

В.В. Котенко, к.т.н., доц.
І.А. Піскун, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Обґрунтування доцільності застосування алюмінієвого профілю для армування виробів з природного каменю

Стаття присвячена дослідженню доцільності застосування алюмінієвого профілю для армування виробів з природного каменю. Головною метою цієї роботи є виконання оцінки можливості використання алюмінієвого профілю як матеріалу для армування природного каменю. У статті розглянуто основні переваги алюмінієвого профілю, такі як його легкість, міцність, корозійна стійкість і довговічність. Проаналізовано процес виготовлення та властивості алюмінієвого профілю, а також розглянуто питання доцільності його використання для армування виробів з природного каменю. На основі експериментальних досліджень і порівняльного аналізу було встановлено, що алюмінієвий профіль може ефективно використовуватися для армування виробів з природного каменю. Він забезпечує достатню міцність і стійкість виробів, дозволяючи знизити їх вагу і полегшити процес монтажу.

Отримані результати дослідження вказують на потенційну перспективність використання алюмінієвого профілю для армування виробів з природного каменю, проте лише за певних умов, які будуть зумовлені типорозміром виробу та способом його застосування.

Ключові слова: природний камінь; алюмінієва арматура; адгезійна взаємодія; деформація; механічні властивості; міцність на згин.

Актуальність теми. Головним каталізатором сталого розвитку будь-якої галузі промисловості, зокрема і каменеобробної, є необхідність забезпечення фізіологічних, соціальних чи культурно-естетичних потреб суспільства. Такий неспинний розвиток дуже добре простежується на прикладі матеріалознавства, адже ця галузь науки систематично проводить дослідження, спрямовані на створення нових матеріалів, кожен з яких володіє покращеними, часто унікальними властивостями. Наслідком цього є постійна поява нових матеріалів, в одному випадку кращих з економічної точки зору, що зменшує собівартість виготовлених з них виробів чи конструкцій, в іншому – кращих з експлуатаційної точки зору, тобто таких, які мають вищу міцність, жорсткість, стійкість до негативного впливу навколишнього середовища і як наслідок довговічність. Якщо ж аналогічним чином проаналізувати природний камінь, то його використання як матеріалу фактично лишається незмінним впродовж багатьох тисячоліть. Проте чи свідчить це про його універсальність та досконалість як матеріалу?

Отже, природний камінь є одним із перших матеріалів, що застосовуються в будівельній справі, свідченням чого є безліч пам'яток архітектури, що дійшли до нашого часу. Власне і нині будівництво є одним із головних споживачів для каменевидавничої та каменеобробної галузей. Це частково може бути пояснено постулатом давньоримського архітектора Марка Вітрувія, в якому йдеться про три властивості, якими має володіти кожна будівля: функціональність, естетичність та міцність. І якщо функціональність могла бути забезпечена виключно вміннями архітектора та ступенем розвитку будівельного мистецтва, то міцність і естетичність досягалася за рахунок застосування високоякісних матеріалів. Таким матеріалом часто був природний камінь. Адже, з однієї сторони, він володіє відмінними декоративними властивостями, з іншої – дозволяє забезпечити довговічність виробів та конструкцій за рахунок високих фізико-механічних властивостей (міцність на стиск, щільність, морозостійкість та ін.) [1–3].

Проте в умовах сьогодення доцільність застосування каменю є не такою беззаперечною, як в історичній ретроспективі. Роблячи проміжний висновок, можна констатувати, що на цьому етапі розвитку будівельного виробництва природний камінь відіграє менш значну роль, ніж раніше, за рахунок його витіснення більш новими, досконалішими та зручнішими в експлуатації матеріалами, які до того ж мають кращу несучу здатність, меншу вагу, забезпечують кращу жорсткість конструкції і ряд інших, дуже важливих переваг. Отож, наразі природний камінь здебільшого застосовується як архітектурно-декоративні вироби для оздоблення будівель чи в садово-парковій архітектурі, внаслідок чого, загальний об'єм його використання в будівництві впродовж останніх років не зазнав істотних змін. Такі матеріали, як граніт, мрамур, кварцит та інші, лишаються популярними серед архітекторів та дизайнерів. Це головним чином пояснюється такими його перевагами:

- можливість виготовлення та використання модульних елементів, що забезпечує високий ступінь уніфікації таких виробів і зменшує час, необхідний на їх монтаж;

- колірна гама, позначена традиційними білим, сірим та коричневим кольорами, що лишаються актуальними, водночас можливість застосування яскравих відтінків каменю: блакитний, зелений та червоний;

- екологічність, оскільки природний камінь – це екологічно чистий матеріал, який не містить шкідливих речовин та не виділяє токсичних випарів;

- можливість комбінування природного каменю з іншими матеріалами, такими як дерево, скло та метал задля створення унікальних інтер'єру та екстер'єру [4].

Проте, як будь-який матеріал, природний камінь має свої особливості, зокрема в частині механічної міцності та стійкості до різних навантажень. Це значною мірою обмежує, інколи унеможливує його застосування для виготовлення архітектурно-декоративних виробів. Зумовлено це тим, що під час експлуатації виробів з природного каменю на них можуть діяти різноманітні навантаження, які можуть впливати на їх механічну міцність та стійкість. Деякі з найбільш поширених навантажень враховують:

- вагове навантаження, оскільки вироби з природного каменю часто використовуються для покриття підлог, які піддаються значному ваговому навантаженню в ході експлуатації;

- вітрове навантаження, яке може мати місце при розташуванні виробів на відкритому просторі (наприклад, на фасаді будівлі), що може спричинити значні механічні напруги в матеріалі або його руйнування;

- термічне навантаження, яке виникає в результаті змін температури та призводить до зміни лінійних розмірів виробів і як наслідок їх деформації чи руйнування;

- інші впливи, такі як осідання будівельних конструкцій або їх частин, що також можуть спричинити значні механічні навантаження на вироби з природного каменю чи призвести до їх руйнування.

У зв'язку з цим, актуальності набуває питання керування експлуатаційними властивостями виробів з природного каменю. При цьому першочерговим завданням є необхідність підвищення міцності та жорсткості виробів, що в контексті цієї статті пропонується досягти за рахунок використання технології армування виробів з природного каменю за допомогою алюмінієвого профілю різного поперечного перетину [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Армування як технологія є дуже поширеною, проте найчастіше вона розглядається в контексті виготовлення залізобетонних виробів та конструкцій. Якщо ж розглядати цю технологію в контексті покращення властивостей саме виробів з природного каменю, то відомостей про такий спосіб її застосування обмаль. Переважна більшість наукових праць, які пов'язані з цією тематикою, стосуються дослідження доцільності застосування металевих, алюмінієвих чи композитних армуючих стрижнів з метою збільшення міцності та стійкості виробів з каменю [6, 7].

Однією з таких праць, де йдеться про дослідження армування каменю металевим профілем, є стаття «Experimental Study on Mechanical Properties of Steel Reinforced Natural Stone Beams» в журналі *Key Engineering Materials* (2018). У статті розглядається експериментальне дослідження механічних властивостей балок, виготовлених з природного каменю, які були армовані сталевим профілем. Дослідження показало, що армування значно покращує міцність та стійкість кам'яних виробів.

При дослідженні технології армування виробів з каменю доцільним є не лише розуміння принципу застосування самої технології, а ще й номенклатури сучасних матеріалів, які можуть бути застосовані як армуючі стрижні. Саме цьому питанню присвячено працю «Study on the Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composite» у журналі *Materials Science Forum* (2019). У статті автори досліджують механічні властивості композитних матеріалів, що складаються з алюмінієвої матриці та армуючих її волокон базальту. Дослідження показало, що такий композит має високу міцність та стійкість до впливу зовнішніх факторів. Крім того, ряд корисних напрацювань, які стосуються дослідження технології армування природного каменю композитним профілем, можна знайти в статті «An Overview of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in the Stone Industry» в журналі *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* (2016). У статті автори описують використання композитних матеріалів на основі волокон пластику для армування кам'яних виробів як засіб збільшення міцності та стійкості цих виробів. Стаття містить огляд різних типів композитних матеріалів, що використовуються в кам'яній індустрії, а також описує їх переваги та недоліки.

Для прикладу, автори статті розглядають використання вуглецевих волокон або скловолокна, які застосовують для армування природного каменю. Такі композитні матеріали мають високу міцність та жорсткість, а також стійкість до впливу зовнішніх факторів, таких як вологість та температура. Крім того, використання композитних матеріалів дозволяє зменшити вагу виробів та збільшити їх естетичний вигляд.

Узагальнюючи, доцільним буде резюмувати, що у наукових джерелах досліджено різні способи армування природного каменю металевими, алюмінієвими чи композитними елементами. Також встановлено, що армування може значно покращити міцність та стійкість кам'яних виробів, а також зменшити їх вагу та покращити естетичний вигляд, проте технологія армування є недостатньо дослідженою і її окремі аспекти потребують детальнішого вивчення.

Метою статті є дослідження доцільності застосування алюмінієвого профілю різного типорозміру для армування виробів з природного каменю шляхом порівняння значень міцнісних властивостей неармованих та армованих зразків, одержаних дослідним шляхом.

Викладення основного матеріалу. Застосування алюмінієвого профілю для армування архітектурно-декоративних виробів з каменю має кілька переваг, які обґрунтовують доцільність його використання. Однією з таких переваг є легкість алюмінієвого профілю, що дозволяє полегшити процес транспортування

та монтажу як армувальних елементів, так і армованих виробів з каменю. Алюміній не піддається корозії, що робить його досить довговічним матеріалом. Алюмінієвий профіль, який власне і пропонується використовувати, виготовляється з різною формою поперечного перерізу, який можна підібрати відповідно до розмірів самого виробу. Окрім того, такі профілі можна додатково обрізати, згинати чи з'єднувати без особливих зусиль, і все це в сукупності дозволяє полегшити процес монтажу армувальних елементів.

При застосуванні запропонованої технології в промислових масштабах актуальним буде і питання економічної доцільності її застосування. Тут потрібно зауважити, що порівняно з іншими матеріалами, такими як сталь або мідь, чи тими ж композитами – алюміній є значно дешевшим (для прикладу, вартість 1 м. п. алюмінієвого профілю в середньому в 2–2,5 рази менша, ніж аналогічного композитного профілю). До того ж алюміній може бути вторинно перероблений і використаний, що робить його більш екологічно чистим порівняно з іншими матеріалами, такими як пластик або композити. В цілому застосування алюмінієвого профілю для армування архітектурно-декоративних виробів з каменю має багато переваг, які роблять його доцільним для використання в такий спосіб [8, 9]. Власне жорсткість та навантаження, які може витримати алюмінієвий профіль, головним чином будуть залежати від його форми та розмірів. Різні форми профілів мають різні параметри, що впливають на їх міцність та жорсткість. Отож, для дослідження доцільності застосування алюмінієвого профілю з метою армування виробів з природного каменю було використано такі його види: смужка, трубка, швелер та двотавр (рис. 1).

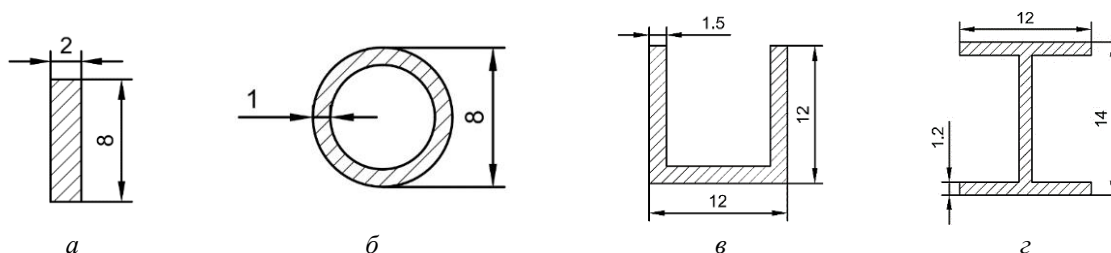


Рис. 1. Поперечний переріз та основні лінійні розміри використовуваних для армування алюмінієвих профілів: а – смужка; б – трубка; в – швелер; г – двотавр

Для оцінювання доцільності застосування алюмінієвого профілю як армуючого елемента потрібно мати чітке розуміння про його властивості та механічну тривкість. Отже, під час виконання експериментальної частини дослідження як армування для посилення міцнісних властивостей виробів з природного каменю було застосовано алюмінієвий профіль марки BRAZ LINE з алюмінієвого сплаву 6061. Алюміній типу 6061 належить до алюмінієвих сплавів, що містять ті суміші, які використовують магній і кремній як основні легуючі елементи і відповідає європейському стандарту EN 573-3, який встановлює специфікації для алюмінієвих сплавів. Номінальний склад алюмінію типу 6061: Al – 97,9 %; Si – 0,6 %; Mg – 1,0 %; Cr – 0,2 %; Cu – 0,28 %. Щільність цього сплаву становить 2,7 г/см³. Сплав піддається термічній обробці, легко формується, зварюється та добре протистоїть корозії.

Модуль пружності сплаву 6061 становить 68,9 ГПа, а модуль зсуву – 26 ГПа. Двома важливими факторами при розгляді механічних властивостей є межа текучості та гранична міцність, адже межа текучості описує максимальну величину напруги, необхідну для пружної деформації виробу при заданому навантаженні (розтяг, стиснення, скручування тощо). Гранична міцність, з іншого боку, описує максимальну величину напруги, яку може витримати матеріал до руйнування. Алюмінієвий сплав 6061 має межу міцності при розтягуванні 276 МПа і межу міцності на розрив 310 МПа (табл. 1).

Таблиця 1

Механічні властивості алюмінієвого сплаву 6061

№ з/п	Властивості	Значення	Од. виміру
1	Межа міцності на розрив	310	МПа
2	Межа міцності при розтягуванні	276	МПа
3	Міцність на зсув	207	МПа
4	Втомна міцність	96,5	МПа
5	Модуль пружності	68,9	ГПа
6	Модуль зсуву	26	ГПа

Отже, основним показником, який визначатиме стійкість описаних вище типорозмірів алюмінієвого профілю до дії навантажень, буде показник відносної жорсткості, який буде залежати від значення модуля пружності та моменту інерції. Для розрахунку цих параметрів для алюмінієвих профілів, таких як швелер, двотавр, смужка та трубка, можна скористатися формулами з теорії механіки матеріалів (табл. 2).

Формули для знаходження відносної жорсткості порівнюваних типів профілю

Для швелера	Для двотавра	Для смужки	Для трубки
Модуль пружності E : $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, де σ – напруженість при згині; ε – деформація при згині	Модуль пружності E : $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, де σ – напруженість при згині; ε – деформація при згині	Модуль пружності E : $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, де σ – напруженість при згині; ε – деформація при згині	Модуль пружності E : $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, де σ – напруженість при згині; ε – деформація при згині
Момент інерції I : $I = \frac{bh^3}{12} + \frac{Ad^2}{4}$, де b – ширина швелера; h – висота швелера; A – площа перерізу; d – відстань від крайньої точки перерізу до його найближчої осі симетрії	Момент інерції I : $I = \frac{bh^3}{12} + \frac{Ad^2}{4}$, де b – ширина двотавра; h – висота двотавра; A – площа перерізу; d – відстань від крайньої точки перерізу до його найближчої осі симетрії	Момент інерції I : $I = \frac{bh^3}{12}$, де b – ширина смужки; h – висота смужки	Момент інерції I : $I = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (D^2 - d^2)$, де D – зовнішній діаметр трубки; d – внутрішній діаметр трубки
Відносна жорсткість k : $k = \frac{EI}{l^3}$, де L – довжина швелера	Відносна жорсткість k : $k = \frac{EI}{l^3}$, де L – довжина двотавра	Відносна жорсткість k : $k = \frac{EI}{l^3}$, де L – довжина смужки	Відносна жорсткість k : $k = \frac{EI}{l^3}$, де L – довжина трубки

Проте для оцінювання жорсткості різних типорозмірів алюмінієвого профілю було використано застосунок Autodesk Inventor, адже він дозволяє пришвидшити виконання такого аналізу і головне – забезпечити точніший результат. Як наслідок було проведено моделювання зміни розмірів профілю та розподілення зусиль при дії на профіль згинаючого навантаження (адже саме такий вид навантаження є найбільш поширеним при експлуатації виробів з каменю). При цьому для моделей, які аналізувалися, було присвоєно фізичні та механічні властивості алюмінієвого сплаву 6061 (табл. 1). Навантаження, яке зумовлює згинання зразків для всіх видів профілю, задавалось однаковим. Результати моделювання показані на рисунку 2.

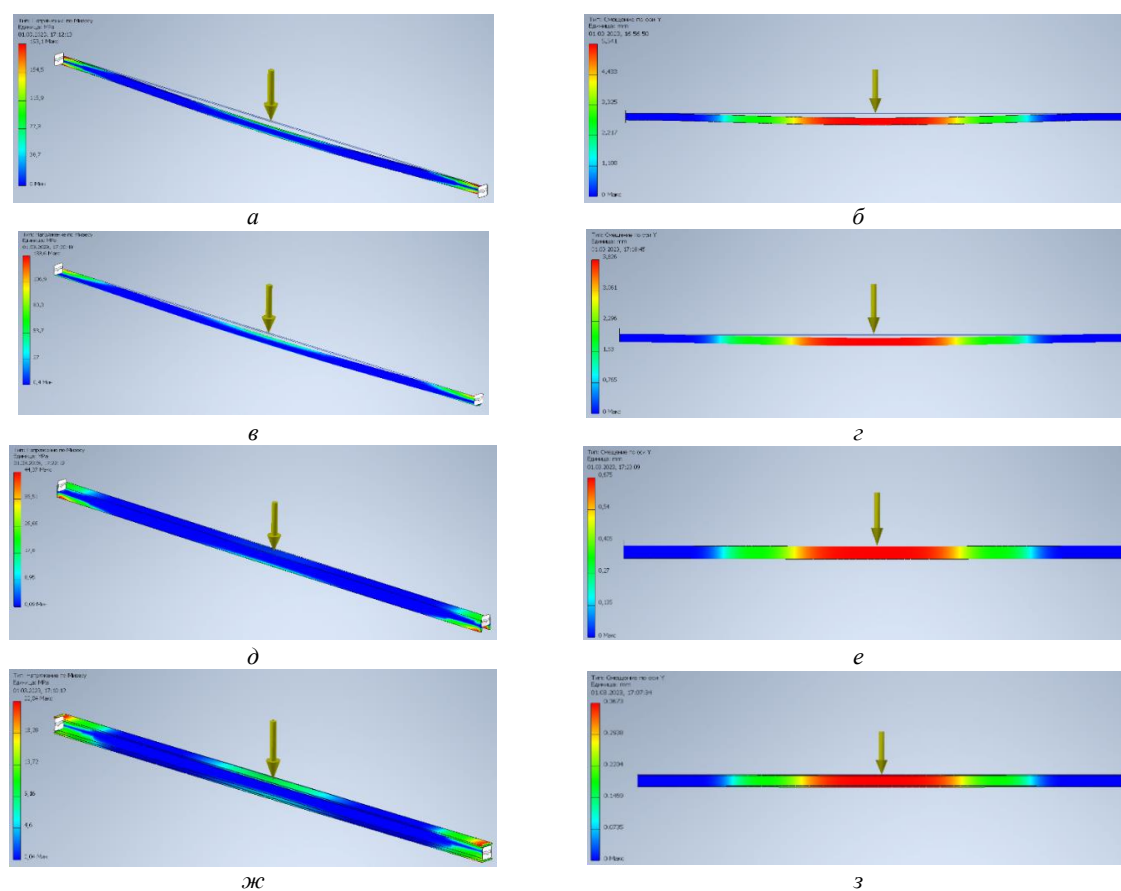


Рис. 2. Результати, одержані при дослідженні жорсткості алюмінієвого профілю різних типорозмірів: а, б – розподіл зусиль та деформація, одержані в результаті моделювання навантаження смужки; в, г – розподіл зусиль та деформація, одержані в результаті моделювання навантаження трубки; д, е – розподіл зусиль та деформація, одержані в результаті моделювання навантаження швелера; ж, з – розподіл зусиль та деформація, одержані в результаті моделювання навантаження двотавра

Потрібно зауважити, що на рисунку 2 показано розподіл зусиль за мізесом, оскільки ця міра напруження враховує не тільки нормальні, але і зміщувальні компоненти напруження в матеріалі. Це дозволяє отримати більш точну оцінку міцності елемента, оскільки деякі типи напружень можуть бути більш критичними для руйнування матеріалу, ніж інші [10].

З одержаних результатів стає очевидним, що алюмінієва смужка має найменшу жорсткість з усіх перелічених форм профілів. Вона здатна витримати невеликі навантаження, такі як зміщення, але не є придатною для суттєвих навантажень. Проте в контексті армування її застосування може бути ефективним при необхідності посилення тонких виробів, таких як плінтуси, карнизи тощо.

Алюмінієва труба має більшу жорсткість, ніж смужка, і може витримувати більше навантаження. Алюмінієвий швелер та двотавр є більш жорсткими та міцними, ніж смужка та труба. Як результат, ці форми профілів доцільно буде застосувати для посилення більш масивних виробів.

Наступною частиною дослідження є безпосередньо підготовка зразків природного каменю, їх армування описаними вище елементами та дослідження на міцність. Як зразки було використано гранітні плити розміром 600 × 100 × 30 мм, виготовлені з гранодіориту Покостівського родовища, основні фізико-механічні властивості якого наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Фізико-механічні властивості гранодіориту Покостівського родовища

№ з/п	Параметр	Значення		Од. виміру
		мін.	макс.	
1	Міцність на стиск	130	190	МПа
2	Міцність на згин	12	18	МПа
3	Міцність на зсув	15	22	МПа
4	Питома вага	2,7	2,8	г/см ³
5	Водопоглинання	0,25	0,35	%
6	Коефіцієнт тертя	0,65	0,7	–

Власне підготовка зразків являла собою нарізання повздовжніх пазів по центру заготовки для закладання в них армуючих елементів. Нарізання пазів виконувалося за допомогою кутової шліфувальної машинки, з робочим обладнанням у вигляді твердосплавного диску діаметром 125 мм з суцільною робочою твердоспальною кромкою. Приклад поперечного перерізу пройденого пазу та розміщення в ньому армуючих елементів показано на рисунку 3.



Рис. 3. Приклад армування дослідних зразків: а – алюмінієвою смужкою; б – алюмінієвою трубкою; в – алюмінієвим швелером; г – алюмінієвим двотавром

Для фіксації стержнів всередині пазів використовувалася біла двокомпонентна епоксидна смола «Fluid Art», технічні характеристики якої наведені в таблиці 4. До використання ця смола готувалась відповідно до інструкцій, вказаних виробником: спочатку до смоли додавався затверджувач у пропорції 8 до 1, після чого суміш інтенсивно перемішувалася впродовж 5 хв. Укладання суміші в паз виконувалося в декілька етапів: спочатку порожній паз наповнювався смолою на 1/3 глибини, після чого в нього вводився стержень і покривався смолою до повного заповнення пазу (для розподілу смоли в пазі та прибирання її залишків застосовувався шпатель). По завершенню підготовчих робіт заготовки витримувалися впродовж 40 хв (робочий час епоксидної смоли).

Таблиця 4

Фізико-механічні властивості використовуваної епоксидної смоли Fluid Art

№ з/п	Параметр	Значення		Од. виміру
		мін.	макс.	
1	Модуль пружності	2,5	3	ГПа
2	Міцність на розтяг	30	50	МПа
3	Міцність на стиск	30	50	МПа
4	Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,35	–
5	Температурна стійкість	50	60	°C
6	Коефіцієнт лінійного розширення	70	80	мкм/(м·K)
7	В'язкість	300	800	мПа·с

Після завершення підготовчих операцій заготовки витримувалися впродовж 28 днів. Не дивлячись на те, що висихання смоли і набуття нею початкової міцності відбувається впродовж 1 доби, для набуття її максимальної міцності виробником рекомендується термін зберігання не менше за 28 діб.

Важливою деталлю при роботі з епоксидними сумішами є дотримання оптимальних параметрів мікроклімату, а саме температурного режиму та вологості повітря для забезпечення правильності технологічного процесу та максимально можливої якості кінцевого продукту. Саме тому роботи з підготовки і витримки заготовок до набуття ними максимальної міцності виконувались у літній період року. Під час приготування епоксидної суміші температура повітря знаходилася в заданих межах (18–25 °C), а відносна вологість повітря не перевищувала 70 %. Необхідні температурні та гігromетричні умови підтримувались і під час витримання заготовок. Зокрема, температура повітря підтримувалась у межах від 20 до 25 °C, а відносна вологість повітря не перевищувала 50 %. Параметри середовища вимірювалися за допомогою датчика температури і вологості Mijia Bluetooth Thermometer Hygrometer LYWSD03MMC.

По завершенню терміну в 28 діб було проведено випробування підготованих зразків. Визначення межі міцності зразків на згин проводилось експериментальним шляхом. Для цього до зразка, встановленого на гідропресі, поступово прикладалося навантаження, в ході чого паралельно вимірювалося значення вигину зразка. Вимірювані значення фіксувалися за допомогою аналогових манометра та мікрометра. Оскільки зміна навантаження та деформації є досить динамічними процесами, весь хід дослідження записувався на відео, а показники приладів визначалися шляхом камеральної обробки одержаних відеоматеріалів.

Отримані дані представлені у вигляді графіків залежності вигину зразка від прикладеного навантаження. Межа міцності на згин за таких умов буде відповідати значенню прикладеного навантаження, за якого виникає значна деформація зразка [11]. Першочергово було досліджено неармовані контрольні зразки (рис. 4), для того щоб мати вихідні значення і підґрунтя для порівняння аналогічних значень одержаних при дослідженні вже армованих зразків.

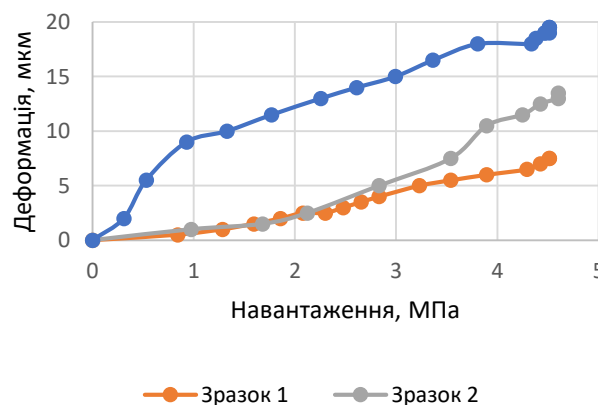


Рис. 4. Результат дослідження міцнісних властивостей неармованих зразків

З одержаного графіка (рис. 4) видно, що неармовані зразки граніту мають типову поведінку напружено-деформованої системи, з початковою лінійною еластичною ділянкою, наступною нелінійною пластичною ділянкою та остаточним руйнуванням.

Лінійна еластична ділянка кривої напружено-деформованої системи відповідає частині кривої, де матеріал діє еластично, що означає, що деформація пропорційна прикладеному навантаженню. Ця ділянка характеризується постійним нахилом (модуль Юнга), який буде відображати жорсткість матеріалу [12, 13].

Після досягнення певної точки (в межах 3,8 МПа) зразки граніту увійшли в нелінійну пластичну ділянку деформації, де матеріал продовжив деформуватися під збільшенням навантаження, але з меншою швидкістю. Це явище відоме як зміцнення при деформації, коли матеріал стає міцнішим та більш стійким до деформації при подальшому навантаженні. На кінцевому етапі неармовані зразки граніту досягли своєї максимальної міцності та зазнали руйнувань у вигляді тріщини, яка переросла у розлом (рис. 5). Міцність зразків граніту за заданих умов може бути визначена аналізом максимального зусилля, досягнутого під час процесу навантаження, яке відповідно до одержаних результатів становить близько 4,5 МПа.

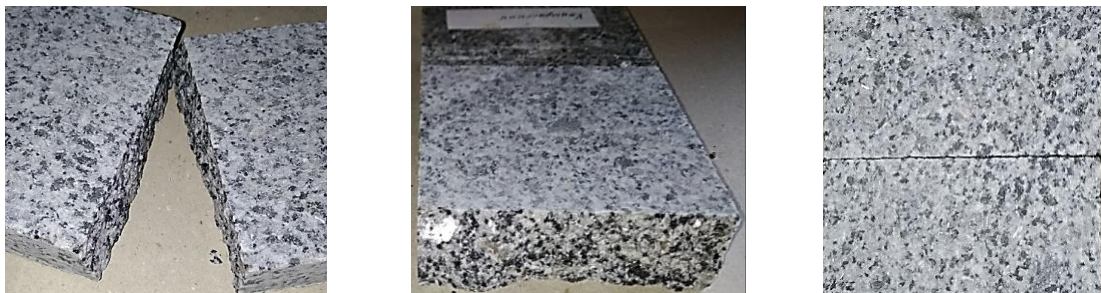


Рис. 5. Приклад зламу неармованих зразків

Результати досліджень армованих зразків опрацьовані та відображені в аналогічний спосіб (рис. 6).

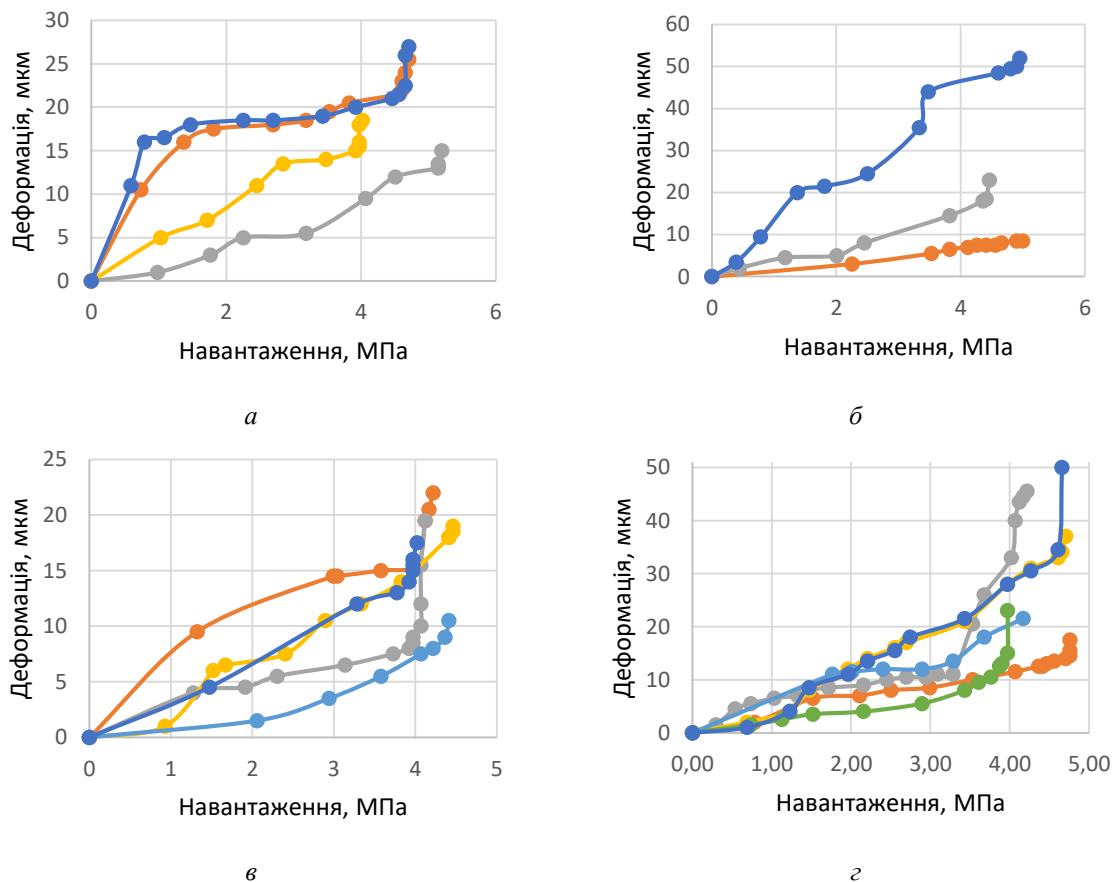


Рис. 6. Результати дослідження міцнісних властивостей армованих зразків: а – армовані алюмінієвою трубкою; б – армовані алюмінієвою пластиною; в – армовані алюмінієвим швелером; г – армовані алюмінієвим двотавром

На рисунку 6, в показано залежність деформації від зусилля навантаження на зразки граніту, що армовані алюмінієвим швелером. Потрібно зауважити, що результати, одержані в ході дослідження цих зразків, майже не відрізняються від неармованих зразків і характеризуються меншою стійкістю до згинаючих навантажень. Отже алюмінієвий швелер не забезпечив додаткового опору та міцності зразка, але змінив порядок протікання деформацій, оскільки такий графік характеризується більш вираженою зоною пластичних деформацій [14]. До недоліків застосування алюмінієвого швелера для армування виробів з каменю можна зарахувати недостатню величину адгезії його поверхні з в'язучою речовиною (рис. 7), через що в двох зразках він був вирваний і зміщений відносно краю канавки його фіксації.

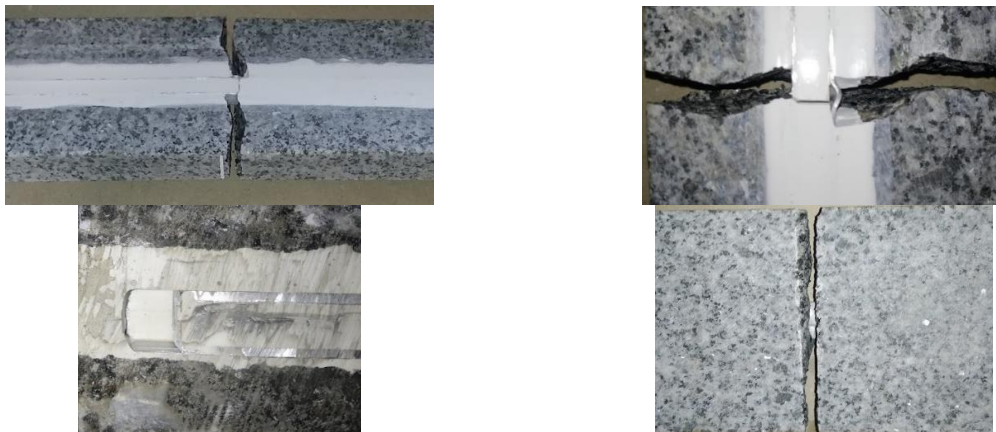


Рис. 7. Приклад зламу зразків армованих алюмінієвим швелером

На рисунку 6, б показано результат дослідження зразків граніту, армованих алюмінієвою пластиною. На цьому графіку простежується підвищення міцності досліджуваних зразків порівняно з алюмінієвим швелером та неармованими зразками. Доцільним буде зазначити, що так само, як і швелер, алюмінієва планка забезпечує недостатню високу адгезійну взаємодію з епоксидною смолою, тому на двох із трьох зразків спостерігалось виривання армуючого осердя з фіксуєючої суміші. Зразок, армування якого не було вирваним, зруйнувався під навантаженням у 4,95 МПа, а величина його деформації становила 0,52 мм (рис. 8). Проте такий результат є недостатнім для підтвердження доцільності запропонованої методики армування.



Рис. 8. Приклад зламу зразків армованих алюмінієвою планкою

Рисунок 6, а, який демонструє результат дослідження зразків, армованих алюмінієвою трубкою, свідчить про збільшення максимального навантаження, яке може витримати зразок, порівняно з неармованими зразками, а також збільшення здатності протистояти руйнуванню при тривалому навантаженні. За графіком можна встановити, що зразки, армовані алюмінієвою трубкою, руйнуються при величині деформації в 25–27 мкм, що несуттєво перевищує попередньо розглянуті зразки, проте зусилля навантаження, за якого відбувається руйнування, досягає у цьому випадку 4,5–5 МПа. Разом з тим на графіку спостерігається значне зростання величини зони пластичної деформації. Також доцільним буде зауважити, що при дослідженні такого типу зразків не спостерігалось виривання армуючого осердя, що вочевидь і є однією з причин забезпечення позитивного результату. Навіть після руйнування заготовки армуюче осердя лишалося всередині в'язучої речовини, а в площині зламу заготовки спостерігалась його деформація (рис. 9).

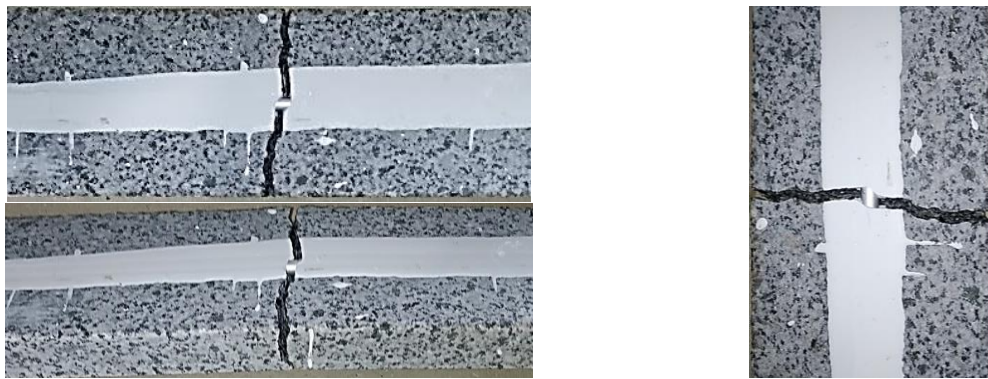


Рис. 9. Приклад зламу зразків, армованих алюмінієвою трубкою

На останньому графіку (рис. 6, з) показано результати дослідження зразків, які були армовані алюмінієвим двотавром. Ці зразки продемонстрували один з найменших приростів міцності, але разом з тим цей тип армування забезпечив поступовий і рівномірний розподіл деформації (рис. 10). Відповідно такий тип армування може бути корисним для зменшення ризику раптового руйнування армованих виробів під час їх роботи під навантаженням, величина якого швидко зростає, але разом з тим він не здатний забезпечити необхідного збільшення міцності.

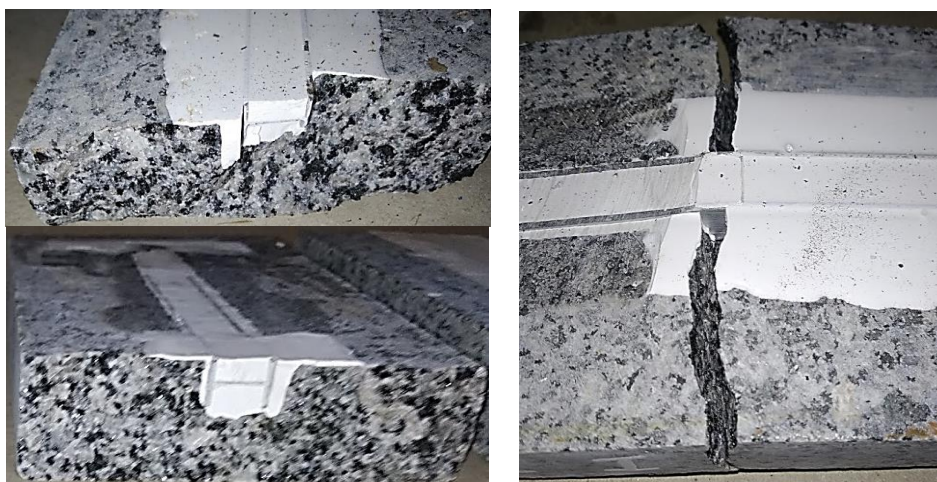


Рис. 10. Приклад зламу зразків, армованих алюмінієвим двотавром

Висновки та перспективи подальших досліджень. Отже, на основі результатів цього дослідження можна зробити висновок, що для збільшення міцності та стійкості виробів з природного каменю (в цьому випадку з граніту) до руйнування ефективним є використання армуючих матеріалів для їх зміцнення. Однак додаткового дослідження потребує питання вибору матеріалів для армування, оскільки їх ефективність буде суттєво залежати від їхніх властивостей і що найголовніше – їхніх розмірів, форми та типу поверхні.

Підбиваючи загальні підсумки, доцільним буде зауважити, що це дослідження підтверджує гіпотезу про доцільність армування виробів з каменю за допомогою різних матеріалів. Використання цієї методики дійсно дозволяє збільшити міцність та деформаційні властивості, що сприяє розширенню напрямів можливого застосування природного каменю як будівельного матеріалу. З метою покращення результатів дослідження та вдосконалення зазначеної методики армування пропонується:

- повторити дослід при використанні зразків, виготовлених з інших, менш міцних типів порід, що дозволить отримати більш різноманітні дані про міцність різних видів порід та доцільність їх армування;
- повторити аналогічні дослідження, але з більшою кількістю зразків, що дозволить отримати більш статистично значущі результати та зменшити можливість випадкових помилок;
- при подальших дослідженнях вивчити та виміряти вплив різних параметрів на міцність зразків, зокрема, таких як швидкість навантаження, температура тощо, оскільки це дозволить отримати більш повну картину про властивості граніту та можливості його армування;
- виконати аналогічні дослідження силових параметрів зразків, але армованих осердями, виготовленими з інших матеріалів, наприклад, сталі або скловолокна.

Список використаної літератури:

1. Бондаренко Ю.В. Використання полімерних армуючих композицій для армування природного каменю / Ю.В. Бондаренко // Вісник Харківського національного університету будівництва та архітектури. – 2017. – № 34. – С. 31–35.
2. Kaminskaya L.P. Increasing the durability of natural stone products by reinforcing with polymer composite materials / L.P. Kaminskaya, V.O. Demchenko, V.M. Rozhko // Journal of Civil Engineering and Management. – 2016. – № 22 (6). – P. 781–788.
3. Research on strengthening effect of basalt fiber reinforced polymer to natural stone / Y.Wang, J.Sun, Y.Liu, X.Liu // Materials Science Forum. – 2015. – № 813. – P. 599–604.
4. Зінченко О.В. Дослідження зносостійкості природного каменю, армованого полімерно-композиційними матеріалами / О.В. Зінченко, С.В. Колесник // Науковий вісник Національного університету будівництва та архітектури. – 2019. – № 14. – С. 65–70.
5. Слива О.О. Застосування полімерно-армованих композитів для зміцнення природного каменю / О.О.Слива, Г.В. Шевченко // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. – 2015. – № 4. – С. 151–155.
6. Федоренко М.І. Армування виробів з природного каменю полімерними матеріалами / М.І. Федоренко, О.О. Горінь, В.І. Черпахін // Вісник Черкаського університету. – 2015. – № 4. – С. 33–39.
7. Макаренко А.В. Застосування полімерно-армованих композитів для зміцнення природного каменю / А.В. Макаренко, В.В. Синявський // Збірник наукових праць ДонНТУ. – 2016. – № 35. – С. 85–91.
8. Литвиненко І.Г. Експериментальне дослідження міцності природного каменю після армування / І.Г. Литвиненко, І.В. Пархоменко // Науковий вісник Національного університету будівництва та архітектури. – 2018. – № 8. – С. 67–73.
9. Яковлева, Л.О. Вплив армування на міцність природного каменю в екстремальних умовах / Л.О. Яковлева, М.В. Ігнатенко, С.В. Ткаченко // Вісник Одеського національного університету. – 2019. – № 24. – С. 47–52.
10. Кравченко С.А. Експериментальне дослідження міцності та деформованості армованого природного каменю / С.А. Кравченко, А.В. Марченко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 2. – С. 123–129.
11. The influence of the reinforcement method on the bending strength of selected natural stones / M.Kuryłowicz, M.Kacprzak, A.Morka, J.Morka // Materials. – 2017. – № 10 (12). – P. 1398.
12. Сырота, В.І. Дослідження впливу армування на міцність природного каменю / В.І. Сырота, М.С. Комісаренко, В.В. Коберник // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2017. – № 31. – С. 61–66.
13. Zhang Y. Experimental study on the flexural behavior of natural stone reinforced with GFRP sheet / Y.Zhang, J.Liu, J.Wu // Materials Science Forum. – 2018. – № 942. – P. 812–816.
14. Жуковський О.Ю. Дослідження механічних властивостей природного каменю, армованого скловолокнистими матеріалами / О.Ю.Жуковський, В.Д. Данілов // Матеріали наукоємних конференцій. – 2018. – № 1. – С. 24–29.

References:

1. Bondarenko, Yu.V. (2017), «Vykorystannia polimernykh armuiuchykh kompozytsii dlia armuvannia pryrodnoho kameniu», *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva ta arkhitektury*, No. 34, pp. 31–35.
2. Kaminskaya, L.P., Demchenko, V.O. and Rozhko, V.M. (2016), «Increasing the durability of natural stone products by reinforcing with polymer composite materials», *Journal of Civil Engineering and Management*, No. 22 (6), pp. 781–788.
3. Wang, Y., Sun, J., Liu, Y. and Liu, X. (2015), «Research on strengthening effect of basalt fiber reinforced polymer to natural stone», *Materials Science Forum*, No. 813, pp. 599–604.
4. Zinchenko, O.V. and Kolesnyk, S.V. (2019), «Doslidzhennia znosostiikosti pryrodnoho kameniu, armovanoho polimerno-kompozytsiinymy materialamy», *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu budivnytstva ta arkhitektury*, No. 14, pp. 65–70.
5. Slyva, O.O. and Shevchenko, H.V. (2015), «Zastosuvannia polimerno-armovanykh kompozytiv dlia zmitsnennia pryrodnoho kameniu», *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli*, No. 4, pp. 151–155.
6. Fedorenko, M.I., Horin, O.O. and Cherepakhin, V.I. (2015), «Armuvannia vyrobiv z pryrodnoho kameniu polimernymy materialamy», *Visnyk Cherkaskoho universytetu*, No. 4, pp. 33–39.
7. Makarenko, A.V. and Syniavskiy, V.V. (2016), «Zastosuvannia polimerno-armovanykh kompozytiv dlia zmitsnennia pryrodnoho kameniu», *Zbirnyk naukovykh prats DonNTU*, No. 35, pp. 85–91.
8. Lytvynenko, I.H. and Parkhomenko, I.V. (2018), «Eksperymentalne doslidzhennia mitsnosti pryrodnoho kameniu pislia armuvannia», *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu budivnytstva ta arkhitektury*, No. 8, pp. 67–73.
9. Yakovlieva, L.O., Ihnatenko, M.V. and Tkachenko, S.V. (2019), «Vplyv armuvannia na mitsnist pryrodnoho kameniu v ekstremalnykh umovakh», *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu*, No. 24, pp. 47–52.
10. Kravchenko, S.A. and Marchenko, A.V. (2018), «Eksperymentalne doslidzhennia mitsnosti ta deformovanosti armovanoho pryrodnoho kameniu», *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, No. 2, pp. 123–129.
11. Kuryłowicz, M., Kacprzak, M., Morka, A. and Morka, J. (2017), «The influence of the reinforcement method on the bending strength of selected natural stones», *Materials*, No. 10 (12), pp. 1398.
12. Сырота, В.І., Комісаренко, М.С. and Коберник, В.В. (2017), «Doslidzhennia vplyvu armuvannia na mitsnist pryrodnoho kameniu», *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu*, No. 31, pp. 61–66.
13. Zhang, Y., Liu, J. and Wu, J. (2018), «Experimental study on the flexural behavior of natural stone reinforced with GFRP sheet», *Materials Science Forum*, No. 942, pp. 812–816.
14. Zhukovskiy, O.Iu. and Danilov, V.D. (2018), «Doslidzhennia mekhanichnykh vlastyvostei pryrodnoho kameniu, armovanoho skvolokonnymy materialamy», *Materialy naukoiemnykh konferentsii*, No. 1, pp. 24–29.

Котенко Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0001-8764-1692>.

Наукові інтереси:

- відкрита розробка родовищ корисних копалин;
- геометризація родовищ корисних копалин.

Піскун Ігор Анатолійович – аспірант, асистент, Державний університет «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-1658-5344>.

Наукові інтереси:

- процеси обробки природного каменю;
- дослідження якісних показників родовищ корисних копалин.

Kotenko V.V., Piskun I.A.

Justification of the use of aluminum profile for reinforcement of natural stone products

The article is dedicated to exploring the feasibility of using aluminum profiles for reinforcing natural stone products. The main objective of this study is to assess the potential use of aluminum profiles as a material for reinforcing natural stone. The article discusses the main advantages of aluminum profiles, such as their lightweight nature, strength, corrosion resistance, and durability. The manufacturing process and properties of aluminum profiles are analyzed, along with the question of the feasibility of their use for reinforcing natural stone products.

Based on experimental research and comparative analysis, it has been determined that aluminum profiles can be effectively used for reinforcing natural stone products. They provide sufficient strength and stability to the products, allowing for a reduction in weight and facilitating the installation process.

The obtained research results indicate the potential prospects of using aluminum profiles for reinforcing natural stone products, but only under certain conditions, which will depend on the size and application method of the product.

Keywords: natural stone; aluminum reinforcement; adhesive interaction; deformation; mechanical properties; flexural strength.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2023.