_3 + 0,0196X_1^2 - 0,0104X_2^2 - 0,0054X_3^2 + 0,060X_1X_2 + 0,0225X_1X_3 + 0,0475X_2X_3$ (5)

Порівняльний аналіз лінійних коефіцієнтів показує, що для обох бетонних основ найбільший вплив має фактор X_1 . Для С16/20 коефіцієнт при X_1 збільшується від 0,15 у віці 1 доби до 0,32 у віці 28 діб, а для С30/35 – від 0,09 до 0,28. Це підтверджує визначальну роль властивостей гіпсової складової у формуванні ранньої та подальшої міцності зчеплення.

У ранньому віці модель для С16/20 характеризується також більшим коефіцієнтом при X_3 порівняно з С30/35 0,087 проти 0,050. Додатний знак цього коефіцієнта означає зростання адгезійної міцності при зменшенні фактичного В/В'яж. Отриманий результат може свідчити про більшу чутливість контактної зони бетону С16/20 до рецептурних параметрів ремонтного розчину на початковій стадії твердіння.

Посилення коефіцієнтів взаємодії факторів складу у 28-добовому віці, зокрема X_1X_2 для С16/20, вказує на комплексний характер формування адгезійного контакту. На ранній стадії значну роль відіграють змочування, вологообмін та швидке структуроутворення гіпсової складової, а в подальшому зростає внесок гідратаційних процесів цементної і шлакової складових та ущільнення контактної зони.

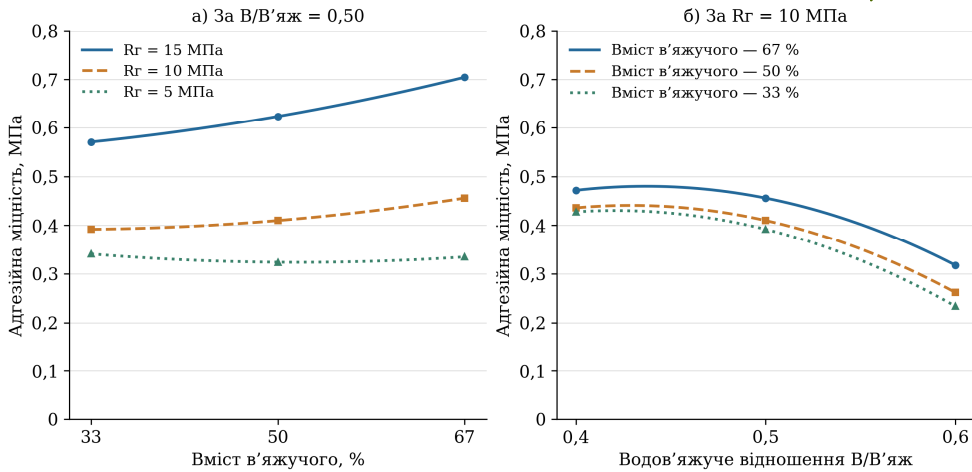


Рис. 3. Вплив факторів складу на адгезійну міцність ремонтних розчинів до бетонної основи С16/20 у віці 1 доби

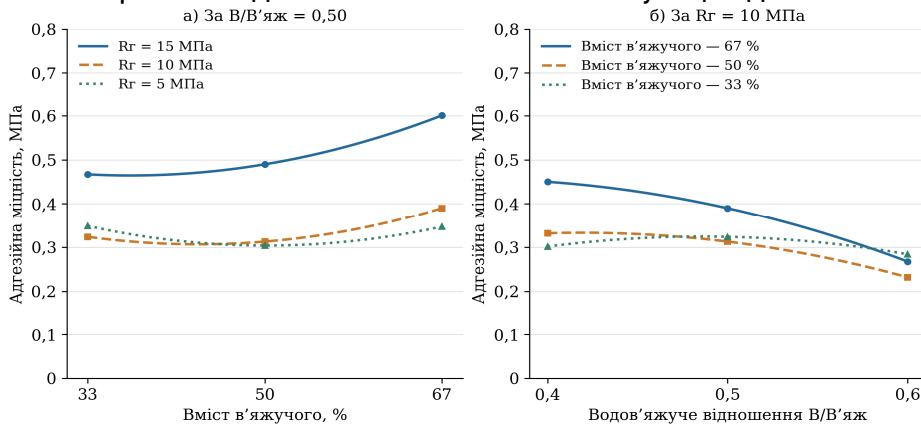


Рис. 4. Вплив факторів складу на адгезійну міцність ремонтних розчинів до бетонної основи С30/35 у віці 1 доби

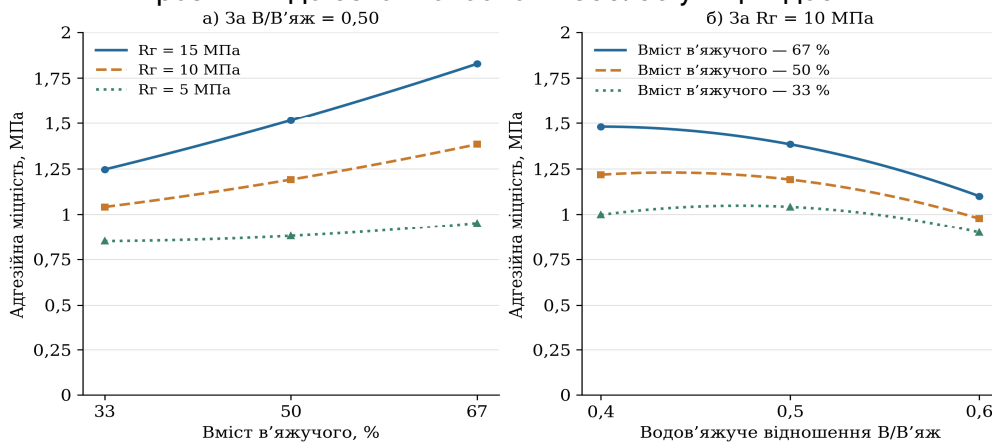


Рис. 5. Вплив факторів складу на адгезійну міцність ремонтних розчинів до бетонної основи С16/20 у віці 28 діб

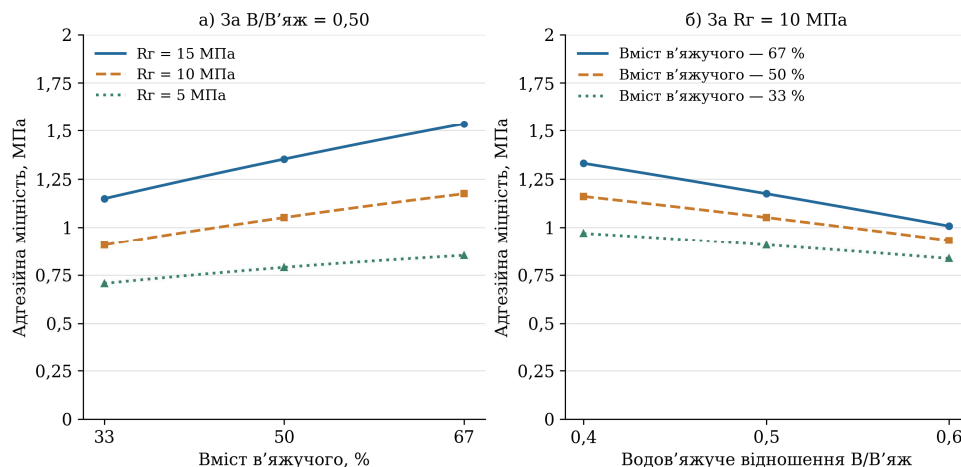


Рис. 6. Вплив факторів складу на адгезійну міцність ремонтних розчинів до бетонної основи С30/35 у віці 28 діб

Висновки.

Встановлено, що за однакових параметрів складу ремонтних розчинів характер основи впливає на формування адгезійного контакту. Основа з бетону С16/20, середнє водопоглинання якої за результатами випробувань становило 6,4 %, забезпечувало у середньому на 13,5 % вищу адгезійну міцність у віці 1 доби та на 9,3 % вищу – у віці 28 діб порівняно з бетонною основою класу С30/35, для якої середнє водопоглинання становило 3,4 %.

Більш виражена різниця у ранньому віці свідчить про істотну роль порово-капілярної структури та умов вологообміну на початковій стадії формування контактної зони. Більша водопоглинальна здатність основи може сприяти проникненню рідкої фази і тонкодисперсних компонентів у поверхневий поровий простір та формуванню мікромеханічного зачеплення. У 28-добовому віці відносна різниця між основами зменшується внаслідок розвитку власної структури ремонтного розчину і подальшої гідратації в'язучого.

Регресійний аналіз показав, що для обох досліджених основ найбільш вагомим фактором є X_1 , який характеризує властивості гіпсової складової. Для бетонної основи з більши водопоглинанням (С16/20) у ранньому віці спостерігається вища чутливість адгезійної міцності до зміни X_1 та X_3 , що підтверджує необхідність урахування властивостей її при проєктування складу ремонтних сумішей.

Отримані результати підтверджують доцільність урахування водопоглинальної здатності та порово-капілярної структури основи при проєктуванні ремонтних складів і підготовці поверхні.

1. Song X., Song X., Liu H., Huang H., Anvarovna K. G., Ugli N. A. D., Huang Y., Hu J., Wei J., Yu Q. Cement-Based Repair Materials and the Interface with Concrete Substrates: Characterization, Evaluation and Improvement. *Polymers*. 2022. 2. Manawadu A., Qiao P., Wen H. Characterization of Substrate-to-Overlay Interface Bond in Concrete Repairs: A Review. *Construction and Building Materials*. 2023. 3. Courard L., Lenaers J.-F., Michel F., Garbacz A. Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems. *Construction and Building Materials*. 2011. 4. Luković M., Ye G. Effect of Moisture Exchange on Interface Formation in the Repair System Studied by X-ray Absorption. *Materials*. 2016. 5. Zhou J., Ye G., van Breugel K. Cement hydration and microstructure in concrete repairs with cementitious repair materials. *Construction and Building Materials*. 2016. 6. Courard L., Piotrowski T., Garbacz A. Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair. *Cement and Concrete Composites*. 2014. 7. Feng S., Xiao H., Geng J. Bond strength between concrete substrate and repair mortar: Effect of fibre stiffness and substrate surface roughness. *Cement and Concrete Composites*. 2020. 8. Xue S., Meng F., Zhang P., Wang J., Bao J., He L. Influence of substrate moisture conditions on microstructure of repair mortar and water imbibition in repair-old mortar composites. *Measurement*. 2021. 9. Lan M., Zhou J., Li H., Wang Y. Numerical Simulation on Cement Hydration and Microstructure Development in Repair-Substrate Interface. *Frontiers in Materials*. 2022. 10. Xiong G., Guo X., Cundy A. B., Hashem F. S., Wu M. Understanding the new-to-old interfacial bonding mechanism of geopolymer for concrete repair: Insight into effects of surface moisture of substrate. *Construction and Building Materials*. 2025. 11. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 12. ДСТУ EN 1542:2022 (EN 1542:1999, IDT). Вироби та системи для захисту та ремонту бетонних конструкцій. Методи випробувань. Вимірювання міцності з'єднання відриванням. 13. ДСТУ EN 1504-3:2026 (EN 1504-3:2005, IDT). Матеріали і системи для захисту та ремонту бетонних конструкцій. Визначення, вимоги, контроль якості та оцінка відповідності. Частина 3. Конструкційний і неконструкційний ремонт.

REFERENCES:

1. Song X., Song X., Liu H., Huang H., Anvarovna K. G., Ugli N. A. D., Huang Y., Hu J., Wei J., Yu Q. Remontni materialy na osnovi tsementu ta zona kontaktu z betonnoyu osnovoyu: kharakterystyka, otsinka ta vdoskonalennya. *Polymers*.

2022. 2. Manawadu A., Qiao P., Wen H. Kharakterystyka zcheplennya na mezhi rozdilu «osnova — remontnyy shar» pry remonti betonu: ohlyad. Construction and Building Materials. 2023. 3. Courard L., Lenaers J.-F., Michel F., Garbacz A. Riven' nasychennya poverkhnevoyi zony betonu ta adheziya remontnykh system. Construction and Building Materials. 2011. 4. Luković M., Ye G. Vplyv volohoobminu na formuvannya zony kontaktu v remontniy systemi: doslidzhennya metodom renthenivs'koho pohlynannya. Materials. 2016. 5. Zhou J., Ye G., van Breugel K. Hidratatsiya tseментu ta mikrostruktura pry remonti betonu tseментnymi remontnymi materialamy. Construction and Building Materials. 2016. 6. Courard L., Piotrowski T., Garbacz A. Prypoverkhnevi vlastyivosti, shcho vplyvayut' na mitsnist' zcheplennya pry remonti betonu. Cement and Concrete Composites. 2014. 7. Feng S., Xiao H., Geng J. Mitsnist' zcheplennya mizh betonnoyu osnovoyu ta remontnym rozchynom: vplyv zhorstkosti fibry ta shorstkosti poverkhni osnovy. Cement and Concrete Composites. 2020. 8. Xue S., Meng F., Zhang P., Wang J., Bao J., He L. Vplyv umov volohosti osnovy na mikrostrukturu remontnoho rozchynu ta vodopohlynannya v kompozytakh «remontnyy rozchyn — staryy rozchyn». Measurement. 2021. 9. Lan M., Zhou J., Li H., Wang Y. Chysel'ne modelyuvannya hidratatsiyi tseментu ta formuvannya mikrostruktury na mezhi rozdilu «remontnyy material — osnova». Frontiers in Materials. 2022. 10. Xiong G., Guo X., Cundy A. B., Hashem F. S., Wu M. Rozuminnya novoho mekhanizmu mizhfaznoho zv'yazku heopolimeriv dlya remontu betonu: rozuminnya vplyvu poverkhnevoyi volohosti osnovy. Budivnytstvo ta budivel'ni materialy. 2025. 11. DSTU B V.2.7-170:2008. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya seredn'oyi hustyny, volohosti, vodopohlynannya, porystosti ta vodonepronyknosti. Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny, 2009. 12. DSTU EN 1542:2022 (EN 1542:1999, IDT). Vyroby ta systemy zakhystu ta remontu betonnykh konstruktsiy. Metody vyprobuvan'. Vymiryuvannya mitsnosti z'yednannya vidryvanniam. DSTU EN 1504-3:2026 (EN 1504-3:2005, IDT). Materialy i systemy zakhystu ta remontu betonnykh konstruktsiy. Vyznachennya, vymohy, kontrol' yakosti ta otsinka vidpovidnosti. Chastyna 3. Konstruktsiynyy i nekonstruktsiynyy remont.

Levchyk O.O. [1; ORCID ID: 0009-0003-6260-5750],
Postgraduate student

¹ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

THE EFFECT OF SUBSTRATE WATER ABSORPTION ON THE ADHESIVE STRENGTH OF GYPSUM-BASED REPAIR MORTARS

The effect of substrate water absorption on the development of the bond strength of gypsum-based repair mortars at 1 and 28 days was investigated. Concrete of classes C16/20 and C30/35 was used as the substrate; water absorption by mass was determined for these concretes, after which the bond strength of the repair mortars was evaluated using the pull-off test. To determine the influence of composition factors, a second-order three-factor experimental design was implemented, and quadratic regression models were obtained. The average water absorption of C16/20 concrete was 6.4%, and that of C30/35 concrete was 3.4%. Under identical composition parameters, the average bond strength to the C16/20 concrete substrate was higher – 0.42 versus 0.37 MPa at 1 day and 1.15 versus 1.05 MPa at 28 days. The relative difference in bond strength between the substrates decreased from 13.5% to 9.3%, indicating a more significant influence of the pore-capillary structure and moisture exchange during the initial stage of contact zone formation. Regression analysis showed that the most significant compositional factor for both substrates is the strength of the gypsum binder, and sensitivity to the water-to-binder ratio is higher for the substrate with greater water absorption. The results obtained justify the need to consider the properties of the substrate when designing the composition of the repair material and preparing the surface.

Keywords: repair mortar, gypsum binders, bond strength, water absorption, contact zone, moisture exchange, regression model.

Отримано: 29 січня 2026 року

Прорецензовано: 28 лютого 2026 року

Прийнято до друку: 27 березня 2026 року



© 2026 [Levchyk O.O.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license ([creativecommons.org](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).