

© І.А. Піскун¹, М.С. Куницька¹, А.М. Махно¹, О.М. Толкач¹¹Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ СХОДОВИХ ПЛИТ ІЗ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ З УРАХУВАННЯМ ЇХ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

I. Piskun¹ <https://orcid.org/0000-0002-1658-5344>M. Kunytska¹ <https://orcid.org/0000-0002-2649-0939>A. Makhno¹ <https://orcid.org/0000-0002-7428-9578>O. Tolkach¹ <https://orcid.org/0000-0002-8722-6496>¹State University Zhytomyr Polytechnic, Zhytomyr, Ukraine

STUDY OF OPERATIONAL RELIABILITY OF NATURAL STONE STAIR SLABS CONSIDERING THEIR STRESS STATE

Мета. Метою роботи є встановлення експлуатаційних ризиків сходових плит із природного каменю та кількісна оцінка напружено-деформованого стану гранітних проступів за різних схем спирання і положень локального динамічного навантаження.

Методика. Дослідження виконано шляхом узагальнення конструктивних схем застосування кам'яних проступів, аналізу типових дефектів зовнішньої експлуатації та скінченно-елементного моделювання у середовищі Autodesk Inventor. Розрахункова модель мала розміри 1000×300 мм, товщину 30, 40 або 60 мм, матеріал задано як граніт з густиною 2,7 г/см³, модулем Юнга 55 ГПа, коефіцієнтом Пуассона 0,25 та розрахунковою межею міцності на розтяг 5 МПа. Динамічне навантаження прийнято 1660 Н і прикладено до умовної площі контакту стопи 200×100 мм.

Результати. Встановлено, що накладні проступи мають найнижчий рівень силових ризиків, проте є чутливими до зволоження, висолоутворення і корозії суміжних металевих елементів. Для плит, що працюють на згин, визначальним є перше головне напруження. За спирання на два косоури плита товщиною 40 мм має максимальне розтягувальне напруження 2,5 МПа і прогин 0,093 мм, тоді як плита товщиною 30 мм досягає 4,47–4,51 МПа та в окремих випадках перевищує нормативний прогин. При встановленні на один косоур бокове навантаження підвищує напруження до 3,8 МПа, а при товщині 30 мм до критичних 9,3 МПа. Консольно встановлені проступи товщиною 40 мм при навантаженні біля вільного краю розвивають напруження до 3,6 МПа, а при збільшенні товщини до 60 мм забезпечує зниження напруження біля вільного краю до 1,5 МПа.

Наукова новизна. Уперше для гранітних сходових плит встановлено закономірності формування їх напружено-деформованого стану залежно від комплексного впливу товщини, схеми опирання та положення локального динамічного навантаження. Встановлено, що збільшення товщини закономірно знижує рівень максимальних перших головних напружень і деформацій, тоді як зміщення навантаження відносно опор спричиняє їх істотне зростання, особливо за однокосоурної та консольної схем. Виявлено, що найбільш несприятливим є поєднання зменшеної товщини плити з ексцентричним прикладанням навантаження, яке зумовлює концентрацію розтягувальних напружень і підвищує ризик крихкого руйнування.

Практична значимість. Результати можуть бути використані під час попереднього проектування кам'яних сходів у промисловому та цивільному будівництві, вибору товщини проступів, схеми опирання і потреби в армуванні.

Ключові слова: природний камінь, граніт, сходові плити, консоль, косоур, напружено-деформований стан, скінченно-елементне моделювання, перше головне напруження, експлуатаційна надійність.

Вступ. У промисловому та цивільному будівництві природний камінь застосовується не лише як облицювальний, а й як конструктивно значущий матеріал для елементів, що сприймають експлуатаційне навантаження. Сходові плити з граніту, габро, мармуру та ряду інших порід забезпечують високу зносостійкість, архітектурну виразність і тривалий термін експлуатації, проте їхня робота принципово відрізняється від роботи залізобетонних чи металевих елементів. Камінь характеризується значною міцністю на стиск і водночас обмеженою тріщиностійкістю при розтягу та згині, тому локальне навантаження від кроку, ударна дія, недостатня площа спирання, дефекти монтажу або зволоження можуть формувати небезпечні зони концентрації напружень.

Найпростішими з позиції силової роботи є накладні проступи, які укладаються на основу по шару розчину і переважно виконують облицювальну функцію. Їхні типорозміри та геометричні параметри пов'язані з вимогами до сходових маршів і сходових майданчиків [1]. Складнішими є плити, встановлені на одному або двох косоурах, а також консольні проступи, оскільки в цих випадках кам'яний елемент працює як балка або консоль. Для таких елементів, окрім морозостійкості, водопоглинання та стираності, визначальними стають межа міцності при згині, модуль пружності, характер спирання і допустима деформація, що для плит сходів повинна узгоджуватися з вимогами до природнокам'яних виробів [2]. Додатково, задля врахування динамічної дії від руху людини та інших можливих навантажень, їх слід приймати з урахуванням коефіцієнтів динамічності [3].

Аналіз попередніх досліджень. Проблематика довговічності природного каменю у будівлях охоплює дві взаємопов'язані групи чинників: фізико-хімічну деградацію матеріалу та механічну роботу елемента під навантаженням. У працях, присвячених сольовому руйнуванню пористих будівельних матеріалів, показано, що висоли є не лише естетичним дефектом, а й індикатором вологомасопереносу, здатного призводити до підповерхневої кристалізації солей і розвитку локальних руйнівних тисків [4].

Механізм кристалізаційного руйнування детально розглянуто М. Schiro, Е. Ruiz-Agudo та С. Rodriguez-Navarro (2012), які довели, що ріст кристалів у порах створює напруження, достатні для пошкодження мінерального скелета матеріалу [5]. Подібний підхід розвинуто R. Flatt та співавторами (2014), де сольове пошкодження каменю інтерпретовано як хіміко-механічний процес, що залежить від вологості, перенасичення розчину, геометрії порового простору та міцності стінок пор [6]. Для сходових плит це важливо, оскільки за умов зовнішньої експлуатації, водонасичення монтажних розчинів і відсутність капельників створюють умови для повторюваного зволоження та висихання.

Експлуатаційна поведінка плит із природного каменю у фасадних системах, досліджена Н. Sousa та R. Sousa (2019), підтверджує, що навіть порівняно тонкі кам'яні елементи потребують перевірки не лише за матеріальною міцністю, а й за фактичною схемою закріплення та дією експлуатаційних навантажень [7]. Для сходів ця теза є ще більш критичною, оскільки навантаження має локальний і циклічний характер, а контактна зона впливу зазвичай істотно менша за площу плити.

Окремий блок сучасних досліджень стосується кам'яних консольних сходів. В. Rigó та К. Bagi (2018) за допомогою дискретно-елементного аналізу показали, що умови закріплення кожного проступу суттєво впливають на внутрішні зусилля і можуть змінювати реальну роботу сходового маршу порівняно з класичними ручними розрахунками [8]. У дослідженні А. М. D'Altri та співавторів (2024) виконано натурне деформаційне моніторингове обстеження та числове моделювання кам'яних консольних сходів, за результатами якого встановлено, що коректне відтворення контакту, просторової взаємодії проступів і граничних умов є вирішальним для оцінки запасу безпеки [9].

Проблему підсилення кам'яних плит при згині розглянуто Z.-X. Guo та співавторами (2017), в роботі експериментально показано, що армований розчин, з'єднаний з нижньою поверхнею плити, переводить роботу елемента з крихкого характеру руйнування у більш пластичний режим і підвищує несучу здатність [10]. Для сходових плит із природного каменю це підтверджує доцільність розгляду не лише збільшення товщини, а й конструктивного армування або композитного підсилення.

Загальною методичною основою для оцінки напружено-деформованого стану у таких задачах є метод скінченних елементів, який дозволяє врахувати просторову геометрію плити, локальність навантаження, різні варіанти спирання і концентрацію напружень у зонах закріплення [11]. Водночас у доступній літературі недостатньо систематизовано результати саме для типових сходових плит розмірами, близькими до будівельної практики, з порівнянням двох косоурів, одного косоура, контурного спирання і консольного варіанта.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Невирішеною залишається прикладна задача вибору раціональної товщини та схеми опирання природно-кам'яної сходової плити з урахуванням її крихкої роботи на розтяг, локального характеру навантаження і можливих експлуатаційних дефектів. Метою статті є дослідження проблем експлуатації кам'яних сходових плит та моделювання напружень, що виникають у них під час експлуатації за різних конструктивних схем. Для досягнення мети передбачено: класифікувати основні типи кам'яних проступів за умовами роботи; оцінити типові експлуатаційні дефекти; сформулювати скінченно-елементну модель гранітної плити; порівняти максимальні перші головні напруження і прогини за різних схем спирання.

Основна частина (Результати). За умовами роботи доцільно розрізняти три групи сходових плит з природного каменю за умовами їх встановлення (рис. 1): накладні проступи, проступи на косоурах або тятивах і консольні проступи [12]. Накладні плити працюють переважно як облицювання, оскільки сприйняте навантаження майже повністю передається на основу через суцільний шар розчину. Їхній головний недолік пов'язаний з водопроникненням, висолоутворенням та руйнуванням контактного шару. Плити на косоурах або тятивах працюють на згин, при одному косоурі суттєво зростає ексцентриситет навантаження і ймовірність появи напружень розтягу у віддаленій від опори зоні. Консольні плити є найбільш складними у розрахунку, оскільки весь згинальний момент сприймається у зоні защемлення.

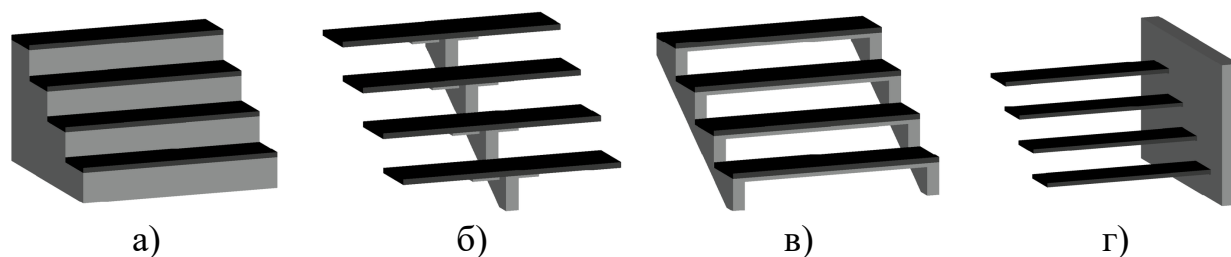


Рис. 1. Основні конструктивні схеми роботи сходових плит із природного каменю: а – накладний проступ; б – проступ на одному косоурі; в – проступ на двох косоурах; г – консольно встановлений проступ

Розрахункова модель сформована у вигляді прямокутної гранітної плити розмірами 1000×300 мм (рис. 2). Товщина змінювалася залежно від варіанта: 30, 40 і 60 мм. Локальне навантаження прикладалося до площі 200×100 мм, що імітує контакт стопи з проступом [13]. Для статичного навантаження від маси людини 85 кг сила становить приблизно 834 Н, а з урахуванням динамічного коефіцієнта прийнято 1660 Н. Сила тяжіння врахована окремо для відображення власної ваги плити. Для крихкого матеріалу критерієм оцінки прийнято не еквівалентне напруження за Мізесом, а перше головне напруження (ПГНС), яке характеризує максимальний розтяг і безпосередньо пов'язане з ініціюванням тріщини [14-19].

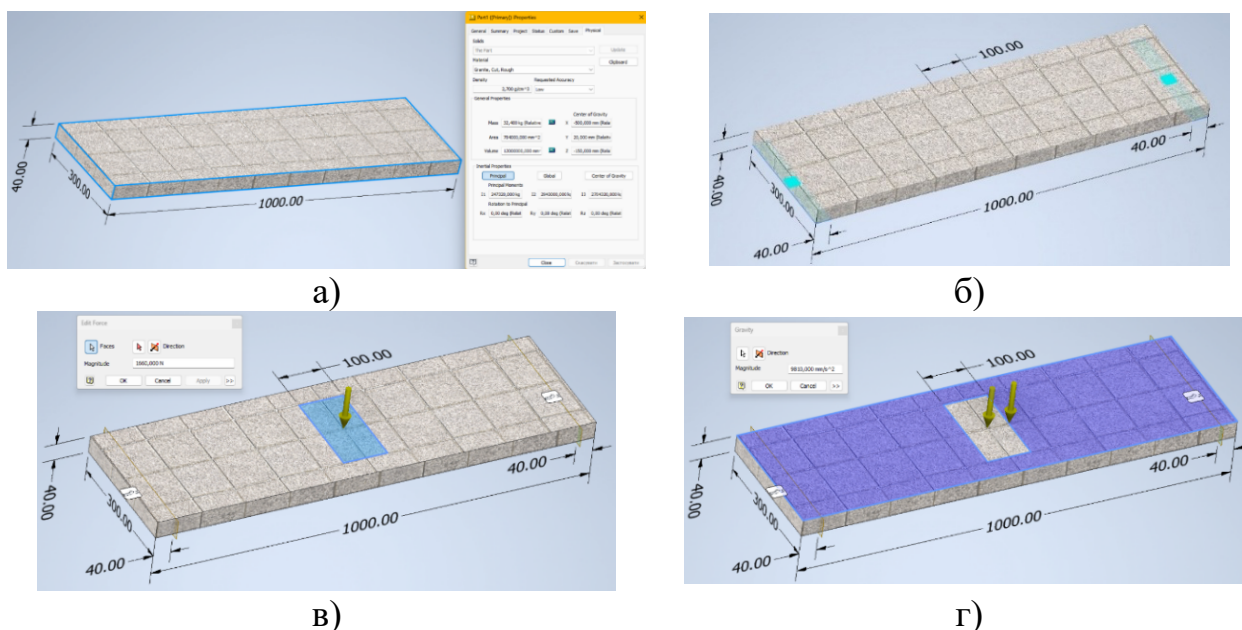


Рис.2. Побудова розрахункової моделі в середовищі Autodesk Inventor: а – геометрія і матеріал плити; б – приклад задання граничних умов; в – приклад задавання локального силового навантаження; г – приклад врахування власної ваги виробу

Параметри граніту, використані при моделюванні, наведено в таблиці 1. Вони відповідають узагальненим характеристикам щільного природного каменю, що застосовується для виготовлення будівельних плит і сходових проступів.

Таблиця 1

Фізико-механічні параметри граніту, прийняті для моделювання

№ з/п	Параметр	Значення	Одиниця виміру
1	Густина	2,7	г/см ³
2	Межа міцності на стиск	170	МПа
3	Межа міцності на розтяг	5	МПа
4	Модуль Юнга	55	ГПа
5	Коефіцієнт Пуассона	0,25	-
6	Модуль зсуву	22	ГПа

Для перевірки впливу конструктивної схеми виконано серію моделювань у середовищі Inventor (табл. 2). Основним результатом прийнято максимальне значення ПГНС $\sigma_{1,max}$, оскільки саме воно характеризує небезпечний розтяг у крихкому кам'яному матеріалі. Другим показником, що враховувався є максимальний прогин, що характеризує жорсткість елемента і надійність експлуатації.

Таблиця 2

Результати моделювання напружено-деформованого стану сходових плит

№	Схема роботи плити	Товщина, мм	Положення навантаження	$\sigma_{1,max}$, МПа	Прогин, мм
1	Два косоури	40	центр	2,50	0,093
2	Два косоури	30	центр	4,47	0,204
3	Два косоури	30	біля опори	2,92	0,044
4	Два косоури	30	1/3 довжини від краю	4,51	0,108
5	Контурна опорна рама	30	центр	0,72	0,003
6	Один косоур	40	центр	2,50	0,090
7	Один косоур	40	збоку	3,80	0,090
8	Один косоур	30	збоку	9,30	0,270
9	Консоль	40	центр	0,20	0,010
10	Консоль	40	біля вільного краю	3,60	0,100
11	Консоль	60	центр	0,12	≈0,000
12	Консоль	60	біля вільного краю	1,50	≈0,000

Результати таблиці 2 свідчать, що збільшення товщини плити з 30 до 40 мм істотно знижує ризик розвитку небезпечних напружень розтягу. Для випадку встановлення плити товщиною 40 мм на двох косоурах (рис. 3), вона працює у прийнятному режимі, $\sigma_{1,max}$ становить 2,50 МПа, тобто нижче прийнятої розрахункової межі міцності на розтяг. При товщині 30 мм напруження збільшується майже до граничного рівня, а значення деформації 0,204 мм перевищує допустиму межу.

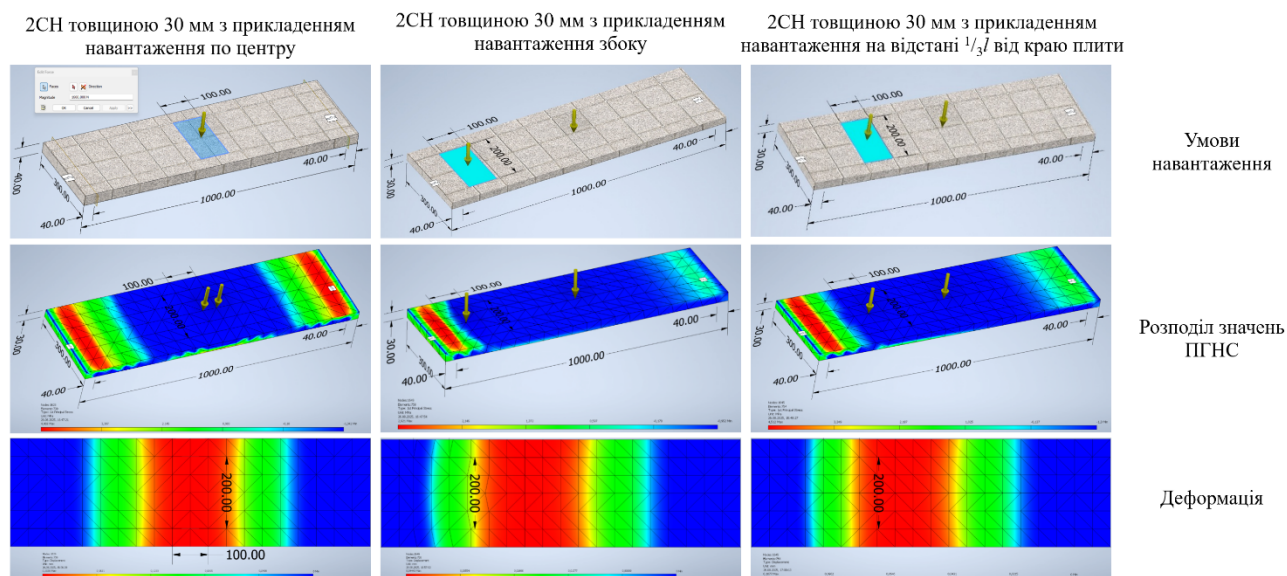


Рис. 3. Результат моделювання напружень, що виникають у плиті товщиною 30 мм, спертій на два косоури

Найменше напруження у сходовій плиті отримано при контурному спиранні на опорну раму (рис. 4). У цьому випадку $\sigma_{1,max}$ становить лише 0,72 МПа, а прогин 0,003 мм. Проте таке рішення погіршує архітектурну легкість сходів, збільшує масу металевої рами і за відсутності належного водовідведення може сприяти корозії підтримувальних елементів.

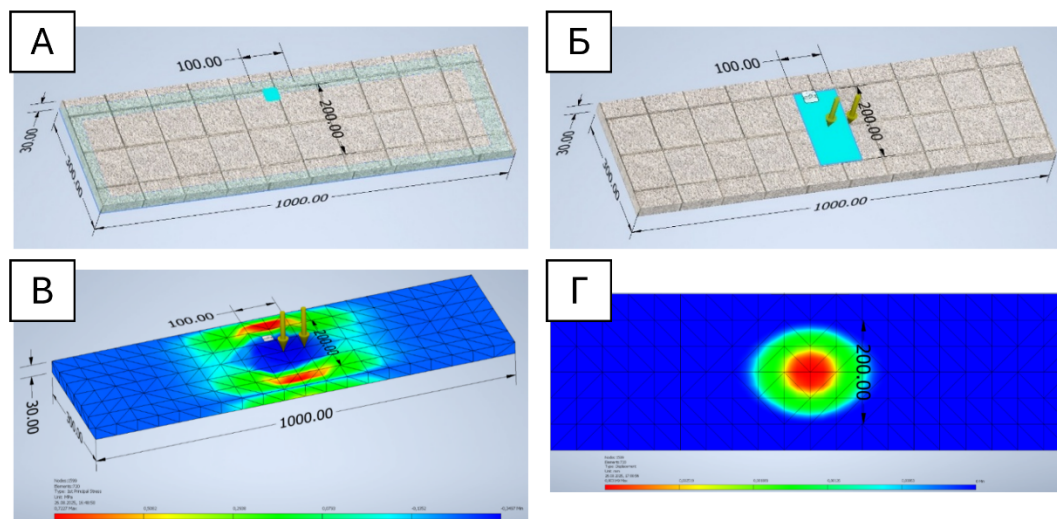


Рис.4. Приклад задавання граничних умов (а) і навантажень (б) при моделюванні сходової плити товщиною 30 мм встановленої на опорний каркас та результати моделювання у вигляді розподілу значення ПГНС (в) та деформації (г)

Схема з одним косоуром (рис. 5) є чутливою до ексцентричного навантаження. Якщо навантаження прикладене по центру проступу, плита товщиною 40 мм працює подібно до варіанта з двома опорами. Коли навантаження зміщується до краю, одна частина плити фактично працює як консоль, через що $\sigma_{1,max}$ зростає

до 3,8 МПа. Для плити 30 мм цей варіант стає неприйнятним, оскільки напруження розтягу 9,3 МПа перевищує прийняту розрахункову міцність і супроводжується деформацією 0,27 мм.

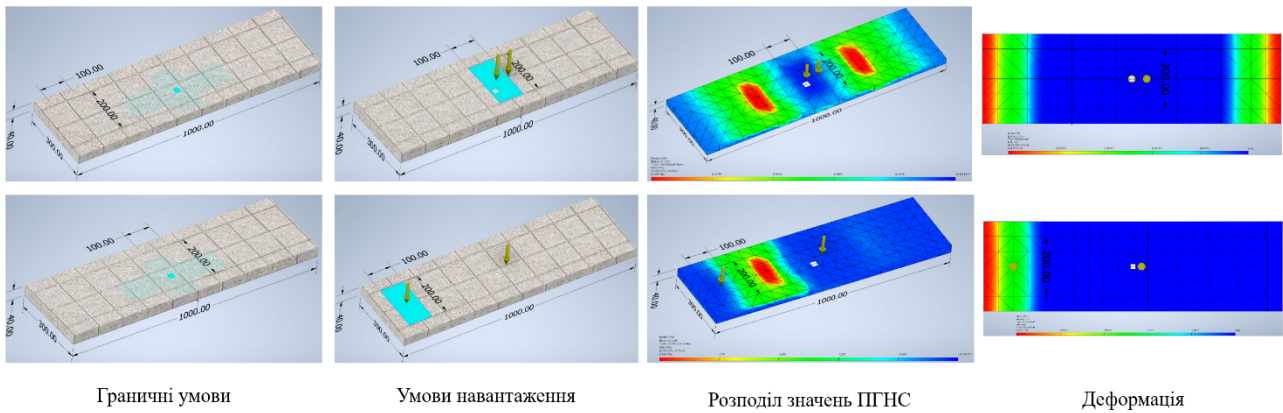


Рис. 5. Результат моделювання напружень, що виникають у плиті товщиною 40 мм спертій на один косоур

Консольно закріплена плита товщиною 40 мм (рис. 6) при навантаженні по центру має дуже низьке напруження, але при зміщенні сили до вільного краю напруження зростає до 3,6 МПа. Плита товщиною 60 мм забезпечує суттєво кращий запас міцності і навіть при навантаженні біля вільного торця $\sigma_{1,max}$ становить 1,5 МПа, а прогин є практично незначним. Отже, для консольних сходів застосування 40 мм слід вважати мінімально допустимим лише за наявності додаткового інженерного обґрунтування, тоді як 60 мм є значно надійнішим рішенням [20].

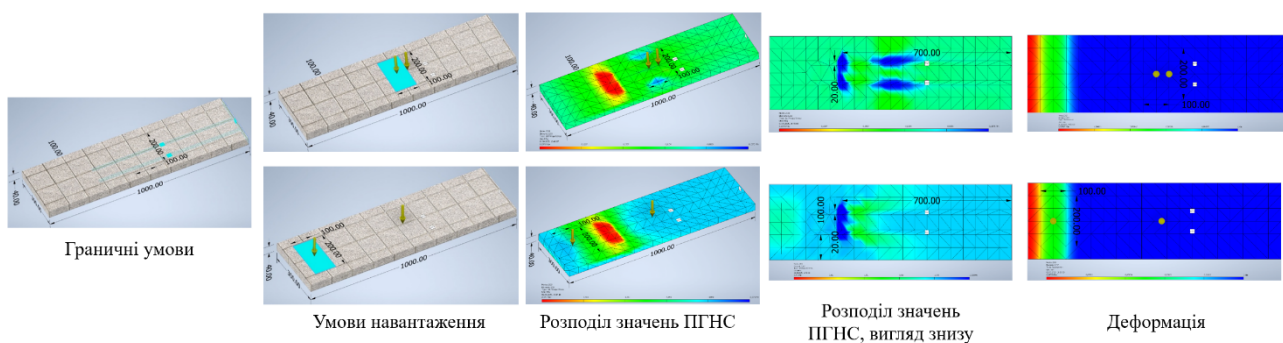


Рис.6. Результат моделювання напружень, що виникають у плиті товщиною 40 мм закріпленій консольно

Узагальнення результатів дозволяє сформулювати прикладні рекомендації. Плити товщиною 30 мм доцільно застосовувати лише як накладні облицювальні елементи або за умови суцільного чи контурного спирання. Для самонесучих проступів на косоурах раціонально приймати товщину не менше 40 мм, але при одному косоурі необхідно перевіряти ексцентричне навантаження біля краю [21]. Для консольних плит критичною є зона затискання, тому без армування або спеціальних закладних деталей доцільно орієнтуватися на товщину 60 мм. В усіх

зовнішніх сходових конструкціях потрібно передбачати капельники, нахил або скоси для відведення води, а також захист металевих елементів від корозії, оскільки силова надійність плити не компенсує дефектів водовідведення та довговічності вузлів [22].

Висновки. Проведене дослідження показало, що експлуатаційна надійність сходових плит із природного каменю визначається не лише міцністю матеріалу, а насамперед схемою спирання, товщиною виробу, положенням локального навантаження та станом вузлів водовідведення. Накладні проступи є найбільш стабільними з погляду силової роботи, однак в умовах зовнішнього застосування вони потребують контролю вологонакопичення, якості фіксуєчого шару, наявності капельників і захисту металевих елементів від корозії.

Для плит, що працюють на згин, перше головне напруження є найбільш інформативним критерієм оцінки, оскільки природний камінь руйнується переважно внаслідок розкриття тріщин при розтягу. Плита товщиною 40 мм на двох косоурах має достатній запас міцності за центрального навантаження, проте зменшення товщини до 30 мм різко погіршує роботу елемента.

Найменш надійним є варіанти з одним косоуром. За товщини сходової плити 30 мм модель показала критичний рівень розтягувальних напружень, що свідчить про недопустимість такого рішення без підсилення. Консольне закріплення потребує збільшеної товщини або армування.

Практичний висновок полягає у тому, що для кам'яних сходових плит у будівлях доцільно передбачати обов'язкову числову перевірку за першими головними напруженнями, уникати використання плит товщиною 30 мм як само-несучих елементів, забезпечувати достатню площу спирання, а для консольних або естетично полегшених схем застосовувати товщину не менше 60 мм або конструктивне армування сталевими чи композитними елементами.

Перелік посилань

1. ДСТУ Б В.2.6-62:2008. (2008). *Конструкції будинків і споруд. Марші та сходові площадки залізобетонні. Технічні умови*. Київ: ДП «НДІБК».
2. ДСТУ Б EN 12058:2007. (2007). *Вироби з природного каменю. Плити для підлоги та сходів. Вимоги (EN 12058:2004, IDT)*. Київ: Мінрегіонбуд України.
3. ДБН В.1.2-2:2006. (2006). *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування*. Київ: Мінбуд України.
4. Granneman, S. J. C., Lubelli, B., & van Hees, R. P. J. (2019). Mitigating salt damage in building materials by the use of crystallization modifiers: A review and outlook. *Journal of Cultural Heritage*, 40, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.05.004>
5. Schiro, M., Ruiz-Agudo, E., & Rodriguez-Navarro, C. (2012). Damage mechanisms of porous materials due to in-pore salt crystallization. *Physical Review Letters*, 109(26), 265503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.265503>
6. Flatt, R. J., Caruso, F., Sanchez, A. M. A., & Scherer, G. W. (2014). Chemo-mechanics of salt damage in stone. *Nature Communications*, 5, 4823. <https://doi.org/10.1038/ncomms5823>
7. Sousa, H., & Sousa, R. (2019). Durability of stone cladding in buildings: A case study of marble slabs affected by bowing. *Buildings*, 9(11), 229. <https://doi.org/10.3390/buildings9110229>
8. Rigó, B., & Bagi, K. (2018). Discrete element analysis of stone cantilever stairs. *Meccanica*, 53, 1571–1589. <https://doi.org/10.1007/s11012-017-0739-5>

9. D’Altri, A. M., Jin, Y., Chen, J., Agyarko, T., Nordenson, G., & Glisic, B. (2024). Structural behavior of stone cantilever stairs: Strain monitoring under controlled loading and numerical modeling. *Journal of Building Engineering*, 95, 110238. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110238>
10. Guo, Z.-X., Wang, L., Chai, Z.-L., Ye, Y., & Shahrooz, B. M. (2017). Flexural behavior of stone slabs strengthened with reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 144, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.177>
11. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). The finite element method: Its basis and fundamentals. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 62(5), 699–706. <https://doi.org/10.1002/nme.1225>
12. Практичні аспекти облаштування консольних сходів. Ukrkovka. Консольні сходи. <https://ukrkovka.com.ua/kovani-vyroby/metalevi-skhody/konsolni-skhody/>
13. Rojas-Sola, J. I., & Sánchez-García, S. (2025). Mechanical Study of a Single-Cylinder High-Pressure Steam Engine with a Corliss Valve Gear Using Finite Element Method. *Applied Sciences*, 15(9), 4782. <https://doi.org/10.3390/app15094782>
14. Lahamornchaiyakul, W. (2023). FEA-Based Simulation of a Small Water Turbine for Waterfall. *Science & Technology Asia*, 28(1), 152–168. <https://doi.org/10.14456/scitechasia.2023.13>
15. Alegre, A., Oliveira, S., Proença, J., Mendes, P., & Carvalho, E. (2025). A Finite Element Formulation for True Coupled Modal Analysis and Nonlinear Seismic Modeling of Dam–Reservoir–Foundation Systems: Application to an Arch Dam and Validation. *Infrastructures*, 10(8), 193. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10080193>
16. Babuska, I., & Strouboulis T., (2001). The finite element method and its reliability. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(25–26), 3249–3263. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00237-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00237-4)
17. Shewchuk, J. R. (2002). What is a good linear finite element? Interpolation, conditioning, and quality measures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002, 190(9–10), 1337–1369. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00275-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00275-1)
18. Frey, P. J., & George, P.-L. (2008). *Mesh Generation: Application to Finite Elements*. <https://doi.org/10.1002/9780470611166>
19. Піскун, І. А., Котенко, В. В., Махно, А. М., Ігнатюк, Р. М., & Меринов, Р. Р. (2025). Оптимізація структурно-механічних властивостей кам’яних виробів методом внутрішнього армування. *Мінеральні Ресурси України*, (1), 76–81. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.76-81>
20. Котенко, В.В., Піскун, І.А., Байда, Д.М., Скорик, М.А., & Гнітецький, О.М. (2023). Огляд перспектив застосування смуг виготовлених за технологією FIBERGLASS для армування архітектурно-декоративних виробів з природного каменю. *Науковий вісник ДонНТУ*, 2(11). 98–108. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-98-108>
21. Котенко, В.В., Піскун, І.А., Остафійчук, Н.М., Куницька, М.С., & Сидоренко, А.А. (2023). Обґрунтування параметрів армування виробів з природного каменю сталевими та композитними осердями. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1(52). 56–67. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-1-56-66>
22. Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of rock mechanics* (4th ed.). Wiley-Blackwell.

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the study is to identify operational risks of natural stone stair tread slabs and to quantify the stress-strain state of granite treads under different support schemes and positions of local dynamic loading.

The methods. The research was performed by systematizing the structural schemes of stone treads, analysing typical defects of outdoor operation and conducting finite element modelling in Autodesk Inventor. The computational model had dimensions of 1000×300 mm and thicknesses of 30, 40 or 60 mm.

The material was specified as granite with a density of 2.7 g/cm³, Young's modulus of 55 GPa, Poisson's ratio of 0.25 and a design tensile strength of 5 MPa. The dynamic load was taken as 1660 N and applied to a conventional foot contact area of 200×100 mm.

Findings. It is shown that overlay treads have the lowest structural risk, although they remain sensitive to wetting, efflorescence and corrosion of adjacent metal elements. For slabs operating in bending, the governing parameter is the first principal tensile stress. With support on two stringers, a 40 mm slab reaches a maximum tensile stress of 2.5 MPa and a deflection of 0.093 mm, whereas a 30 mm slab reaches 4.47–4.51 MPa and may exceed the deflection limit in several loading positions. For a single stringer, eccentric loading increases stresses up to 3.8 MPa; at a thickness of 30 mm the stress rises to a critical level of 9.3 MPa. A 60 mm cantilever reduces the stress near the free edge to 1.5 MPa.

The originality. For the first time, the regularities governing the formation of the stress–strain state of granite stair slabs have been established with regard to the combined effects of slab thickness, support configuration, and the position of local dynamic loading. It was found that increasing the slab thickness systematically reduces the maximum first principal stresses and deformations, whereas displacement of the load relative to the supports causes a substantial increase in these parameters, particularly in single-stringer and cantilever configurations. The most unfavorable condition was found to be the combination of reduced slab thickness and eccentric loading, which causes tensile stress concentration and increases the risk of brittle failure.

Practical implementation. The results can be used for preliminary design of natural stone stairs in industrial and civil engineering, including the selection of tread thickness, support configuration and the need for reinforcement.

Keywords: *natural stone, granite, stair slab, cantilever, stringer, stress-strain state, finite element modeling, first principal stress, operational reliability.*

дата першого надходження статті до видання	10.04.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	20.05.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.06.2026