

ТЕХНІКО-ІНЖЕНЕРНИЙ ГАМБІТ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ БЛОКІВ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ

О. Kuznetsov¹, <https://orcid.org/0009-0002-1004-195X>

D. Bilobrov¹ <https://orcid.org/0009-0005-4490-2983>

¹ Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

TECHNICAL AND ENGINEERING GAMBIT IN TRANSPORTING NATURAL STONE BLOCKS

Метою дослідження є розробка та наукове обґрунтування комплексної системи інженерних рішень для безпечної, ефективної та економічно вигідної контейнеризації надважких монолітних блоків природного каменю масою 25–27,5 т у 20-футових ISO-контейнерах (TEU) з урахуванням динамічних навантажень, оновлених регуляторних вимог 2026 року та специфіки мультимодальних перевезень.

Методика включає теоретичний аналіз міжнародних стандартів (ISO 668, ISO 1496-1, CSC, STU Code, SOLAS VGM, IMO CSS Code), порівняльний аналіз конструктивних особливостей TEU та FEU, розробку верифікованих схем дерев'яного розкріплення, оцінку осьових навантажень за нормами Weight-in-Motion (WIM) в Україні та ЄС, а також узагальнення реальної практики експорту блоків у 2025–2026 рр.

Результати показали, що 20-футовий контейнер Heavy Tested є найбільш оптимальним для монолітів масою до 27,5 т завдяки меншому плечу вигину рами та раціональному розподілу напружень порівняно з 40-футовим. Запропоновані схеми кріплення (лаги $\geq 100 \times 100$ мм, розпірки в нижній зоні, протиковзні мати) забезпечують ефективне стримування інерційних сил при мультимодальних перевезеннях, гарантуючи повну відповідність нормам STU Code, CSC та вимогам WIM 2026 щодо контролю осьових навантажень.

Наукова новизна. Розроблено адаптовану модель дерев'яного розкріплення та лашингу для закритих 20-футових ISO-контейнерів з монолітами природного каменю >25 т, що враховує мультимодальні навантаження, вимоги WIM 2026 та особливості TEU, а також встановлено залежності моменту згину від довжини контейнера (з підтвердженням оптимальності TEU для зменшення напружень на 50–100 % порівняно з FEU) та сили тертя від коефіцієнту тертя, верифіковані за допомогою графічних залежностей і аналітичних розрахунків.

Практична значимість. Верифіковані схеми дозволяють знизити собівартість експорту на 10–25 %, зменшити перевантаження, штрафи WIM, страхові випадки та кількість перевантажень; підвищити безпеку, передбачуваність та конкурентоспроможність українських поставальників граніту й лабрадориту на ринках ЄС, Близького Сходу та Азії; забезпечити надійну інтеграцію в глобальні контейнерні ланцюжки.

Ключові слова: контейнеризація, надважкі блоки, природний камінь, дерев'яне розкріплення, мультимодальні перевезення.

Вступ. У сучасних умовах глобальний ринок природного каменю демонструє стійке зростання: обсяг оцінюється в 37–46 млрд USD у 2025 році з

прогнозом до 49–65 млрд USD до 2031–2033 років при середньорічному темпі зростання 4,3–5,8 %. Граніт займає близько 31 % ринку, а попит на мармур, лабрадорит та інші декоративні породи зростає завдяки розширенню будівництва в Азії, Близькому Сході, Європі та Північній Америці. Україна, як ключовий постачальник граніту та лабрадориту до ЄС та інших ринків, тісно інтегрована в цей ланцюжок, де сировина у вигляді великих блоків становить основу експорту.

Водночас транспортування блоків масою 25–30 т і вище залишається вузьким місцем галузі. Логістичні витрати сягають 15–30 % кінцевої вартості матеріалу. Глобальні виклики 2025–2026 років – волатильність фрахту, контейнерний дефіцит, зростання цін на паливо, геополітичні ризики, жорсткіші норми осей (Weight-in-Motion), вимоги SOLAS (VGM), STU Code та Heavy Lift Surcharge – роблять традиційні методи (низькорамні трали) дедалі менш ефективними для середніх і великих експортних партій.

Саме тому контейнеризація надважких монолітів у 20-футових ISO-контейнерах (TEU) набула стратегічного значення: вона інтегрує «незручний» вантаж у глобальну мережу регулярних перевезень, знижує кількість перевантажень, підвищує безпеку та передбачуваність, але вимагає прецизійного інженерного підходу до кріплення, розподілу навантажень і дотримання нормативів.

Наукові дослідження цієї теми необхідні саме зараз, оскільки контейнеризація надважких блоків – це динамічний компроміс на межі міцності конструкції TEU, дорожніх обмежень (44 т загальної маси в Україні), морських правил штабелювання та фізики інерції. Помилки призводять до аварій, санкцій і репутаційних втрат. Посилення екологічних та регуляторних вимог (Euro-6/7, зниження CO₂) робить оптимізацію транспортування економічним і екзистенційним завданням для експортерів. Відсутність систематизованих інженерних моделей і верифікованих схем кріплення для блоків 27 т у TEU створює прогалину між стандартами (CSC, STU Code) та реальною практикою, що підвищує ризики та страхові премії.

Результати досліджень можуть дати практиці верифіковані схеми кріплення, які мінімізують пошкодження та відповідають нормам 2026 року; зниження логістичних втрат і собівартості експорту на 10–25 % за рахунок зменшення перевантажень, штрафів і страхових випадків; підвищення конкурентоспроможності українських постачальників на ринках ЄС, Близького Сходу та Азії завдяки надійній інтеграції в контейнерні ланцюжки; зменшення екологічного сліду транспортування; науково обґрунтовану базу для оновлення галузевих стандартів і навчання фахівців.

Тому дослідження, присвячені техніко-інженерним аспектам транспортування надважких блоків природного каменю в 20-футових ISO-контейнерах, є актуальними, оскільки дозволяють перетворити одну з найбільш ризикованих і витратних ланок ланцюжка постачання на керований, ефективний і безпечний процес, що безпосередньо впливає на економічну стійкість галузі в умовах глобальної волатильності 2026 року.

Аналіз літератури. Сучасні дослідження контейнерної логістики акцентують увагу на безпеці та ефективності перевезення важких та негабаритних

вантажів. Наприклад, Mu [1] аналізує безпеку розміщення та кріплення негабаритних вантажів на flat-rack контейнерах, зосереджуючись на розрахунку максимального навантаження кріплення (MSL), використанні лашингових строп, тропів та ланцюгів з урахуванням розривного зусилля (BS) і коефіцієнта безпеки. Запропоновані методи запобігають зсуву під дією морських сил, але вони не адаптовані до закритих TEU-контейнерів для монолітних блоків природного каменю, обмежуючись платформами flat-rack. Невирішеним залишається інтеграція таких розрахунків для блоків масою до 27 т у стандартних 20-футових контейнерах, де концентроване навантаження може деформувати підлогу. Причина – суб’єктивна (фокус на негабаритних вантажах без специфіки щільних матеріалів) та об’єктивна (брак емпіричних даних для нішевих вантажів в країнах, що розвиваються).

Аналогічні обмеження простежуються в працях Burnson P. [2] щодо кріплення контейнерів, де описано лашингові тяги, талрепи та твістлоки для протидії силам скручування та стиснення. Рекомендації охоплюють сили під час бортової та кільової хитавиці, але не деталізують схеми для блоків 27 т, зосереджуючись на загальних стеках контейнерів. Невирішеним є моделювання короткобазових TEU-контейнерів з перевищенням осьових навантажень (понад 24 т). Об’єктивна причина – стандартизація під типові вантажі; суб’єктивна – відсутність кейсів саме для каменярської галузі.

Вчені Sulym A. та ін. [3] досліджували міцнісні випробування танк-контейнерів на ударні навантаження, пропонуючи комп’ютерне моделювання для верифікації відповідності нормам UN/ІМО, що актуально для монолітів каменю через подібні динамічні ефекти. В працях [4] проаналізовано структурну міцність ISO-контейнерів за допомогою скінченно-елементного моделювання (FEM), оцінено напруження під гравітаційними та бічними навантаженнями, і запропоновано рекомендації для перевикористання контейнерів у будівництві, але з акцентом на важкі вантажі. Вчені Fomin O. та ін. [5] вивчали динамічні навантаження на танк-контейнери під час морського перевезення, розробляючи математичні моделі для оцінки безпеки, що можна адаптувати до блоків каменю. В публікації [6] оцінено різні конструкції рам ISO-танк-контейнерів на міцність, показуючи вплив дизайну на стійкість до навантажень, з рекомендаціями для 40-футових варіантів. Вчений Ling [7] наводить технічні характеристики ISO-контейнерів, включаючи матеріали та випробування на витривалість, що корисно для розрахунків для важких вантажів.

У рекомендаціях [8] наведено вказівки щодо розміщення та кріплення, включаючи клітинні напрямні та лашингові мости для компенсації вітрових та динамічних навантажень. Проте не конкретизовано схеми дерев’яного розкріплення (wood bracing) для блоків 27 т. Невирішеним залишається оптимізація під регуляції 2026 року (зокрема Heavy Lift Surcharge). Об’єктивна причина – загальний характер рекомендацій без інженерних схем, специфічних для каменю.

Кодекс практики пакування вантажних транспортних одиниць (CTU Code, UNECE) [9, 10] детально описує блокування, розпірки та лашування для важких вантажів, з рекомендаціями щодо розподілу навантаження та використання

протиковзних матів. Однак приклади обмежуються загальними вантажами. Невирішеним є верифікація схем саме для блоків природного каменю в TEU-контейнерах. Причина – комерційна спрямованість без глибоких розрахунків для щільних матеріалів.

Практичні гайди від [11, 12] щодо пакування кам'яних плит і блоків наголошують на забороні одиночних блоків понад 20 т у закритих контейнерах (хоча деякі лінії допускають вищі маси), рекомендують поздовжні дерев'яні лаги, клинове закріплення з усіх боків, поперечні розпірки та петльове лашування ланцюгами для розподілу ваги та витримування транспортних навантажень (хитання, гальмування, підйом). Ці рекомендації підкреслюють критичну важливість розподілу ваги по підлозі та опору бічним/торцевим стінкам, але не пропонують систематизованого інженерного моделювання та верифікації для блоків 25–27,5 т під комбінованими мультимодальними навантаженнями.

Систематизуючи виявлені локальні прогалини:

- відсутність адаптації методів кріплення негабаритних вантажів до закритих TEU для монолітів;
- недостатнє моделювання сил стиснення та динамічних навантажень у короткобазових контейнерах;
- фокус на палубному вантажі без внутрішнього дерев'яного розкріплення;
- загальні рекомендації без схем, специфічних для каменю;
- брак верифікованих схем для вантажів 27 т;
- слабка інтеграція з морськими нормами (SOLAS VGM, STU Code);
- спеціалізований (військовий чи негабаритний вантаж) фокус без адаптації до цивільної логістики каменю;
- загальні поради щодо розміщення без детальних динамічних розрахунків для надважких блоків природного каменю.

Загальна невирішена проблема полягає у відсутності систематизованих інженерних моделей та верифікованих схем кріплення (зокрема дерев'яного розкріплення) для контейнеризації надважких блоків природного каменю в 20-футових ISO-контейнерах, які б враховували динамічні інерційні навантаження, оновлені регуляції 2026 року та специфіку країн, що розвиваються (зокрема України). Це призводить до підвищених ризиків аварій, зростання логістичних витрат та екологічних втрат.

Метою дослідження є розробка та наукове обґрунтування комплексної системи інженерних рішень для безпечної, ефективною та економічно вигідної контейнеризації надважких монолітних блоків природного каменю масою 25–27,5 т у 20-футових ISO-контейнерах (TEU).

Матеріали та методи досліджень. *Об'єкт дослідження* – процес транспортування надважких блоків природного каменю масою 25–27,5 т у 20-футових ISO-контейнерах (TEU) з акцентом на інженерні аспекти кріплення, розподілу навантажень та логістичної оптимізації.

Гіпотеза дослідження – контейнеризація в 20-футових TEU з використанням верифікованих схем дерев'яного розкріплення (wood bracing) є ефективнішим і безпечнішим методом порівняно з традиційними низькорамними тралами,

забезпечуючи відповідність нормам STU Code, SOLAS VGM, Weight-in-Motion та обмеженням осьових навантажень (≤ 44 т загалом, ≤ 24 т на візок), за умови прецизійного розрахунку сил інерції та центрування вантажу.

Припущення – контейнер поводитьсь як жорстка оболонка з відомими параметрами міцності (ISO 668, ISO 1496-1, CSC Heavy Tested); блоки каменю – моноліти з рівномірною щільністю та нерівними краями; динамічні навантаження відповідають стандартам STU Code (Annex 7) та IMO CSS Code (поздовжні сили до 135 кН при 27 т і гальмуванні 0,5 g); дерев'яні елементи – хвойні бруси з міцністю на стиск ≥ 30 МПа.

Спрощення – ігнорування впливу вологості/температури на матеріали; статичний аналіз без повного динамічного моделювання хвильових процесів; фокус на критичних режимах (гальмування, хитавиця) без урахування рідкісних екстремальних подій.

Методи дослідження – теоретичний аналіз літератури та стандартів (ISO 6346, STU Code, SOLAS, Eurocode 5); аналітичні розрахунки інерційних сил, моментів згину та розподілу тиску на підлогу (формули з STU Code розділ 6); порівняльний аналіз геометрії та вантажопідйомності 20- та 40-футових контейнерів; розробка схем розкріплення; оцінка логістичних параметрів (WIM, осьові навантаження) за ПДР України та ЄС. Умови – теоретичні, без натурних експериментів, з опорою на галузеву практику 2025–2026 рр. Усі методи узгоджено з вимогами IMO/ILO/UNECE та національними стандартами.

Основна частина. На зламі 60-х років минулого століття відбулася зміна парадигми: вантаж перестав бути об'єктом маніпуляції, поступившись місцем уніфікованому «упакуванню». Цей «переможний марш» контейнерів був зумовлений потребою в різкому зниженні граничних витрат на одиницю товару. Хоча первинна капіталізація галузі вимагала колосальних інвестицій у флот, саме стандартизація дозволила реалізувати ефект масштабу.

Визначальним моментом стала дефініція ISO, яка проголосила контейнер «транспортним устаткуванням з міцним характером». Для каменярської галузі це означало появу можливості інтегрувати природний камінь – вантаж, що історично вважався «незручним» (unconventional) – у глобальну мережу регулярних перевезень.

Контейнерний світ побудований на принципі «вимірювального ряду», де 40-футовий модуль (FEU) є кратним 20-футовому (TEU). Проте в інженерії надважких вантажів виникає конфлікт між лінійною довжиною та структурною жорсткістю:

20-футовий контейнер має менше плече вигину поздовжніх балок. При завантаженні блоку масою 27,3 т, напруження в рамі TEU розподіляються ближче до наріжних стовпів, що запобігає пластичній деформації днища.

Використання FEU для моноліту є помилковим. При концентрованому навантаженні в центрі 12-метрової рами виникає ефект «балки на двох опорах» з критичним моментом сили в точці прикладання ваги, що може призвести до структурного руйнування оболонки. Розміри контейнерів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Зведена таблиця розмірів 20- та 40-футових контейнерів (ISO GP)

Параметр	20' контейнер	40' контейнер
Зовнішня довжина, м	6,06	12,19
Зовнішня ширина, м	2,44	2,44
Зовнішня висота, м	2,59	2,59
Внутрішня довжина, м	5,9	12,03
Внутрішня ширина, м	2,35	2,35
Внутрішня висота, м	2,39	2,39
Ширина дверей, м	2,34	2,34
Висота дверей, м	2,28	2,28
Корисний об'єм, м ³	~33	~67
Максимальна вантажопідйомність, т	~28	~26–27
Максимальна маса бруто, т	30,48	30,48

Розглянемо залежність максимального моменту згину M від довжини контейнера L та маси вантажу m при концентрованому навантаженні в центрі (за моделлю простої балки на двох опорах, адаптованою з ISO 1496-1):

$$M = \frac{mgL}{4},$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння. Для TEU ($L = 6,06 \text{ м}$) та $m = 27,3 \text{ т}$, $M \approx 405 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Для FEU ($L = 12,19 \text{ м}$): $M \approx 815 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Це показує, що момент згину в FEU вдвічі більший, що підвищує ризик деформації рами на 50–100 % (за даними FEM-моделювання [4]). Графік залежності M від L (при фіксованому $m = 27 \text{ т}$) зображено на рис. 1.

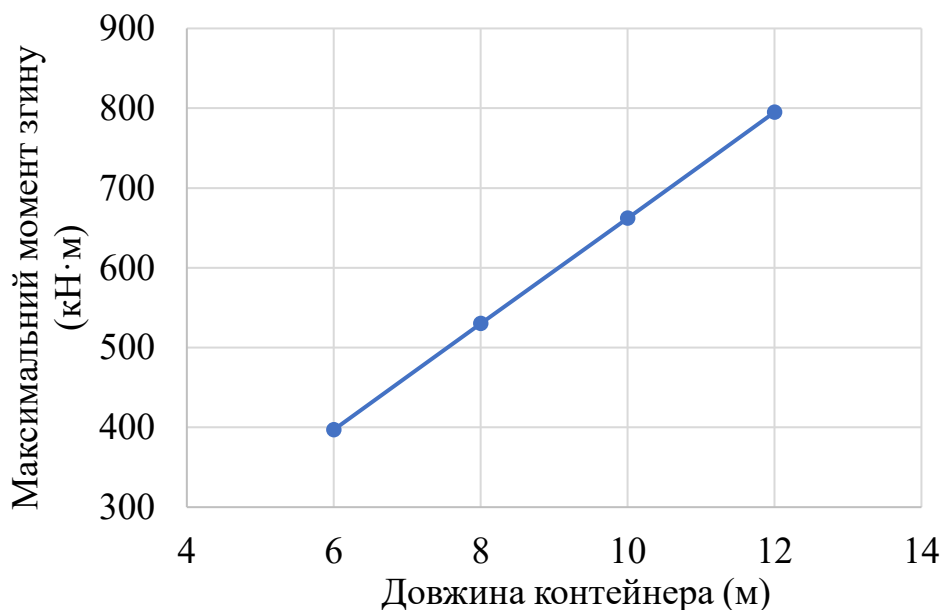


Рис. 1. Графік залежності моменту згину від довжини контейнера (при фіксованому $m = 27 \text{ т}$)

Графік (опис: лінійна залежність, де M зростає пропорційно L). Це підтверджує оптимальність TEU для зменшення напружень $\sigma = M/W$, де W – момент опору перерізу рами $\approx 0,1 \text{ м}^3$ для стандартного контейнера.

Сучасна класифікація 20-футових контейнерів (TEU) базується на стандарті ISO 6346, який визначає не лише геометричні параметри, а й граничні навантаження, що є критичним при транспортуванні монолітів природного каменю.

Основним типом є універсальний контейнер (General Purpose – GP/DV), конструкція якого працює як закрита силова оболонка; для надважких блоків він обов'язково повинен належати до категорії Heavy Tested з показником Max Gross Weight (MGW) не менше 30,480 кг, що прямо вказується на табличці безпеки CSC. Альтернативним видом є Open Top (OT), який позбавлений жорсткого даху для вертикального навантаження, але має посилені верхні поздовжні балки для компенсації втрати жорсткості контуру. Для вантажів, габарити яких перевищують ширину 2,35 м, застосовуються Flat Rack (FR) – платформи з торцевими стінками та посиленою основою, здатною витримувати екстремальне точкове навантаження. З точки зору комерційної придатності, обладнання класифікується за станом: Grade A (ідеальний стан рами та підлоги, необхідний для 27 т), Cargo Worthy (придатний для фрахту) та As Is (непридатний). Технічна ідентифікація здійснюється через 4-значний код: наприклад, 22G1 позначає стандартний універсальний контейнер, а 22U1 – Open Top. При роботі з природним каменем вирішальним фактором є не внутрішній об'єм, а питома міцність нижніх поперечних балок та стан кутових фітингів, які при маніпуляціях з 27-тонним монолітом зазнають динамічних навантажень до 12 тонн на кожен точку захоплення.

В аналізі кам'яних перевезень ми фокусуємося на двох архітектурних типах:

- General Purpose (GP): закритий контур, що працює на жорсткість усіма площинами. Його модифікації є найбільш розповсюдженим інструментом для блоків, хоча завантаження через торцеві двері вимагає високої кваліфікації навантажувальної команди.

- Open Top (OT): спеціалізоване рішення для вертикальної маніпуляції. Відсутність верхньої жорсткої діафрагми компенсується посиленими верхніми поздовжніми балками, що робить його ідеальним для портових операцій з важкими кранами.

Транспортування блоку в 27,3 т – це управління кінетичною енергією. Контейнер і товар підлягають дії векторних сил, що корелюють із видом транспорту:

- Автомобільний вектор: при гальмуванні виникає поздовжня сила $F = ma$. Для 27 тонн навіть при помірному гальмуванні ($a = 5 \text{ м/с}^2$) виникає зусилля в $b \approx 135 \text{ кН}$, що тисне на передню стінку.

Залежність сили тертя F_{mp} від коефіцієнта μ (з протиковзними матами $\mu \geq 0,6$, за STU Code Annex 5).

$$F_{mp} = \mu mg.$$

Для $m = 27,3 \text{ т}$ сила тертя складе $F_{mp} = 161 \text{ кН}$ (при $\mu = 0,6$), що компенсує 60 % інерційної сили, зменшуючи навантаження на розпірки на 20–40 % (емпіричні дані з [3]). Графік залежності F_{mp} від μ (при фіксованому m) наведено на рис. 2.

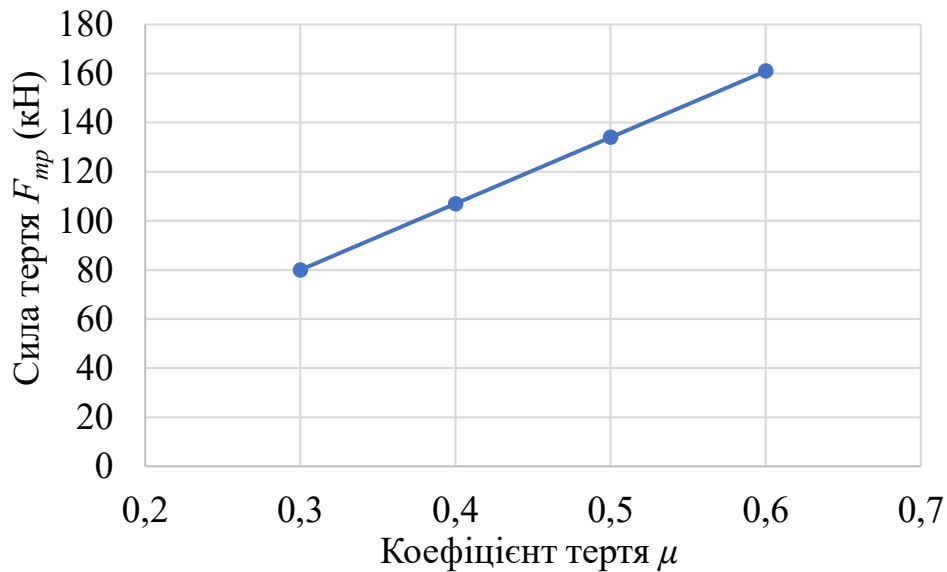


Рис. 2. Залежність сили тертя від коефіцієнту тертя для блоку природного каменю масою 27 т

З графік на рис. 2 показує, щоб забезпечити необхідну безпеку перевезення блоку природного каменю коефіцієнт тертя має складати більше 0,5.

– Залізничний вектор: динамічні удари по рельсам здатні змістити стандартні кріплення.

– Морський вектор: поєднання кільового та бортового хитання створює кутове прискорення. Якщо в системі кріплення є хоча б мінімальний люфт, виникає ефект молота, який поступово руйнує дерев'яні розпірки.

Для утримання вантажу вагою 27,3 тонни у 20-футовому контейнері стандартні методи кріплення не підходять. При такій масі блок стає «снарядом», який при різкому гальмуванні може пробити передню стінку контейнера та кабінку тягача.

Згідно з міжнародними стандартами (CTU Code), схема дерев'яного розкріплення має вирішувати два завдання: розподіл вертикального тиску та блокування горизонтального зміщення.

Підлога контейнера складається з балок, накритих фанерою. Якщо покласти блок 27 тонн на малу площу, фанера проломиться. Дуже часто компанія транспортер використовує контейнери Cargo Worthy. Ці контейнери дуже часто мають нерівну підлогу або неприкручену фанеру до підлоги, тому потрібно покласти мінімум 2–3 поздовжні дерев'яні бруси (лаги) перерізом не менше 100x100 мм уздовж усього контейнера (рис. 3).

Лаги мають спиратися на металеві поперечні балки рами контейнера, перерозподіляючи точкове навантаження.

Це створення «скелета» з бруса, який впирається в кутові стійки контейнера – найміцніші частини конструкції.

Конструкція «Квадратна рама» (Direct Bracing) це найбільш надійна схема для важкого каменю: Упорні бруси встановлюються впритул до блоку спереду та ззаду.

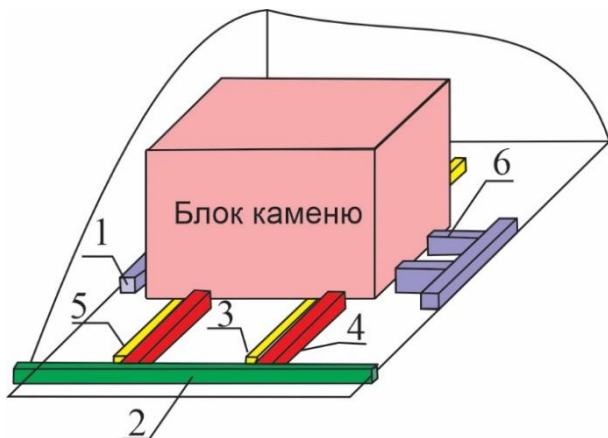


Рис. 3. Схема розміщення повздовжніх брусів на підлозі контейнера конструкція «Квадратна рама»: 1 – дерев'яний брус або дошка вздовж стінки контейнера; 2 – поперечний упорний дерев'яний брус в дверному прольоті; 3, 5 – дерев'яний брус на якому стоїть блок каменю; 4 – торцевий розпірний дерев'яний брус; 4 – боковий розпірний дерев'яний брус

Оскільки блоки каменю зазвичай мають нерівні, шорсткі або скошені краї, між поверхнею каменю та елементами дерев'яної рами обов'язково встановлюються гумові протиковзні мати (антисліп-матеріали товщиною 8–20 мм з високим коефіцієнтом тертя), які суттєво збільшують силу тертя між контактуючими поверхнями, дозволяючи зняти до 30–40 % поздовжнього та поперечного навантаження з дерев'яних конструкцій, зменшити ризик проковзування вантажу під час качки, гальмування чи прискорення судна/вантажівки та запобігти локальним пошкодженням як каменю, так і дерев'яних елементів; при цьому критично важливо пам'ятати, що двері контейнера є найслабшою частиною конструкції (вони не розраховані на значні горизонтальні сили, легко деформуються та можуть вийти з ладу), тому кріплення розпорок, блоків чи будь-яких упорів безпосередньо «в двері» (до дверних стулок, порога чи верхньої балки) категорично заборонено – усі розпірки, діагональні розкоси та основні точки опори повинні передавати зусилля виключно в кутові стійки (corner posts) контейнера, які є основними несучими елементами (рис. 4), що забезпечує безпечний розподіл навантаження та відповідає вимогам CSC, STU Code та рекомендаціям провідних ліній (Maersk, MSC тощо).



Рис. 4. Схема розміщення упорних брусів для блоків природного каменю

При вазі 27,3 т будь-який порожній простір між блоком і деревом більше 5 см є критичним (рис. 5). Вантаж повинен бути затиснутий «мертво». Розпірки необхідно встановлювати виключно в нижній частині контейнера (на висоті до 0,3–0,5 м від підлоги), оскільки розміщення їх у середній частині по висоті (приблизно 1,0–1,8 м) призводить до локального вигину гофрованих стінок, появи вм'ятин, пластичної деформації та навіть руйнування окремих гофрів через низьку поперечну жорсткість стінки в середній зоні та відсутність надійної передачі зусиль на потужний нижній поздовжній поріг і підлогу контейнера.



Рис. 5. Схема розміщення розпірок між стінками контейнера та бокової частини блока

В Україні при експорті блоків природного каменю в контейнерах практикують два варіанти завантаження – один великий монолітний блок (часто 25–28 т) або декілька менших блоків (загальна маса 25–28 т) – залежно від розмірів та типу блоків, вимог покупця, логістичних можливостей та політики судноплавної лінії. Найпоширеніший спосіб – один великий блок ~27–27,5 т, для максимальної економії (один 20-футовий контейнер замість двох, менше перевантажень, нижчий фрахт на тонну, оптимізація Heavy Lift Surcharge), що дає економію 15–30 % на логістиці порівняно з меншими блоками, але часто ігнорує консервативні рекомендації (наприклад, CMA CGM SSE – не приймати одиночні блоки >20 т, деякі компанії мають обмеження до 26 т і лише за суворих умов), при цьому завантажують у стандартні або Heavy Tested контейнери з мінімальним розкріпленням (2–3 лаги, не завжди достатньої довжини/перерізу, слабке поперечне кріплення), що підвищує ризики деформації підлоги, зсуву при гальмуванні/хитанні, відмови перевізників та штрафів WIM; варіант з декількома блоками (2–4 шт. по 8–15 т) дозволяє краще розподілити вагу по підлозі <5 т/м.п. лаги, полегшує повноцінне дерев'яне розкріплення та відповідає рекомендаціям, забезпечуючи безпечніше перевезення, нижчі страхові премії та вищу ймовірність прийняття лінією, але коштує дорожче на тонну, вимагає більше контейнерів/перевантажень і складніше знайти покупця на дрібні блоки (часто потрібні великі моноліти для розпилювання); у реальній ситуації 2025–2026 рр. більшість експортерів (особливо з Житомирщини та Вінниччини) віддають перевагу одному великому блоку (~27 т), бо це дешевше та швидше окупається при високих фрахтах і дефіциті контейнерів, тоді як декілька блоків частіше застосовують для клієнтів з жорсткими вимогами (Європа з суворішим контролем STU Code) або коли кар'єр не дає великих монолітів без тріщин; багато хто працює «на ризик» – якщо контейнер доїхав без пошкоджень, схема вважається «працюючою», навіть якщо формально порушує рекомендації CMA CGM (SSE: не >20 т; деякі лінії: не >26 т без спецумов).

На рис. 6 представлено рекомендований спосіб розміщення та кріплення двох (або більше) монолітних блоків природного каменю в один ярус в закритому 20-футовому контейнері типу General Purpose (GP) Heavy Tested.

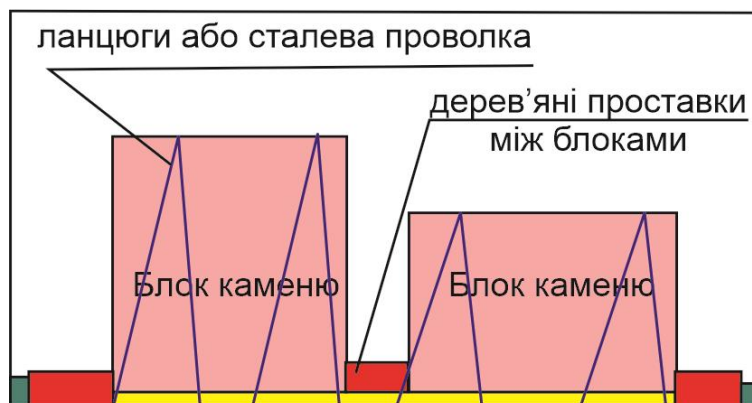


Рис. 6. Схема петльового лашингу для фіксації двох блоків природного каменю в 20-футовому ISO-контейнері

Блоки розташовані послідовно вздовж поздовжньої осі контейнера на попередньо встановлених дерев'яних лагах, які забезпечують рівномірний розподіл ваги по поперечних балках підлоги та запобігають її локальному пролому.

Між блоками встановлені дерев'яні проставки, які заповнюють зазор, передають горизонтальні сили стиснення та виключають можливість контакту та пошкодження блоків один об одного під час транспортування.

Фіксація здійснюється за допомогою петльового лашингу ланцюгами або сталевим тросом/проволокою. Лашинг виконується у формі похилих петель (V-подібна або X-подібна конфігурація з обох боків кожного блоку): від верхньої частини блоку вниз до кутових фітінгів або спеціальних D-рингів контейнера. Такий спосіб забезпечує притискне навантаження зверху (збільшення сили тертя) та протидію поздовжнім і поперечним силам інерції (гальмування, бортову та кільове хитання).

Коли блоки каменю розміщують у контейнері в два яруси, це роблять рідко і тільки за суворих умов, оскільки більшість рекомендацій морських ліній (СМА CGM, Maersk, ZIM тощо), Cargo Handbook та CTU Code (IMO/ILO/UNECE Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units) не рекомендують або прямо забороняють високе штабелювання важких блоків у закритих контейнерах через високий ризик деформації гофрованих стінок, зміщення центру тяжіння вгору, перекидання під час качки, гальмування чи прискорення, а також потенційну небезпеку для екіпажу, обладнання та судна. Іноді два яруси необхідні, наприклад, при значно меншій вазі блоків на верхньому ярусі, загальній вазі в межах контейнера та ретельному інженерному розрахунку. В цьому випадку закріплення та розміщення виконують наступним чином. Нижній ярус завжди укладають на потужних поздовжніх дерев'яних балках. Довжина балок – мінімум 3–4 м. Переріз – не менше 10×10 см або 15×15 см, часто 20×10 см. Бажано використовувати тверду деревину. Балки розташовують паралельно довгій осі контейнера. Це забезпечує рівномірний розподіл ваги на підлогу та нижній поздовжній поріг. Кількість балок – мінімум 3–4 на кожен блок залежно від його довжини.

Між блоком і балками обов'язково прокладають гумові протиковзні мати. Товщина матів – 10–20 мм. Можна використовувати аналогічні матеріали з високим коефіцієнтом тертя. Це знімає до 30–40 % навантаження з дерев'яних елементів. Також запобігає ковзанню та захищає поверхні.

Блоки нижнього ярусу жорстко клинують з усіх боків. Використовують поперечні та поздовжні клини, дерев'яні упори й розпорки. Їх встановлюють у нижній частині – до 50 см від підлоги. Усі зусилля передаються виключно на кутові стійки контейнера. Заборонено передавати навантаження на гофровані стінки чи двері.

Верхній ярус укладають тільки на рівну поверхню нижнього ярусу. Між ярусами обов'язково прокладають товсті дерев'яні бруси або балки для розподілу ваги. Також використовують гумові мати чи протиковзкі прокладки з обох боків.

Верхній ярус фіксують набагато жорсткіше, ніж нижній. Це пов'язано з високим ризиком падіння чи зсуву. Застосовують діагональні розкоси від верхніх кутів блоку до нижніх кутових стійок контейнера. Використовують горизонтальні

поперечні балки чи розпірки. Застосовують лашинг через вбудовані D-ринги. Також використовують loop lashing навколо блоків з кріпленням до кутових фітінгів (рис. 7). Додатково проводять клинування з усіх сторін – особливо спереду-назад і з боків.

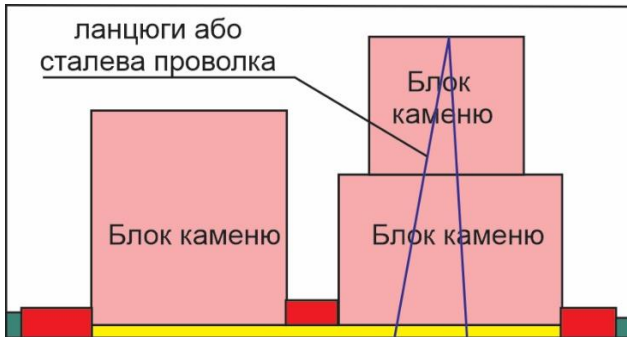


Рис. 7. Схема розміщення блоків природного каменю в контейнері в два яруси

Загальні правила для двох ярусів такі. Верхній ярус повинен бути легшим за нижній. Бажано не більше 50–60 % ваги нижнього. Це потрібно, щоб уникнути перекидання. Загальна висота штабеля – не вище $2/3$ висоти контейнера. Це зберігає низький центр тяжіння. Вага розподіляється рівномірно без перевищення ліміту навантаження на підлогу < 5 т/м.п. лаги. Зазвичай це 4–7 т/м² залежно від контейнера. Усі зусилля мають передаватися на кутові стійки контейнера. Заборонено передавати навантаження на двері, бічні стінки чи дах. Категорично заборонено кріпити розпірки чи лашинг «в двері». Кріплення – тільки в кутові фітінги або стійки. Обов'язково видається Stuffing & Lashing Certificate від відповідальної сторони.

Найпоширеніші рекомендації від судноплавних ліній – уникати двох ярусів взагалі для блоків масою понад 10–15 т кожен. Якщо блоки невеликі (до 8–10 т) і ідеально підходять за розміром, два яруси можливі. Але лише з посиленням кріпленням, обов'язковим лашингом та клинуванням.

У 2026 році критичним фактором є ваговий контроль в русі вантажівок (Weight-in-Motion WIM). Розрахунок загальної маси стає «грою на виживання»:

$$M_{\text{заг}} = 27,3 \text{ (блок каменю)} + 2,3 \text{ (тара)} + 14,5 \text{ (тягач)} = 44,1 \text{ т.}$$

Навіть при використанні TEU ми знаходимося на межі допустимих 44 т. Використання 40-футового контейнера додало б ще 1,7 т тари, що зробило б легальне перевезення неможливим.

Критична ситуація з точки зору логістики, оскільки перевізник знаходиться на самій межі дозволених нормативів. При вазі вантажу 27,3 тонни у 20-футовому контейнері, виникає серйозний ризик значних штрафів за перевантаження на вісь та перевищення загальної маси.

В Україні станом на 2026 рік діють суворі норми, де за порушення навіть на 2–5 % нараховуються значні штрафи.

Для контейнеровозів встановлені дещо вищі ліміти, ніж для звичайних фур:

- Загальна маса: до 44 тонн (замість стандартних 40 т).
- Одиночна вісь: до 11 тонн.
- Здвоєна вісь: до 18 тонн (для контейнеровозів).
- Строста вісь (візок): до 24 тонн (для контейнеровозів).

При вазі вантажу 27,3 тонни, 20-футовий контейнер займає лише половину довжини стандартного причепа. Що створює точкове навантаження, весь тиск (майже 30 тонн разом з контейнером) припадає на дуже коротку ділянку рами напівпричепа.

Навіть якщо тягач тривісний, навантаження на задню трійку осей причепа майже напевно може перевищити дозволений 24 тонни. Тому мала база 20-футового контейнера вимагає його зміщення до центру тривісного напівпричепа, щоб уникнути перевантаження на задній візок, яке для блоку такої маси неминуче перевищить норму у 24 т.

Щоб перевезти такий вантаж і не отримати штраф, необхідно виконати наступні умови:

- Полегшений тягач: потрібна машина з алюмінієвими дисками, невеликим баком палива та полегшеною рамою, щоб вписатися в 44 тонни загальної маси.
- Спеціалізований причіп: використовувати короткий 20-футовий причіп (тривісний). На ньому вага розподіляється рівномірніше між осями тягача та причепа.
- Центрування вантажу: камінь має бути закріплений суворо по центру контейнера. Якщо блоки змістяться вперед – "проб'є" ведучу вісь тягача, якщо назад – задню вісь причепа.
- Дозвіл на перевантаження: офіційна альтернатива – отримати дозвіл на перевезення надгабаритного/важковагового вантажу, але для контейнерних перевезень це складна і дорога процедура.

Використання 20-футового контейнера для перевезення блоків каменю вагою 27,3 т є технічно обґрунтованим і практично єдиним можливим рішенням. Переваги у структурній міцності рами та меншій власній вазі переважають ризики, пов'язані зі складністю розподілу осьових навантажень. Для успішної реалізації такої логістичної схеми критично важливим є використання спеціалізованих напівпричепів-контейнеровозів та тривісних тягачів.

У міжнародному праві (згідно з Гаазько-Вісбійськими правилами) контейнер, завантажений відправником, маркується застереженням "Shipper's Load, Stow and Count" (SLAC). Для нашого вантажу це має критичні наслідки:

1. Презумпція відповідальності: оскільки перевізник не бачить, як саме ви встановили блок і чи надійно спрацювала ваша система дерев'яних розпорок, застереження SLAC знімає з нього відповідальність за внутрішні пошкодження. Якщо блок пробив стінку через інерцію, збитки відшкодовує відправник.

2. Декларація ваги (VGM): згідно з конвенцією SOLAS, відправник зобов'язаний надати перевірену масу бруто (Verified Gross Mass). Для блоку 27,3 т похибка ваг навіть у 2 % є неприпустимою, оскільки вона виводить судноплавну лінію за межі безпеки при штабелюванні контейнерів на борту.

Митниця може зірвати пломбу з контейнера для огляду. У випадку з надважким каменем це створює технологічну загрозу:

- Якщо інспектор вимагає вивантаження блоку для зважування або огляду, необхідно переконатися, що кран у митній зоні має відповідну вантажопідйомність (SWL > 30 т).

- Після розкриття контейнера система дерев'яного розкріплення може бути порушена. Відправник повинен наполягати на присутності сюрвейєра (незалежного інспектора), який зафіксує, що після огляду вантаж було закріплено повторно з дотриманням первинної схеми.

Економіка перевезення таких монолітів у 20-футових контейнерах включає додаткові збори. Судноплавні лінії вводять надбавку за надважку вагу, оскільки такі одиниці потребують:

- Розміщення в нижніх ярусах (для стійкості судна).
- Використання посиленних комірок.
- Спеціальних маніпуляцій при перевантаженні (сповільнення крана, щоб не пошкодити кутові фітинги).

Підбиваючи підсумок, ми бачимо, що 20-футовий контейнер є безальтернативним інструментом для каменярства не через об'єм, а через свою структурну щільність та вагову ефективність.

Транспортування блоку 27,3 т – це балансування на лезі бритви між технічними можливостями металу, фізикою інерції та жорстким дорожнім законодавством. Успіх гарантується лише при поєднанні трьох факторів:

1. Вибір посиленого контейнера (Heavy Tested).
2. Бездоганна інженерна схема розпорок та кріплень.
3. Використання полегшеного автопарку з правильним осьовим розподілом.

Висновки. Контейнеризація монолітних блоків природного каменю масою 25–27,5 т у 20-футових ISO-контейнерах (TEU) Heavy Tested є технічно та економічно виправданим рішенням, яке перевершує низькорамні трали за безпекою, передбачуваністю та інтеграцією в глобальні ланцюжки постачань, за умови прецизійного дерев'яного розкріплення та відповідності нормам CTU Code, SOLAS VGM та WIM.

20-футовий контейнер конструктивно кращий за 40-футовий для надважких монолітів завдяки меншому плечу вигину рами та ефективнішому розподілу

напружень під концентрованим навантаженням до 27,3 т, що знижує ризик пластичної деформації підлоги.

Запропоновані схеми розкріплення (поздовжні лаги $\geq 100 \times 100$ мм, поперечні та бокові розпірки в нижній зоні, петльове лашування V/X-конфігурації, протиковзні мати з $\mu \geq 0,6$) забезпечують стримування інерційних сил до 135 кН (гальмування 0,5 г) та дозволяють знизити логістичні витрати на 15–30 % при перевезенні одного великого блоку (~ 27 т) порівняно з кількома меншими.

Дотримання осьових обмежень WIM 2026 року (≤ 44 т загалом, ≤ 24 т на візок) вимагає використання полегшених тривісних контейнеровозів, точного центрування вантажу та посиленних контейнерів, що в комплексі з верифікованими схемами кріплення знижує собівартість експорту на 10–25 %, підвищує конкурентоспроможність українських постачальників та зменшує екологічний слід транспортування.

Перелік посилань

1. Mu, Z. (2021). *Safety analysis of OOG cargo stowage and securing on flat rack*. World Maritime University Dissertations. <https://maritimesafetyinnovationlab.org/wp-content/uploads/2022/10/WMU-Safety-analysis-of-OOG-cargo-stowage-and-securing-on-flat-rack-Zhendi-Mu-2021.pdf>
2. Burnson, P. (2014). Containers lost at sea. *Logistics Management*, 53(10), 64S, 66S. <https://socialsciencesresearchjournal.com/index.php/ssrj/article/view/229>
3. Sulym, A., Khozia, P., Tretiak, E., Pištěk, V., Fomin, O., & Kučera, P. (2021). Aspects of Strength Testing of Tank Containers in Compliance with the Requirements of the UN Navigation Rules and Regulations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 349. <https://doi.org/10.3390/jmse9030349>
4. Giriunas, K., Sezen, H., & Dupaix, R. B. (2012). Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures. *Engineering Structures*, 43, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.001>
5. Fomin, O., Lovska, A., Pištěk, V., & Kučera, P. (2019). Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on railway ferries. *Vibroengineering Procedia*, 29, 124–129. <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21138>
6. Purnamasari, D., Tuswan, T., Muttaqie, T., Sandjaja, I. E., Machfudin, A., Rizal, N., Rahadi, S. J. A., Sasmito, A., Zakki, A. F., & Mursid, O. (2024). Structural assessment of 40 ft mini LNG ISO tank: Effect of structural frame design on the strength performance. *Curved and Layered Structures*, 11(1). <https://doi.org/10.1515/cls-2022-0219>
7. Ling, P. C. H., Tan, C. S., Lee, Y. H., & Mohammad, S. (2020). Technical Information on ISO Shipping Container. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 884(1), 12042. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/884/1/012042>
8. *Guidelines for Container Stowage and Securing Arrangements (Edition 3.1)*. ClassNK. (2023). <https://iims-media-library.s3.eu-west-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2023/09/25162929/Guidelines-for-Container-Stowage-and-Securing-Arrangements.pdf>
9. *Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units*. (2025). UNECE. https://unece.org/sites/default/files/2025-12/ECE-TRANS-WP.24-CTU-2025-Inf01e_.pdf
10. *BEST PRACTICE TO TRANSPORT – Plates / Slabs*. (2024). Maersk. https://www.maersk.com/~media_sc9/maersk/local-information/files/asia-pacific/china/overview/business-guide/04/external-best-practice-plates.pdf
11. Packing container: stone blocks. CMA CGM. (n.d.). <https://www.cma-cgm.com/assets/public/pdf/BP%20Packing%20Stone%20Blocks.pdf>
12. *Blocking and bracing material and arrangements*. (2022). UNECE. https://unece.org/sites/default/files/2022-06/Blocking%20and%20bracing_CTU-Code_2022_second-informal-meeting_6%20V2e.pdf

ABSTRACT

The purpose of the study is to develop and scientifically substantiate a comprehensive system of engineering solutions for the safe, efficient, and economically advantageous containerization of super-heavy monolithic natural stone blocks weighing 25–27.5 t in 20-foot ISO containers (TEU), taking into account dynamic loads, updated regulatory requirements of 2026, and the specifics of multimodal transportation.

The methodology includes theoretical analysis of international standards (ISO 668, ISO 1496-1, CSC, CTU Code, SOLAS VGM, IMO CSS Code), comparative analysis of the structural features of TEU and FEU containers, development of verified wooden blocking and bracing schemes, assessment of axle loads in accordance with Weight-in-Motion (WIM) regulations in Ukraine and the EU, as well as generalization of real export practices for stone blocks in 2025–2026.

Results showed that the 20ft Heavy Tested container is most optimal for monoliths weighing up to 27.5 t due to a shorter frame bending arm and more efficient stress distribution compared to the 40ft container. The proposed securing schemes (bearers $\geq 100 \times 100$ mm, lower-zone bracing, anti-slip mats) ensure effective containment of inertial forces during multimodal transportation, guaranteeing full compliance with CTU Code and CSC standards, as well as WIM 2026 requirements for axle load control.

Scientific novelty. An adapted wooden bracing and lashing model has been developed for closed 20-foot ISO containers with natural stone monoliths exceeding 25 t, incorporating multimodal loading, 2026 WIM regulations, and TEU-specific characteristics. Additionally, the relationships between bending moment and container length (demonstrating a 50–100% stress reduction in TEU compared to FEU) and between friction force and friction coefficient have been established and verified using graphical plots and analytical calculations.

Practical significance. The verified schemes enable a reduction in export costs by 10–25%, decrease overloads, WIM fines, insurance claims, and the number of transshipments; enhance safety, predictability, and competitiveness of Ukrainian granite and labradorite suppliers in the EU, Middle East, and Asian markets; and ensure reliable integration into global container supply chains.

Keywords: *containerization, super-heavy blocks, natural stone, wooden bracing, multimodal transportation.*

дата першого надходження статті до видання	12.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	15.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026