ISSN 2306-5478

УДК 691.55/.57 https://doi.org/10.31713/vt2202622

Левчик О.О., (1:ORCID: 0009-0003-6260-5750)
аспірант
Марчук В.В., (1:ORCID: 0000-0003-0999-0402)
к.т.н., доцент

[1] Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ УСАДКИ ТА РОЗШИРЕННЯ РЕМОНТНИХ РОЗЧИНІВ НА ОСНОВІ ГІПСОЦЕМЕНТНОШЛАКОВОГО В'ЯЖУЧОГО

У статті наведено результати дослідження лінійних деформацій швидкотверднучих ремонтних розчинів на основі гіпсоцементношлакового в'яжучого (ГЦШВ). Визначення деформацій виконували відносно початкового значення у віці 1 год твердіння, з подальшим контролем до 365 діб. Встановлено, що впродовж перших 28 діб для всіх досліджених складів переважали деформації розширення. Найбільше значення - 2,75 мм/м було для суміші на гіпсі Г10 при співвідношенні в'яжуче : заповнювач - 2:1 на 7 добу. Показано, що марка гіпсу та частка заповнювача істотно впливають не лише на величину, а й на характер розвитку деформацій у часі. Суміші на основі Г10 характеризуються найбільш інтенсивним раннім розширенням, тоді як на Г5 встановлено найменші довготривалі деформації. Отримані результати свідчать про можливість регулювання деформаційної поведінки ремонтних розчинів на основі ГЦШВ з метою забезпечення раннього компенсуючого розширення та подальшої стабілізації лінійних розмірів ремонтного шару.

Ключові слова: гіпсоцементношлакове в'яжуче, ремонтний розчин, усадка, лінійні деформації, гіпс, доменний шлак.

Постановка проблеми

Довговічність ремонтного розчину визначається не лише рівнем його міцності, а й деформаційною сумісністю з бетонною основою. За умов жорсткого зчеплення з основою деформації усадки ремонтного матеріалу обмежуються, унаслідок чого в ньому та в контактній зоні виникають розтягувальні напруження. Їх накопичення може спричиняти мікротріщиноутворення, крайове

відшарування та зниження адгезійної міцності. Тому для швидкотверднучих ремонтних сумішей поряд із ранньою міцністю суттєве значення має кінетика лінійних деформацій та можливість керування і забезпечення їх стабілізації у подальші строки твердіння [1].

Одним із поширених підходів до зменшення негативного впливу усадки є розширення на ранній стадії твердіння. У в'яжучих системах, що одночасно містять алюмінати кальцію, портландцементну складову та сульфати кальцію, таке розширення пов'язують передусім з інтенсивним утворенням етрингіту. За даними сучасних досліджень, саме кероване раннє формування етрингіту забезпечує поєднання швидкого тужавлення, високої ранньої міцності та ефекту компенсації усадки. При цьому результат визначається не самим фактом утворення етрингіту, а співвідношенням компонентів, швидкістю його кристалізації, доступністю вологи, температурою та сформованою до цього моменту жорсткістю матриці [1, 2].

Огляд сучасних досліджень

Вагомий внесок у розвиток гіпсовмісних і шлакових композиційних в'яжучих зроблено Л. Й. Дворкіним та представниками його наукової школи. У монографічних дослідженнях автора розглянуто закономірності одержання модифікованих гіпсових і сульфатно-шлакових в'яжучих, а також сухих будівельних сумішей, бетонів і розчинів на їх основі. Показано, що використання гранульованого доменного шлаку в поєднанні із сульфатною складовою та хімічними модифікаторами дає змогу інтенсифікувати процеси тверднення, підвищити міцність і водостійкість композиційних систем [3]. Подальші дослідження підтвердили ефективність сульфатної активації доменного гранульованого шлаку [4]. На основі ГЦШВ, модифікованого полікарбоксилатним суперпластифікатором, одержано швидкотверднучі розчинові композиції з підвищеною міцністю та стабільними експлуатаційними характеристиками [5].

Зміна лінійних розмірів є наслідком одночасної дії протилежних процесів. З одного боку, кристалізація сульфоалюмінатних гідратів і розвиток твердої фази можуть спричиняти збільшення об'єму; з іншого – хімічна, автогенна та усадка висихання формують тенденцію до скорочення. У літературі для багатокомпонентних цементно-сульфатних систем описано характерну послідовність: початковий період незначних деформацій, стадія активного

ISSN 2306-5478

розширення під час інтенсивного утворення етрингіту та подальша стадія, коли переважають висихання, перерозподіл вологи й стабілізація або часткова компенсація раніше накопиченого розширення [5]. Саме тому оцінювання лише одного терміну твердіння не дає повної характеристики розмірної стабільності ремонтного розчину.

Для гіпсовмісних композиційних в'яжучих особливе значення має взаємодія доменного гранульованого шлаку (ДГШ) з алюмінатними фазами портландцементу. Гіпс є не тільки швидкотверднучою матрицеутворювальною складовою, але й джерелом сульфат-іонів, здатних брати участь у формуванні етрингіту. У присутності ДГШ система додатково ускладнюється внаслідок поступового залучення алюмосилікатної склоподібної фази до гідратаційних процесів. Формування C-(A)-S-H-подібних гідратів у більш пізні строки може сприяти ущільненню структури, тоді як зміна фазового співвідношення та вологості може впливати на збереження первинного компенсуючого ефекту. Через це для гіпсоцементношлакових в'яжучих доцільно оцінювати не тільки ранні, а й тривалі деформації [1, 6].

Дослідження ремонтних систем підтверджують, що оптимальним є не максимальне розширення саме по собі, а таке його значення і тривалість, які компенсують усадочну складову без формування надлишкових внутрішніх напружень. Для швидкотверднучих систем показано, що компоненти можуть істотно зменшувати усадку, однак надмірне або занадто тривале утворення розширювальних фаз здатне викликати мікротріщини та негативно позначатися на пізній міцності. Для швидкоремонтних лужноактивованих розчинів встановлено, що сульфоалюмінатний розширювальний компонент зменшує усадку завдяки ранньому формуванню етрингіту, але подальша трансформація фаз і надмірне розширення можуть знижувати стабільність структури [7].

Для ремонтних композицій важливим є також взаємозв'язок деформацій з реологічними та структурними характеристиками. Збільшення частки заповнювача, як правило, зменшує об'єм цементного каменю та може обмежувати абсолютну величину усадки. Водночас марка й дисперсність гіпсу впливають на швидкість розчинення напівводного сульфату кальцію, інтенсивність кристалізації двоводного гіпсу і, опосередковано, на умови перебігу реакцій у цементно-шлаковій складовій. Для споріднених ремонтних сумішей на основі портландцементу та гіпсу регулювання структури

гідратів і водоутримання істотно впливає на пізню стабільність матеріалу [8]. Отже, варіювання марки гіпсу та співвідношення «в'яжуче : заповнювач» є обґрунтованими факторами для встановлення закономірностей деформаційної поведінки ремонтних розчинів на основі гіпсоцементношлакового в'яжучого (ГЦШВ).

Метою дослідження є встановлення кінетики лінійних деформацій ремонтних розчинів на основі гіпсоцементношлакового в'яжучого залежно від марки гіпсу та співвідношення в'яжучого до заповнювача, а також оцінювання здатності досліджених складів до раннього компенсуючого розширення і подальшої стабілізації розмірів у тривалому віці.

В якості вихідних матеріалів даного дослідження були використані: портландцемент ПЦ-II/А-Ш-500 Р-Н виробництва ПАТ «Волинь-цемент», гіпсові в'яжучі Г-5 , Г-10, та Г-15. В якості мінеральної добавки використали мелений доменний гранульований шлак. Як заповнювач використовували кварцовий пісок Нетішинського родовища з Мкр=1,95. У якості хімічної добавки використано суперпластифікатор полікарбоксилатного типу MELFLUX 2651 F.

Методика досліджень та отримані результати.

Було досліджено кінетику деформацій дев'яти складів розчинових сумішей на основі (ГЦШВ). Склад в'яжучого в усіх серіях був однаковим: 60 % гіпсу, 25 % портландцементу та 15 % шлаку. Довжина дослідних балочок становила 160 мм. Варіювали марку гіпсу (Г5,Г10, Г15) та співвідношення в'яжучого до заповнювача.

Суміші №1 - 3 виготовляли з гіпсом Г10 при співвідношеннях 2:1, 1:1 і 1:2 відповідно; №4 - 6 - з гіпсом Г15 при тих самих співвідношеннях; №7 - 9 - з гіпсом Г5. Така схема дає змогу одночасно оцінити вплив марки гіпсу та кількості дрібного заповнювача (кварцового піску) на характер зміни лінійних розмірів.

Початковою точкою відліку прийнято показання приладу через 1 год після твердіння. Вихідні значення наведено в сотих частках міліметра. Абсолютну зміну довжини зразків у момент часу t відносно початкового вимірювання, виконаного через 1 год після тужавлення, визначали за формулою:

$$\Delta lt = (Nt - N_1\text{год}) \cdot 0{,}01, \text{ мм};$$

Відносну лінійну деформацію перераховували на 1 м довжини зразка за виразом:

$$\varepsilon t = (\Delta lt / 160) \cdot 1000, \text{ мм/м}.$$

 ISSN 2306-5478

де Nt - показ індикатора у момент часу t, поділок; N_1год - початковий показ індикатора через 1 год після тужавлення, поділок; 0,01 - ціна поділки індикатора, мм; Δlt - зміна довжини зразка, мм; 160 - розрахункова довжина зразка, мм; εt - лінійна деформація, мм/м.

Отримані експериментальні результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Відносні лінійні деформації розширення і усадки досліджуваних розчинів, мм/м

Термін	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
1 год	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2 год	0,125	0,125	0,125	0,125	0,312	0,312	0,250	0,188	0,125
12 год	0,938	1,000	0,688	0,375	0,938	1,375	0,125	0,562	0,250
1 доба	2,000	1,125	0,875	0,312	0,625	1,500	0,000	0,438	0,562
7 діб	2,750	1,500	0,938	0,875	0,938	1,500	1,062	0,625	0,750
28 діб	2,438	2,125	1,438	1,062	0,312	1,375	0,938	0,625	0,500
365 діб	1,375	1,625	1,000	1,750	0,000	1,250	0,250	-0,250	-0,062

Аналіз результатів показав, що від 2 год до 28 діб усі дев'ять складів характеризувалися додатними деформаціями. Через 2 год розширення становило 0,125-0,313 мм/м, а через 7 діб - 0,625–2,750 мм/м. У віці 28 діб додатна деформація зберігалася для всіх складів у межах 0,313–2,438 мм/м. Таким чином, упродовж 28 діб для досліджених ГЦШВ-розчинів переважає розширення, а не традиційна усадка.

Найбільш виражене розширення отримано для серії з гіпсом Г10. Суміш №1 (відношення ГЦШВ:заповнювач - 2:1) через 1 добу мала розширення 2,0 мм/м, на 7 добу досягла максимального значення 2,75 мм/м, після чого відбулося часткове зменшення до 2,438 мм/м на 28 добу та 1,375 мм/м через 365 діб. Для суміші №2 (відношення ГЦШВ:заповнювач - 1:1) максимум 2,125 мм/м формувався пізніше, на 28 добу, а через рік зберігалося розширення 1,625 мм/м. Суміш №3 (відношення ГЦШВ:заповнювач - 1:2) мала меншу інтенсивність деформування, максимум 1,438 мм/м на 28 добу та 1,0 мм/м на 365 добу. Отже, для Г10 збільшення частки заповнювача знижує раннє розширення.

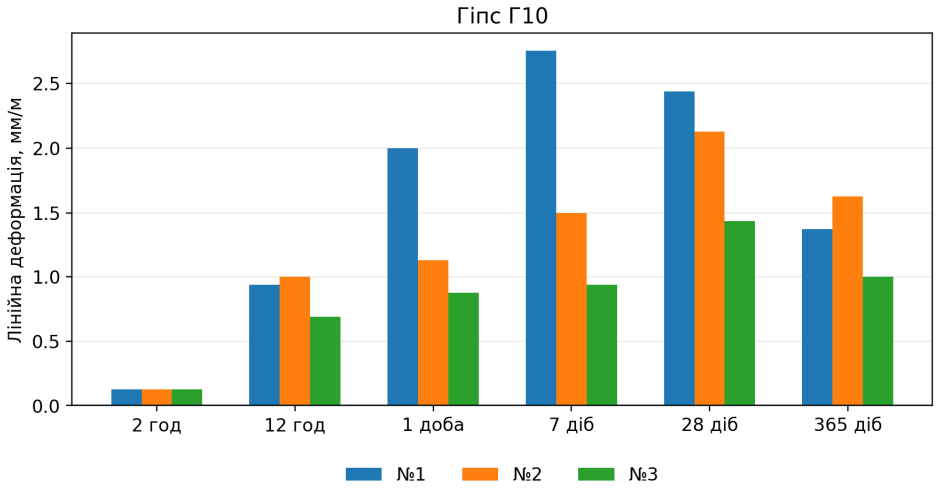


Рис. 1. Кінетика лінійних деформацій розчинів на основі гіпсу Г10 (суміші №1 - 3)

У серії з гіпсом Г15 характер деформацій був більш різноманітним. Суміш №4 (2:1) мала відносно невелике раннє розширення, яке поступово зростало до 1,063 мм/м на 28 добу і 1,750 мм/м через 365 діб, тобто мало подовжений характер. Суміш №5 (1:1) після раннього максимуму 0,938 мм/м поступово повернулася до нульової деформації через рік. Для суміші №6 (1:2) характерне швидке формування розширення 1,5 мм/м уже через 1 добу з подальшою стабілізацією на рівні 1,25 мм/м у віці 365 діб.

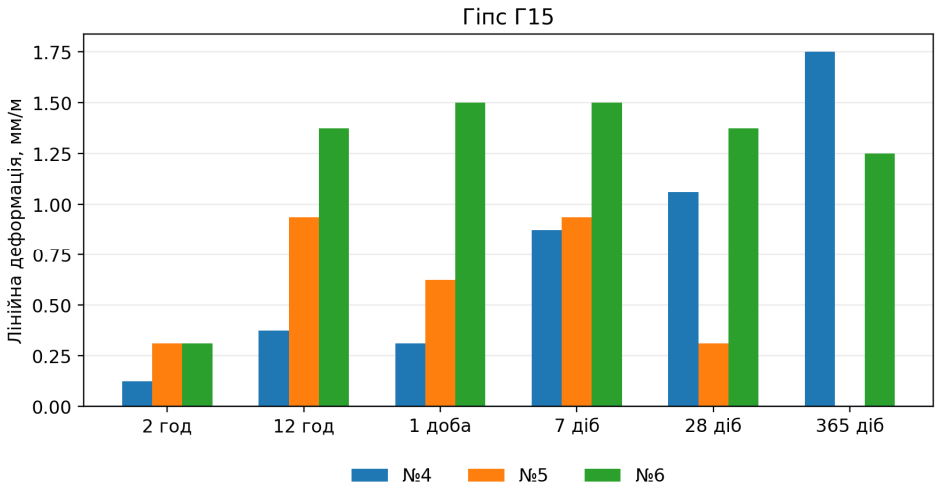


Рис. 2. Кінетика лінійних деформацій розчинів на основі гіпсу Г15 (суміші №4 - 6)

ISSN 2306-5478

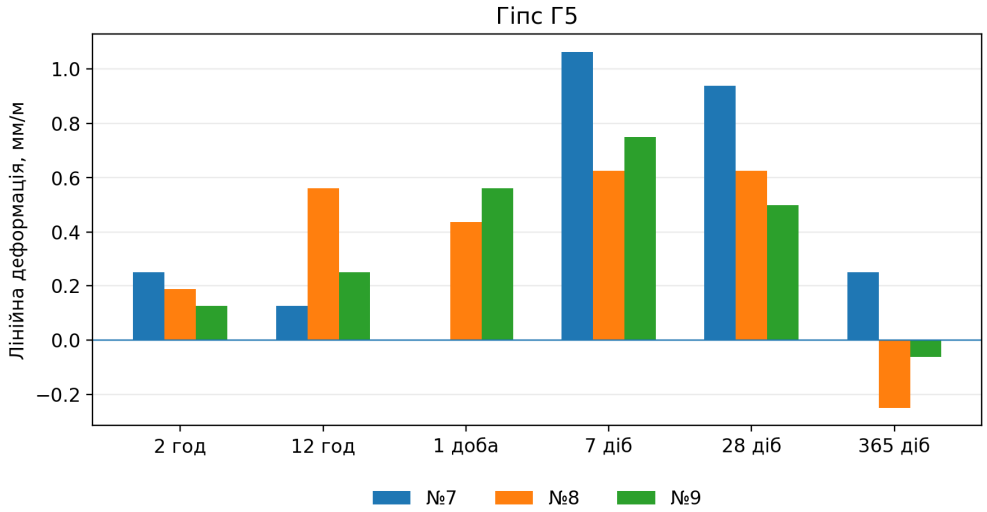


Рис. 3. Кінетика лінійних деформацій розчинів на основі гіпсу Г5 (суміші №7 - 9)

Найменші деформації спостерігалися для сумішей на гіпсі Г5, точка №7 (2:1) досягла максимуму 1,063 мм/м на 7 добу, але через рік зберегла лише 0,250 мм/м. Для №8 (1:1) максимальне розширення становило 0,625 мм/м, а на 365 добу зафіксовано –0,250 мм/м. Суміш №9 (1:2) мала максимум 0,750 мм/м на 7 добу та –0,063 мм/м через 365 діб. Отже, склади з Г5 характеризуються найнижчим потенціалом довготривалого розширення, а для №8 і №9 у пізньому віці проявляється незначне скорочення відносно початкової точки.

Встановлене розширення може бути пов'язане зі специфікою гідратації багатокомпонентної системи «гіпс - портландцемент - шлак». Поряд із кристалізацією сульфатної складової відбувається гідратація цементних мінералів та утворення новоутворень, збільшення об'єму яких здатне компенсувати усадочні процеси. Одним із імовірних чинників є формування сульфоалюмінатних фаз, зокрема етрингіту. Водночас у межах цього експерименту фазовий склад безпосередньо не визначався, тому таке пояснення слід розглядати як обґрунтовану інтерпретацію, що потребує підтвердження структурно-фазовими дослідженнями.

Для ремонтних матеріалів помірне раннє розширення є потенційно сприятливим, оскільки може компенсувати усадочні деформації та зменшити розтягувальні напруження в контактній зоні з бетонною основою. Порівняння довготривалих значень показує, що однакова за знаком рання деформація не завжди означає однакову стабільність у подальшому. Суміш №1 після інтенсивного

розширення частково скорочується, але через 365 діб зберігає 1,375 мм/м. Суміш №4, навпаки, впродовж першої доби деформується незначно, однак її розширення триває і в пізні строки, досягаючи 1,750 мм/м через рік. Для ремонтного розчину ці два типи поведінки мають різне технологічне значення - раннє компенсуюче розширення потенційно корисне для обмеження усадочних напружень, тоді як тривале наростання деформації потребує додаткової оцінки щодо можливого впливу на внутрішній напружений стан затверділого шару.

З погляду розмірної стабільності окремий інтерес становлять суміші №5 і №6. Для №5 після циклів збільшення та зменшення розміру кінцева деформація через 365 діб дорівнює нулю відносно прийнятої початкової точки. Суміш №6 після швидкого раннього розширення надалі змінює розміри незначно і через рік зберігає 1,250 мм/м. Необхідно також враховувати, що наведені результати характеризують зміну розмірів конкретних балочок довжиною 160 мм відносно показу через 1 год після твердіння. Для оцінювання достовірності малих кінцевих значень, зокрема –0,250 і –0,063 мм/м для сумішей №8 і №9, доцільно зіставляти їх із похибкою вимірювальної системи та розкидом паралельних визначень. Це особливо важливо при інтерпретації переходу від невеликого розширення до незначної усадки у довготривалому віці.

Висновки

Експериментально встановлено, що в інтервалі від 2 год до 28 діб усі дев'ять досліджених складів на основі ГЦШВ характеризуються розширенням. На 7 добу його величина становила 0,625–2,75 мм/м, а на 28 добу - 0,312–2,438 мм/м.

Найбільш інтенсивне раннє розширення зафіксовано для складів на гіпсі Г10. Максимальне значення 2,75 мм/м отримано для суміші №1 з відношенням в'яжуче : заповнювач = 2:1 на 7 добу. Зі збільшенням частки заповнювача в серії Г10 інтенсивність раннього розширення зменшувалася, що вказує на суттєвий вплив об'єму цементного каменю на деформаційну поведінку.

Склади на гіпсі Г15 характеризуються найбільш різноманітною кінетикою. Для суміші №4 розширення продовжувало зростати до 1,75 мм/м у віці 365 діб, тоді як суміш №5 через рік повернулася до нульової деформації відносно прийнятої початкової точки. Суміш №6 після швидкого раннього розширення надалі зберігала відносно стабільні розміри, досягнувши 1,25 мм/м у віці 365 діб.

ISSN 2306-5478

Найменший потенціал довготривалого розширення виявлено для складів на гіпсі Г5. Через 365 діб для сумішей №8 і №9 зафіксовано невеликі від'ємні деформації –0,250 та –0,062 мм/м відповідно.

Характер деформацій узгоджується з уявленнями про конкурентний перебіг процесів розширення та усадки в багатокомпонентній системі «гіпс – портландцемент – шлак». Ймовірним механізмом раннього компенсуючого розширення є формування сульфоалюмінатних гідратів, зокрема етрингіту, однак у межах виконаного експерименту фазовий склад безпосередньо не визначався. Тому це пояснення потребує подальшого підтвердження методами рентгенофазового та мікроструктурного аналізу.

Для ремонтних розчинів доцільним критерієм слід вважати не мінімальну або максимальну деформацію окремо, а поєднання помірного раннього компенсуючого розширення з подальшою стабілізацією лінійних розмірів. Остаточний вибір раціонального складу ГЦШВ-суміші необхідно виконувати за комплексною оцінкою деформацій, адгезійної міцності, міцності при стиску та згині, а також водо- і морозостійкості.

Отримані значення характеризують зміну довжини відносно показання, прийнятого через 1 год після твердіння, тому вони не відображають деформацій, що могли відбутися до моменту початку вимірювань. Для повної оцінки ранньої об'ємної стабільності в подальших дослідженнях доцільно поєднати прийняту методику з реєстрацією деформацій від моменту тужавлення та з визначенням фазового складу в характерні строки.

1. Noor L., Tuinukuafe A., Ideker J. H. A critical review of the role of ettringite in binders composed of CAC–PC–C$ and CSA–PC–C$. Journal of the American Ceramic Society. 2023. Vol. 106, No. 6. P. 3303–3328. DOI: 10.1111/jace.19014. 2. Rego A. C. A., Cardoso F. A., Pileggi R. G. Ternary system Portland cement-calcium aluminate cement-calcium sulfate applied to self-leveling mortar: a literature review. Cerâmica. 2021. Vol. 67, No. 381. P. 65–82. DOI: 10.1590/0366-69132021673812929. 3. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Мироненко А. В., Поліщук-Герасимчук Т. О., Кундос М. Г. Модифіковані гіпсові і сульфатно-шлакові в'яжучі та матеріали на їх основі**.** Рівне: НУВГП, 2011. 188 с. 4. Dvorkin L., Nihaeva L. Modified supersulfated cements. *Zaštita Materijala*. 2021. Vol. 62, No. 4. P. 340–347. DOI: 10.5937/zasmat2104340D. 5. Дворкін Л. Й., Степасюк Ю. О. Швидкотверднучі розчинові композиції для 3D будівельного принтеру**.** 6. Torrens-Martín D., Winnefeld F., Fernández-Carrasco L. J. Thermodynamic model for ternary OPC/CAC/calcium sulfate binders. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 302. Article 124120. 7.

Luo X., Xi M., Huang L. et al. Comparison of the effects of different expansion agents on alkali-activated rapid repair mortars: workability, mechanical properties, drying shrinkage. Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Article 13791. DOI: 10.1038/s41598-026-43508-6. 8. Shi C., Zou X., Wang P. Influences of EVA and methylcellulose on mechanical properties of Portland cement-calcium aluminate cement-gypsum ternary repair mortar. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 241. Article 118035. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118035.

REFERENCES:

1. Noor L., Tuinukuafe A., Ideker J. H. Krytychnyy ohlyad roli etrinhitu u v"yazhuchykh, shcho skladayut'sya z CAC–PC–C$ i CSA–PC–C$. Zhurnal Amerykans'koho keramichnoho tovarystva. 2023. Vyp. 106, № 6. S. 3303–3328. DOI: 10.1111/jace.19014. 2. Rego A.C.A., Cardoso F.A., Pileggi R.G. Potriyna systema Portlandtsement-kal'tsiyevyy alyuminat tsement-sul'fat kal'tsiyu, shcho nanosyt'sya na samovyrivnyuyuchyy rozchyn: ohlyad literatury. Cerâmica. 2021. Vyp. 67, № 381. S. 65–82. DOI: 10.1590/0366-69132021673812929. 3. Dvorkin L . Y., Dvorkin O. L., Myronenko A. V., Polishchuk-Herasymchuk T. O., Kundos M. H. Modyfikovani hipsovi i sul'fatno-shlakovi v"yazhuchi ta materialy na yikh osnovi. Rivne: NUVHP, 2011. 188 s. 4. Dvorkin L., Nihayeva L. Modyfikovani supersul'fatovani tsementy. Zaštita Materiala. 2021. Vyp. 62, № 4. S. 340–347. DOI: 10.5937/zasmat2104340D. 5. Dvorkin L . Y., Stepasyuk YU. O. Shvydkotverdnuchi rozchynovi kompozytsiyi dlya 3D budivel'noho prynteru. 6. Torrens-Martin D., Vinnefel'd F., Fernandes-Karrasko L. KH. Termodynamichna model' dlya potriynykh v"yazhuchykh system na osnovi portlandtsementu, alyuminatnoho tsementu ta sul'fatu kal'tsiyu. Construction and Building Materials. 2021. T. 302. Stattya 124120. 7. Lo S., Si M., Khuan L. ta in. Porivnyannya vplyvu riznykh rozshyryuval'nykh dobavok na luzhno-aktyvovani remontni rozchyny shvydkoho tverdinnya: tekhnolohichni vlastyvosti, mekhanichni kharakterystyky, usadka pry vysykhanni. Scientific Reports. 2026. T. 16. Stattya 13791. DOI: 10.1038/s41598-026-43508-6. 8. Shy CH., Tszou S., Van P. Vplyv EVA (etylenvinilatsetatu) ta metyltselyulozy na mekhanichni vlastyvosti potriynoho remontnoho rozchynu na osnovi portlandtsementu, alyuminatnoho tsementu ta hipsu. Construction and Building Materials. 2020. T. 241. Stattya 118035. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118035.

Levchyk O.O., (1:ORCID: 0009-0003-6260-5750)
PhD student
Marchuk V.V., (1:ORCID: 0000-0003-0999-0402)
Candidate of technical sciences, associate professor

ISSN 2306-5478

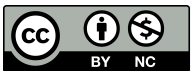
[1] National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

STUDY OF SHRINKAGE AND EXPANSION DEFORMATIONS IN REPAIR MORTARS BASED ON A GYPSUM-CEMENT-SLAG BINDER

This article presents the results of a study on the linear deformations of fast-setting repair mortars based on a gypsum-cement-slag binder (GCSB). Deformations were measured relative to the initial value at 1 hour after setting, with subsequent monitoring up to 365 days. It was found that during the first 28 days, expansion deformations predominated for all tested mixtures. The highest value - 2.75 mm/m - was observed for the mixture based on G10 gypsum with a binder-to-aggregate ratio of 2:1 on the 7th day. It was shown that the grade of gypsum and the filler content significantly influence not only the magnitude but also the nature of deformation development over time. Mixtures based on G10 are characterized by the most intense early expansion, whereas the smallest long-term deformations were observed for G5. The results obtained indicate the possibility of regulating the deformation behavior of repair mortars based on gypsum-cement-slag binder to ensure early compensatory expansion and subsequent stabilization of the linear dimensions of the repair layer.

Keywords: gypsum-cement-slag binder, repair mortar, shrinkage, linear deformations, gypsum, blast furnace slag.

Отримано: 22 березня 2026 року
Прорецензовано: 30 квітня 2026 року
рийнято до друку: 29 травня 2026 року



© 2026 [Levchyk O.O., Marchuk V.V.]. 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).