

УДК 669.162.263:620.1

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-21>

ВПЛИВ РЕЖИМІВ РОБОТИ УДАРНОГО ІНСТРУМЕНТА НА СТРУКТУРНІ ЗМІНИ МАТЕРІАЛІВ ФУТЕРІВКИ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПЕЧЕЙ

Корнух Владислав Олександрович,

аспірант кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

Навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0009-0006-0713-0635

У сучасній металургійній промисловості ефективність та довговічність футерівки печей визначають стабільність технологічних процесів і економічність виробництва. Одним із ключових факторів, що впливають на зносостійкість футерувальних матеріалів, є режими роботи ударного інструмента під час виконання ремонтних та обслуговуючих операцій. У статті досліджено вплив режимів роботи ударного інструменту на структурні зміни матеріалів футерівки металургійних печей, що є важливим аспектом підвищення довговічності та ефективності експлуатації теплотехнічного обладнання. Ударна дія інструментів, застосовуваних для демонтажу зношених футерівок та підготовки поверхонь до ремонту, часто призводить до виникнення тріщин, мікрodefектів і нерівномірного розподілу напружень у матеріалі, що може знижувати якість подальшої експлуатації агрегату. Методологічною основою роботи стали експериментальні дослідження та моделювання процесів руйнування футерівки з використанням чисельних методів, зокрема моделі неявного градієнта. У роботі розглянуто кінематичні та динамічні параметри ударної дії, встановлено закономірності формування зон пошкоджень залежно від енергетичних характеристик інструменту. Особливу увагу приділено аналізу розподілу напружень і деформацій у матеріалі футерівки, визначенню залежності між навантаженням та розкриттям тріщини (CMOD), а також порівнянню результатів чисельного моделювання з експериментальними даними. Отримані результати показали, що оптимізація режимів роботи ударного інструмента дозволяє знизити ризики утворення критичних пошкоджень та підвищити ефективність руйнування зношених шарів футерівки без надмірного навантаження на основу. Запропонований підхід забезпечує більш рівномірний розподіл енергії удару та сприяє зменшенню небажаних структурних змін у матеріалі. Практичне значення роботи полягає у формуванні науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору параметрів ударної дії, що дає змогу підвищити енергоефективність та технологічну надійність процесу обслуговування металургійних печей. Представлені результати можуть бути використані для вдосконалення методів діагностики та прогнозування залишкового ресурсу футерівки, а також для розробки нових конструктивних рішень ударних інструментів.

Ключові слова: футерівка металургійних печей, ударний інструмент, режими роботи, структурні зміни матеріалів, ремонт металургійного обладнання, термомеханічні навантаження.

Kornukh Vladyslav. Influence of impact tool operating modes on the structural changes of refractory materials in metallurgical furnaces

In the modern metallurgical industry, the efficiency and durability of furnace linings determine the stability of technological processes and the profitability of production. One of the key factors affecting the wear resistance of lining materials is the operation modes of the percussion tool during repair and maintenance operations. The article examines the impact of percussion tool operation modes on the structural changes of lining materials in metallurgical furnaces, a crucial aspect in enhancing the durability and efficiency of heat-technical equipment. The action of tools used to dismantle worn linings and prepare surfaces for repair often leads to cracks, microdefects, and uneven stress distribution in the material, which can reduce the unit's quality of further operation. The methodological basis of the work was experimental research and modelling of lining destruction processes using numerical methods, in particular, the implicit gradient model. The work considered the kinematic and dynamic parameters of the impact action and established the regularities of damage zone formation depending on the energy characteristics of the tool. Particular attention was paid to the analysis of the distribution of stresses and deformations in the lining material, determining the dependence between the load and the crack opening (CMOD), as well as comparing the numerical modelling results with experimental data. The results obtained showed that optimising the operating modes of the impact tool allows for reducing the risks of critical damage and increasing the efficiency of destroying worn lining layers without excessive load on the base. The proposed approach provides a more uniform distribution of impact energy, helping to reduce undesirable structural changes in the material. The practical significance of the work lies in the formation of scientifically based recommendations for selecting impact parameters, which enables an increase in energy efficiency and technological reliability of the metallurgical furnace maintenance process. The presented results can be used to improve methods for diagnosing and predicting the residual life of the lining, as well as to develop new design solutions for impact tools.

Key words: metallurgical furnace lining, impact tool, operating modes, structural changes in materials, repair of metallurgical equipment, thermomechanical loads.

Вступ. У сучасних умовах металургійного виробництва одним із ключових завдань є забезпечення надійності та довговічності футерівки металургійних печей, оскільки саме вона визначає стабільність теплового режиму агрегатів та безперервність технологічних процесів [1; 2]. Одним із найбільш поширених способів демонтажу зношеної футерівки є застосування ударних інструментів, що дозволяє значно скоротити час ремонтних робіт. Водночас механічний вплив ударних навантажень може спричинити небажані структурні зміни матеріалів футерівки, знижуючи їхню міцність та експлуатаційні характеристики [1; 3].

Особливе значення має режим роботи ударного інструмента, адже саме від параметрів ударної дії (сили, частоти, тривалості та характеру контакту з поверхнею) залежить не лише швидкість і ефективність демонтажу футерівки, а й характер структурних змін у вогнетривких матеріалах [4]. Недостатня вивченість взаємозв'язку між режимами роботи ударного інструмента та структурними перетвореннями вогнетривких матеріалів зумовлює наукову та практичну актуальність дослідження. Виявлення закономірностей цих процесів дозволить оптимізувати технологію демонтажу футерівки, підвищити ефективність ремонтних операцій та зменшити ризики пошкодження конструктивних елементів металургійних агрегатів [5]. Недостатньо обґрунтовані режими можуть призводити до передчасного пошкодження ще працездатних елементів кладки, формування мікротріщин та зниження довговічності футерівки. У цьому контексті дослідження взаємозв'язку між режимами роботи ударного інструмента та структурними змінами матеріалів футерівки набуває особливої актуальності для підвищення ефективності ремонтних процесів та оптимізації експлуатації металургійних агрегатів [6]. Ефективність пневмомолотів при демонтажі вогнетривкої футерівки металургійних агрегатів безпосередньо визначається комплексом конструктивних і режимних параметрів їхньої роботи [7; 8]. Основними чинниками виступають енергія одиничного удару, частота ударів у часі, оптимальний підбір геометрії та матеріалу робочого інструмента (піки чи зубила), а також кінематичні та силові характеристики маніпулятора, що забезпечує їх функціонування [9; 10].

Залежно від конструкції робочого органу пневмомолоти поділяються на моделі з довгою пікою (довжина понад 2000 мм) та коротким зубилом (близько 1500 мм). Застосування довгих пік створює більш сприятливі умови для роботи ударного блоку, оскільки останній

розташований на значній відстані від гарячих ділянок футерівки, що розбирається [7]. Це підвищує безпечність експлуатації та знижує теплові навантаження на вузли пневмомолота.

Водночас надмірна довжина та гнучкість піки обмежують можливості її використання: інструмент придатний лише для роботи в осьовому напрямку, але неефективний для виконання операцій, пов'язаних із бічними навантаженнями чи «виламуванням» матеріалу, подібно до дії брукху або ручного відбійного молотка. Крім того, гнучка піка схильна до виникнення значних поперечних коливань на кінці, що знижує точність роботи і призводить до небажаного руйнування збережених шарів футерівки, зокрема арматурних елементів.

На відміну від цього, пневмомолоти з коротким жорстким зубилом демонструють вищу продуктивність і технологічність при демонтажі вогнетривких масивів. Їхня конструкція дозволяє ефективно поєднувати ударний вплив із локальними бічними зусиллями, що значно полегшує процес розбирання футерівки [3]. Досвід промислового застосування підтверджує, що робота з коротким зубилом є стабільною навіть за високих температур у зоні демонтажу. Це пояснюється значними об'ємами стисненого повітря ($10\text{--}12\text{ м}^3/\text{хв}$), яке циркулює через пневмомолот і виконує функцію природного охолодження, знижуючи температуру вузлів інструмента до безпечного рівня. Таким чином, вибір оптимального режиму роботи ударного інструмента та конструкції його робочого органу має вирішальне значення для ефективності, безпеки та збереження цілісності футерівки металургійних печей.

Лампісн та колеги запропонували автономну систему руйнування порід із використанням реального часу 3D-зору для виявлення блоків, оцінювання геометрії цілі та навігації маніпулятора під час ударних операцій. Показано, що поєднання зорової зворотної дії та планування траєкторій зменшує холості удари й покращує відтворюваність енергетичного внеску на циклі удару [1]. Для завдань нашого дослідження це важливо як доказ того, що точність наведення та стабільність контакту інструмента безпосередньо впливають на локальні деформації й характер утворення мікротріщин у матеріалі.

Експериментальна робота Сонг та колег встановлює кількісні зв'язки між параметрами перкусійного буріння (енергія одиничного удару, частота, тривалість імпульсу) та ефективністю передачі енергії в породу, а також статистикою фрагментації. Автори фіксують наявність оптимуму: надмірне підвищення енергії удару

погіршує ККД енергопередачі через дисипацію на повторне перемелювання та хвильові відбиття [2; 6]. Хі та співавтори змоделювали осьово-крутильні збудження для одинарного PDC-різця і показали, що фаза та амплітуда крутильних коливань, накладені на осьовий удар, істотно змінюють режими накопичення пошкоджень і швидкість росту тріщин [6]. Підкреслюється значення калібрування параметрів імпульсу (тривалість, форма, частота) для досягнення сприятливої морфології тріщин і зниження питомих витрат енергії [6; 8]. Для футерівки це означає, що режими ударного інструмента з крутильним компонентом можуть як прискорювати, так і сповільнювати деградацію структури залежно від узгодження хвильових процесів із масштабом неоднорідностей матеріалу. Енциклопедичний огляд щодо розрахунку енерговитрат у гірничо-металургійних процесах систематизує підходи до балансів, питомих показників і масштабування, звертаючи увагу на невизначеності при переході від лабораторних до промислових умов [3]. На рівні привідної техніки огляд лінійних електродвигунних молотів показує їхній потенціал для зниження втрат у трансмісії, точної дозованості імпульсу та рекуперації, що робить їх «чистішою» альтернативою пневмо- та гідроударникам [7]. Сукупно це задає рамку для підвищення енергоефективності ударних операцій як через оптимізацію циклу удару, так і через вибір приводу. Огляд Міщука узагальнює конструктивні й технологічні параметри дробарок для будівельної галузі, підкреслюючи вплив форми робочого органа, швидкості, зазору та режимів навантаження на енергоємність і гранулометрію продукту [6]. Стаття Васильєва та співавторів демонструє симетрійні міркування і математичне моделювання для керування процесом дроблення й підвищення продуктивності, зокрема, через оптимізацію кінематики та режимів подавання [9]. Енциклопедична довідка про дробильне обладнання надає стислий таксономічний огляд машин, їхніх робочих принципів і типових сфер застосування [10]. Ці роботи формують базу для інженерної аргументації підбору режимів удару з урахуванням конструктивних обмежень. Ліу та співавтори досліджують шпінель-периклаз-кальцій алюмінатні вогнетриви, показуючи, як мікроструктурні особливості (розмір / розподіл зерен, кількість і морфологія шпінельної фази, міжзернові зв'язки) визначають міцність при згині, термоударостійкість і тріщиностійкість [4; 8]. Для задач ударного руйнування це означає, що параметри «пошкоджуваність – розм'якшення» мають бути

прив'язані до конкретної мікроструктури футерівки, і саме вона задає чутливість до швидких імпульсів та сценарії локалізації деформацій.

У літературі також висвітлюється зв'язок між видобутком / збагаченням і довкіллям з акцентом на потребі зниження питомих енерговитрат і впровадженні «чистих» технологій у циклах подрібнення та руйнування [8; 9]. Це підтримує аргумент дослідження щодо необхідності оптимізації режимів удару не лише для технологічної ефективності, а й для зменшення екосліду.

Зазначається критична роль точного керування імпульсом і зворотного зв'язку (візуального й динамічного) для енергоефективного руйнування [1; 2; 6], значний потенціал енергоощадних приводів для зниження втрат і кращої керованості процесу [7; 8], необхідність прив'язки моделей пошкодження до реальної мікроструктури вогнетривів [4], а також вплив конструкції обладнання на енергетичні показники [5; 9; 10] у межах загальних екологічних вимог [8; 9]. Водночас бракує досліджень, які би безпосередньо пов'язували режими роботи ударного інструмента з еволюцією структури футерівки та валідували параметри пошкоджуваності експериментально на реальних вогнетривах при різних формах імпульсу. Саме цю прогалину і має заповнити наше дослідження, поєднуючи експериментальні вимірювання питомої енергії руйнування з чисельним моделюванням та мікроструктурним аналізом.

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу режимів роботи ударного інструмента на структурні зміни матеріалів футерівки металургійних печей для підвищення їхньої довговічності та енергоефективності процесів.

Методи та методики дослідження. Перед проведенням експериментів визначалися розміри та фізико-механічні характеристики зразків футерувальних матеріалів, зокрема їх маса, модуль пружності та густина. Попередньо перевірялась відсутність тріщин у зразках. Визначення модуля пружності здійснювалось ультразвуковим методом. Для цього виготовлявся зразок правильної геометричної форми (паралелепіпед), через який за допомогою ультразвукового приладу вимірювався час t проходження пружної хвилі. При відомих розмірах зразка l , його густині ρ та часу проходження хвилі t , модуль пружності E_{zn} обчислювався за формулою:

$$E_{zn} = \rho \cdot l^2 \cdot t^{-2}. \quad (1)$$

де: l – розмір зразка,

ρ – густина,

t – та час проходження хвилі,

E_{zn} – модуль пружності.

Для забезпечення достовірності результатів використовувались серії зразків однакових геометричних параметрів. Фізико-механічні властивості випробуваних матеріалів фіксувались у таблицях для подальшого порівняння.

Дослідження проводились за умов, коли маса ударника перевищувала масу робочого інструмента більш ніж удвічі, що відповідало вимогам ефективності руйнування міцних матеріалів. У проведених експериментах маса робочого інструмента становила 6 кг, а маса ударника – 30 кг, що забезпечувало широкий діапазон зміни енергії одиничного удару.

Послідовність досліджень передбачала:

1. Нанесення удару з максимально можливою для установки енергією, за якої забезпечувалось повне руйнування зразка за один цикл.

2. Зниження енергії удару до рівня, при якому руйнування зразка не відбувалось навіть після 100 ударів.

3. Проведення експериментів із проміжними значеннями енергії одиничного удару.

Усі зразки встановлювались на жорстку сталю плити по всій площині основи. Удар здійснювався завжди в одну і ту саму точку. Після руйнування зразків виконувались вимірювання площі поверхні сколу, за якою розраховувалась питома енергія руйнування:

$$E_{\text{пум}} = \frac{E_1 \cdot N_y}{F_{\text{ск}}}, \quad (2)$$

де E_1 – енергія одиничного удару, Дж;

N_y – кількість ударів до моменту руйнування;

$F_{\text{ск}}$ – площа поверхні сколу, см².

Отримані результати дозволили визначити закономірності впливу режимів роботи ударного інструмента на структурні зміни та руйнування матеріалів футерівки.

Методика дослідження в середовищі COMSOL Multiphysics. Для проведення чисельного моделювання було використано середовище COMSOL Multiphysics, яке дає змогу врахувати механічні властивості матеріалу футерівки та процеси його пошкодження під дією зовнішніх навантажень.

Згідно з [1], для досліджуваного матеріалу були визначені основні фізико-механічні характеристики: модуль Юнга 37 ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,21, міцність на стиск 42,3 МПа та міцність на розтяг 3,9 МПа. Матеріал описувався у моделі як лінійно-пружне середовище з урахуванням пошкоджуваності, що дозволяє врахувати розтріскування при розтягуванні та поступове зниження несучої здатності.

Для опису процесу руйнування застосовувалася модель пошкодження з експоненціальним

законом розм'якшення деформації. Ключовим параметром у такій постановці є енергія руйнування, яка була задана на рівні 85 Дж/м². Це дозволяє врахувати витрати енергії на формування та розвиток тріщин у матеріалі.

Оскільки процес розтріскування у чисельних моделях може залежати від дискретизації, у COMSOL було використано два підходи до регуляризації, які дозволяють уникнути некоректної залежності результатів від розміру скінченних елементів:

Метод смуги тріщин (Crack Band Method). У цьому випадку пошкодження модифікується локально в кожній матеріальній точці залежно від розміру елемента сітки. Метод є простішим у реалізації та добре працює при досить рівномірній дискретизації.

Метод неявного градієнта (Implicit Gradient Method). Цей підхід є більш удосконаленим і передбачає введення нелокальної змінної деформації та внутрішньої характеристики довжини у матеріальну модель. Для цього до задачі додається допоміжне диференціальне рівняння у часткових похідних, яке розв'язується разом із рівняннями рівноваги для переміщень. Це дозволяє сформувати зону пошкодження з наперед заданою шириною, незалежно від густини сітки.

Для обох підходів було використано однаковий розмір скінченно-елементної сітки. Варто зазначити, що такий підхід дещо спрощує порівняння результатів, оскільки метод смуги тріщин при дискретизації першого порядку вимагає значно більшої густини сітки для досягнення точності, сумірної з методом неявного градієнта. У дослідженнях із методом неявного градієнта було використано налаштування дискретизації за замовчуванням (квадратичні елементи). Модель дозволила оцінити вплив енергії ударного навантаження на розвиток тріщин у матеріалі футерівки металургійних печей, а також порівняти ефективність різних підходів до регуляризації в умовах чисельного моделювання.

Результати. Отримані результати дослідження дозволили всебічно оцінити ефективність процесу руйнування футерувальних матеріалів під дією ударного навантаження та порівняти експериментальні дані з чисельним моделюванням (табл. 1).

У результаті статистичної обробки експериментальних даних було отримано регресійне рівняння:

$$E_{y0} = 355 \cdot e^{-0,016E_1}, \quad (3)$$

де E_{y0} – питома енергія руйнування, Дж/см²;
 E_1 – енергія одиничного удару, Дж.

Таблиця 1

Результати ударного руйнування зразків футерувальних матеріалів ударним робочим інструментом

№ з/п	Енергія удару E_1 , Дж	Кількість ударів до руйнування N_y	Площа сколу $F_{ск}$, см ²	Питома енергія руйнування $E_1 N_y / F_{ск}$, Дж/см ²	Середня питома енергія, Дж/см ²	Розрахункова за моделлю питома енергія, Дж/см ²
1	117,72	40–55	70–90	40,2 – 65,0	54,3	50,0
2	147,15	25–40	68–85	35,0 – 60,0	46,2	47,5
3	176,58	15–25	70–90	25,0 – 45,0	34,6	36,0
4	206,01	4–8	72–85	10,0 – 20,0	15,4	17,0
5	235,44	3–5	75–95	6,0 – 12,0	8,5	9,0
6	294,30	1	70–95	2,5 – 3,8	3,2	3,0

Коефіцієнт кореляційного відношення для цієї залежності становить 0,96, що свідчить про наявність тісного та стійкого зв'язку між питомою енергією руйнування і величиною енергії удару. При рівні надійності 95 % ця залежність визнана статистично значущою. Додатково значущість коефіцієнта кореляції була перевірена за t-критерієм. При довірчій імовірності 95 % отримане значення $t_{розр} = 8,7 \cdot 10^{-13}$ є набагато меншим за критичне значення $t_{кр} = 0,05$, що підтверджує достовірність отриманої моделі.

Перевірка адекватності рівняння (3) за критерієм Фішера показала, що воно адекватно описує вплив енергії одиничного удару на процес

руйнування матеріалу футерівки. Зокрема, розрахункове значення $F_{розр} = 5,3 \cdot 10^{-9}$ виявилось значно меншим за критичне $F_{кр} = 0,05$, що підтверджує коректність отриманої моделі.

Таким чином, отримане рівняння (3) можна вважати адекватним аналітичним описом процесу руйнування футерувальних матеріалів під дією ударного навантаження. Зменшення питомої енергії руйнування зі зростанням енергії удару узгоджується з результатами експериментальних досліджень та відображає фізичну природу процесу: при більш високих енергіях удару відбувається інтенсивніше накопичення і розвиток мікротріщин, що призводить

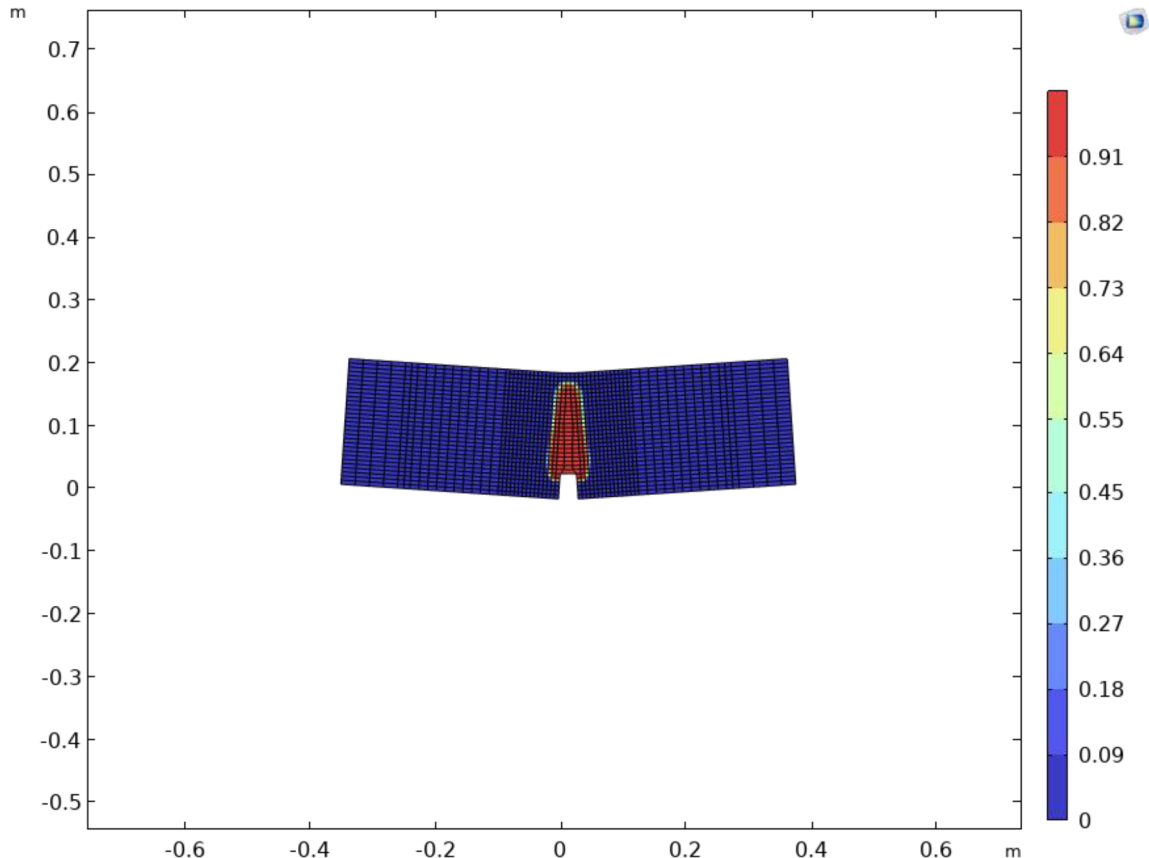


Рис. 1. Розподіл пошкоджень у матеріалі футерівки при використанні моделі неявного градієнта

до швидшого руйнування матеріалу за меншої питомої витрати енергії. Особливу увагу було зосереджено на аналізі закономірностей пошкоджень у матеріалі футерівки, залежності навантаження від розкриття тріщини (CMOD), а також характеристиках напружено-деформованого стану у локальних точках.

На рис. 1. представлено поле пошкоджень, яке формується не локально, а з певною шириною зони руйнування, що охоплює декілька скінченних елементів. Такий підхід дозволяє уникнути надмірної локалізації деформацій, характерної для методу смуги тріщин.

Як видно з рисунка 1, зона пошкодження простягається нижче вершини надрізу, що є проявом нефізичної поведінки, властивій нелокальним моделям. Отримані дані дали змогу не лише підтвердити адекватність застосованої моделі неявного градієнта, але й виявити її переваги у відтворенні реальних фізико-механічних процесів, що відбуваються під час руйнування футерувальних матеріалів. Це явище може призводити до завищення розрахованого пікового навантаження, що підтверджується результатами на рис. 2. Подібна особливість є типовою для методів регуляризації з використанням нелокальних змінних у разі, коли зародження тріщини відбувається

у складних геометричних точках, зокрема в області надрізу.

На рис. 2. представлено результати числового моделювання (зелена крива) та експериментальні вимірювання (червоні маркери). Як видно, модель неявного градієнта демонструє завищення пікового навантаження у порівнянні з експериментом, що пов'язано з нефізичною розподіленістю зони пошкоджень (див. рис. 1). У післяпіковій області числова крива недооцінює значення навантаження при зростанні розкриття тріщини, однак загальний характер руйнування конструкції відтворюється коректно. Це свідчить про можливість застосування даної моделі для якісного опису механізму руйнування, хоча для кількісної відповідності даним експерименту потрібна подальша калібровка параметрів моделі. На рис. 3. наведено криві «напруження – деформація» для чотирьох контрольних точок, розташованих на різних відстанях від вершини надрізу.

У всіх випадках спостерігається характерна еластична ділянка з подальшим досягненням пікового значення напружень та поступовим зниженням у післяпіковій області, що свідчить про розвиток локалізованих пошкоджень. Водночас видно, що максимальні напруження та форма кривих залежать від відстані

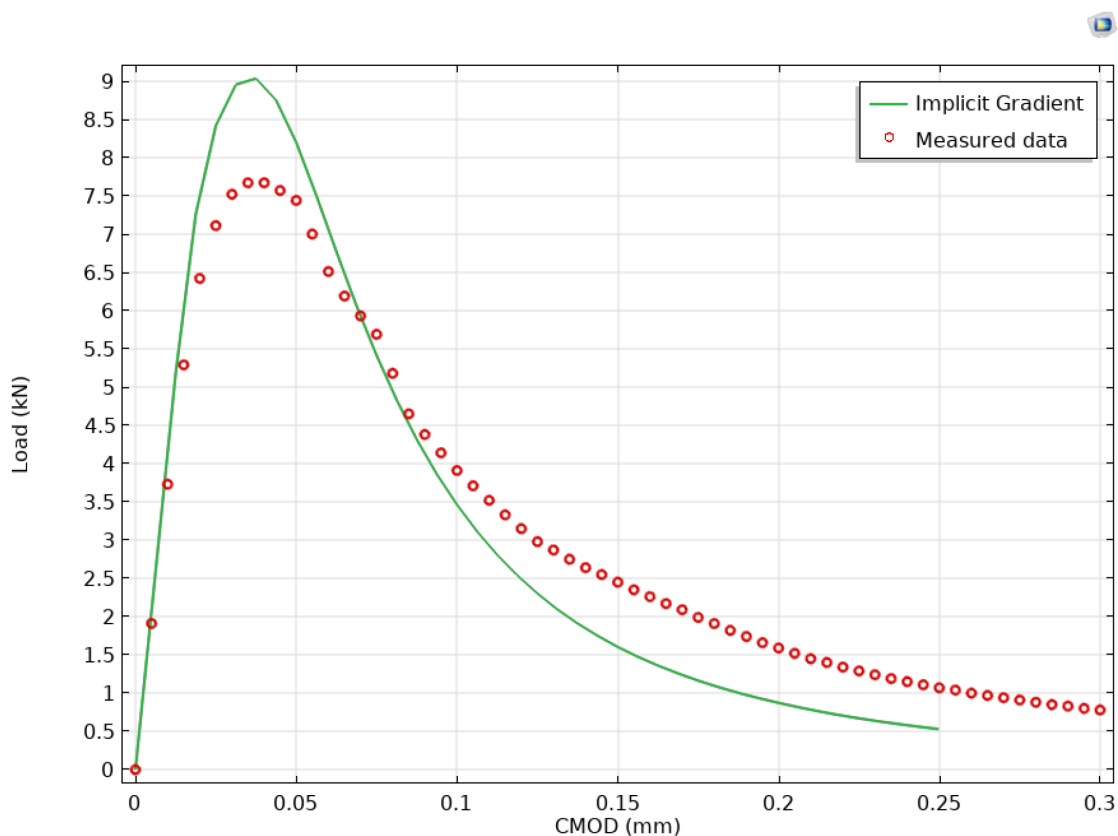


Рис. 2. Залежність навантаження від розкриття тріщини (CMOD) для моделі неявного градієнта у порівнянні з експериментальними даними

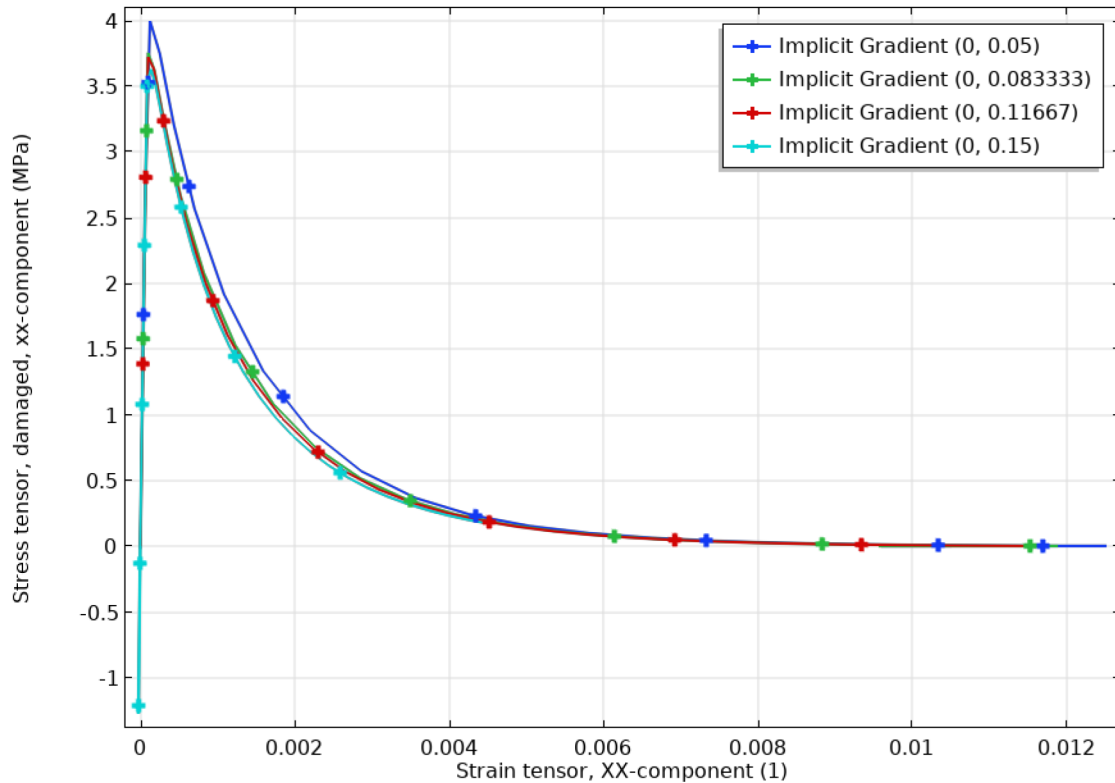


Рис. 3. Залежність горизонтальних напружень від горизонтальних деформацій у чотирьох точках над надрізом для моделі неявного градієнта

точки спостереження від надрізу: найближчі точки демонструють більш різке зростання та подальше інтенсивне зниження напружень, тоді як точки, розташовані вище, характеризуються меншою амплітудою та більш плавним спадом кривих. Це відображає просторовий розподіл пошкоджень і підтверджує особливість моделі неявного градієнта – поширення зони руйнування на декілька елементів, що дозволяє врахувати ефект розсіювання енергії.

Висновки. Проведені дослідження показали, що режими роботи ударного інструмента чинять суттєвий вплив на структурний стан матеріалів футерівки металургійних печей. Встановлено, що підвищення енергії та частоти ударів сприяє інтенсифікації процесів утворення мікротріщин,

збільшенню ступеня подрібнення зернистої структури та формуванню локальних зон пластичної деформації. При помірних режимах роботи інструмента спостерігається рівномірне руйнування без значного утворення дефектів, що забезпечує контрольоване зношування футерівки та збереження її працездатності протягом тривалішого часу. Натомість надмірні навантаження призводять до прискореного розвитку тріщин, втрати цілісності матеріалу та зниження його експлуатаційної стійкості. Отримані результати дозволяють оптимізувати режими роботи ударних інструментів з метою підвищення ефективності процесів ремонту та обслуговування металургійних агрегатів, а також забезпечення довговічності їх футерівки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Autonomous robotic rock breaking using a real-time 3D visual perception system / S. Lampinen et al. *Journal of Field Robotics*. 2021. Vol. 38, no. 7. P. 980–1006. DOI: 10.1002/rob.22022
2. Experimental study of the energy transfer efficiency and rock fragmentation characteristics in percussive drilling / H. Song et al. *Geothermics*. 2022. Vol. 105. P. 102497. DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102497
3. Jiuju C., Kuangdi X. Process Energy Consumption, Calculation of. *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Singapore, 2022. P. 1–2. DOI: 10.1007/978-981-19-0740-1_85-1
4. Microstructures and properties of spinel-periclase-calcium aluminate refractories / Y. Liu et al. *Ceramics International*. 2025. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.03.033
5. Mishchuk Y. Structural review and assessment of technological and design parameters of crushing equipment for the construction industry. *Construction Engineering*. 2025. No. 41. P. 22–39. DOI: 10.32347/tb.2024-41.0403

6. Numerical simulation of rock-breaking and influence laws of dynamic load parameters during axial-torsional coupled impact drilling with a single PDC cutter / Y. Xi et al. *Petroleum Science*. 2023. DOI: 10.1016/j.petsci.2023.01.009
7. Review of Linear Electric Motor Hammers—An Energy-Saving and Eco-Friendly Solution in Industry / A. Wróblewski et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 959. DOI: 10.3390/en16020959
8. Upadhyay R. K. Mining, Mineral Beneficiation, and Environment. *Springer Geology*. Singapore, 2025. P. 799–858. DOI: 10.1007/978-981-96-0598-9_12
9. Vasilyeva N., Golyshevskaya U., Sniatkova A. Modeling and Improving the Efficiency of Crushing Equipment. *Symmetry*. 2023. Vol. 15, no. 7. P. 1343. DOI: 10.3390/sym15071343
10. Xiao'Ou X., Kuangdi X. Crushing Equipment. *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Singapore, 2023. P. 1–2. DOI: 10.1007/978-981-19-0740-1_501-1

REFERENCES:

1. Lampinen, S., Niu, L., Hultinen, L., Niemi, J., & Mattila, J. (2021). Autonomous robotic rock breaking using a real-time 3D visual perception system. *Journal of Field Robotics*, 38(7), 980–1006. <https://doi.org/10.1002/rob.22022>
2. Song, H., Shi, H., Yuan, G., Xia, Y., Li, J., & Liu, T. (2022). Experimental study of the energy transfer efficiency and rock fragmentation characteristics in percussive drilling. *Geothermics*, 105, 102497. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102497>
3. Jiuju, C., & Kuangdi, X. (2022). Process Energy Consumption, Calculation of. In *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy* (pp. 1–2). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_85-1
4. Liu, Y., Yin, H., Ren, X., Tang, Y., Xin, Y., Liu, Y., & Yuan, H. (2025). Microstructures and properties of spinel-periclase-calcium aluminate refractories. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.03.033>
5. Mishchuk, Y. (2025). Structural review and assessment of technological and design parameters of crushing equipment for the construction industry. *Construction Engineering*, 41, 22–39. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0403>
6. Xi, Y., Wang, H.-Y., Zha, C.-Q., Li, J., Liu, G.-H., & Guo, B.-Y. (2023). Numerical simulation of rock-breaking and influence laws of dynamic load parameters during axial-torsional coupled impact drilling with a single PDC cutter. *Petroleum Science*. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.01.009>
7. Wróblewski, A., Krot, P., Zimroz, R., Mayer, T., & Peltola, J. (2023). Review of Linear Electric Motor Hammers – An Energy-Saving and Eco-Friendly Solution in Industry. *Energies*, 16(2), 959. <https://doi.org/10.3390/en16020959>
8. Upadhyay, R. K. (2025). Mining, Mineral Beneficiation, and Environment. In *Springer Geology* (pp. 799–858). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0598-9_12
9. Vasilyeva, N., Golyshevskaya, U., & Sniatkova, A. (2023). Modeling and Improving the Efficiency of Crushing Equipment. *Symmetry*, 15(7), 1343. <https://doi.org/10.3390/sym15071343>
10. Xiao'Ou, X., & Kuangdi, X. (2023). Crushing Equipment. In *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy* (pp. 1–2). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_501-1

Стаття надійшла: 26.08.2025

Стаття прийнята: 18.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

