

УДК 621.793:666.76

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-10>

АНАЛІЗ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІКРОЧАСТИНОК ТРИОКСИДУ ВОЛЬФРАМУ WO_3 З ШАМОТНИМ ВОГНЕТРИВОМ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ УДАРИ

Топоров Андрій Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій та хімічного машинобудування
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0002-6365-9932

Алексєєва Ольга Євгенівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій та хімічного машинобудування
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0002-2768-6220

Попова Ольга Юріївна,

доктор економічних наук, доцент, проректор з наукової роботи,
професор кафедри економіки і управління
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0002-9093-5912

У роботі представлено комплексне теоретичне дослідження трибологічної взаємодії та контактної механіки при високошвидкісному ударі сферичної мікрочастинки триоксиду вольфраму (WO_3) діаметром 10 мкм об плоску підкладку з алюмосилікатного вогнетриву (шамоту) при швидкості зіткнення 200 м/с. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації процесів холодного газодинамічного напилення функціональних керамічних покриттів та прогнозування механізмів ерозійного зносу футерівки промислових агрегатів. Головною метою роботи є розрахунок максимальних контактних напружень, оцінка глибини індентування та прогнозування характеру руйнування матеріалів у локальній зоні контакту. Аналіз базується на модифікованій теорії Герца для динамічних процесів з урахуванням квазістатичного наближення, справедливого для дозвукових швидкостей удару відносно швидкості звуку в досліджуваних матеріалах. Дослідження включає детальний огляд фізико-механічних властивостей взаємодіючих тіл, розрахунок зведеного модуля пружності системи та визначення полів нормальних і дотичних напружень. Особливу увагу приділяється аналізу ймовірності переходу від пружної деформації до крихкого руйнування або пластичної течії з урахуванням масштабного ефекту міцності мікрочастинок. У роботі доведено, що, незважаючи на мікроскопічний масштаб події, виникають пікові контактні тиски (близько 7 ГПа) та радіальні розтягуючі напруження багаторазово перевищують межі міцності шамотної підкладки. Це переводить процес з області пружного зіткнення в режим інтенсивного ерозійного зносу, що супроводжується утворенням кільцевих тріщин (cone cracks) та локальним кратероутворенням. Отримані результати формують наукову базу для коригування технологічних режимів напилення та вибору стійкіших керамічних підкладок.

Ключові слова: контактна механіка, високошвидкісний удар, триоксид вольфраму, алюмосилікатний вогнетрив (або шамот), контактні напруження, теорія Герца, глибина індентування, крихке руйнування.

Toporov Andrii, Aleksieieva Olha, Popova Olha. Analysis of contact interaction between a tungsten trioxide (WO_3) microparticle and a fireclay refractory under high-velocity impact

This paper presents a comprehensive theoretical study of the tribological interaction and contact mechanics during the high-velocity impact of a spherical tungsten trioxide (WO_3) microparticle, 10 μm in diameter, on a flat aluminosilicate refractory (chamotte/fireclay) substrate at a collision velocity of 200 m/s. The relevance of the research is driven by the need to optimize the processes of cold gas-dynamic spraying of functional ceramic coatings and to predict the mechanisms of erosive wear in the linings of industrial units. The primary objective of this work is to calculate the maximum contact stresses, estimate the indentation depth, and predict the fracture behavior of the materials in the local contact zone. The analysis is based on the modified Hertz theory for dynamic processes, incorporating a quasi-static approximation that is valid for subsonic impact

velocities relative to the speed of sound in the investigated materials. The study includes a detailed review of the physical and mechanical properties of the interacting bodies, the calculation of the reduced elastic modulus of the system, and the determination of normal and shear stress fields. Particular attention is given to analyzing the probability of transition from elastic deformation to brittle fracture or plastic flow, taking into account the size effect on the strength of microparticles. The paper demonstrates that, despite the microscopic scale of the event, the resulting peak contact pressures (approximately 7 GPa) and radial tensile stresses significantly exceed the ultimate strength limits of the chamotte substrate. This shifts the process from an elastic collision regime to a state of intense erosive wear, accompanied by the formation of cone cracks and localized cratering. The obtained results provide a scientific basis for adjusting the technological parameters of spraying and selecting more resistant ceramic substrates.

Key words: contact mechanics, high-velocity impact, tungsten trioxide, aluminosilicate refractory (chamotte), contact stresses, Hertz theory, indentation depth, brittle fracture.

Вступ. Проблема взаємодії високошвидкісних мікрочастинок з керамічними перешкодами є фундаментальною задачею у низці критичних технологій. З одного боку, вона лежить в основі процесів газотермічного та холодного напилення функціональних покриттів, де кінетична енергія частинок використовується для їх адгезії та компактування. Триоксид вольфраму (WO_3), будучи важливим напівпровідниковим матеріалом, широко застосовується в електрохромних пристроях, газових сенсорах та фотокаталізі. Можливість формування шарів WO_3 методом прямого напилення на вогнетривкі підкладки вимагає точного розуміння вікна параметрів, за яких відбувається закріплення частинки, а не руйнування підкладки. З іншого боку, даний сценарій моделює умови ерозійного зносу футерівки промислових печей та реакторів. В умовах високотемпературних газових потоків частинки каталізаторів або продуктів реакції можуть бомбардувати стінки камери. Шамот, як найбільш поширений та економічний вогнетривкий матеріал, часто піддається подібним впливам. Розуміння напруженого стану при ударі дозволяє прогнозувати ресурс футерівки та механізми її деградації.

Дослідження кінетики удару керамічних частинок при холодному газодинамічному напиленні (ХГН) вимагає переосмислення класичних моделей, розроблених переважно для металевих систем. Фундаментальні механізми адгезії металів, що базуються на адіабатичній зсувній нестабільності (ASI), детально описані в роботах [2, с. 43; 7, с. 73]. Однак, як зазначається в [4, с. 50; 5, с. 293], ці моделі не можуть бути безпосередньо екстрапольовані на крихкі керамічні матеріали, такі як TiO_2 та WO_3 , через їх високу твердість та відсутність пластичності при кімнатних температурах.

Альтернативний механізм, відомий як Room Temperature Impact Consolidation (RTIC), був запропонований в [1, с. 18]. Цей підхід акцентує увагу на процесах фрагментації та подальшої консолідації нанорозмірних уламків. Чисельне

моделювання процесу руйнування керамічних мікрочастинок підтверджує важливість врахування масштабного ефекту та питомої енергії руйнування [3, с. 15]. Згідно з дослідженнями [6, с. 11], критична швидкість v_{crit} для кераміки визначається балансом між кінетичною енергією, роботою фрагментації та дисипативними втратами. Вплив властивостей підкладки на процес напилення, зокрема механічне анкерування в пористих структурах, розглядається в [8, с. 8; 9, с. 20]. Важливість оптимізації розміру частинок для досягнення необхідної енергії бондінгу підкреслюється в [10, с. 55]. Таким чином, комплексний аналіз кінетики удару керамічних частинок вимагає інтеграції енергетичних моделей руйнування та механіки контактної взаємодії.

1. Методи та методики дослідження

Розглядається нормальний удар (кут падіння 90°) сферичної частинки об плоску поверхню (рисунок 1).

Параметри задачі:

- **імпактор (частинка):** триоксид вольфраму wo_3 .
 - геометрія: сфера.
 - діаметр (d): 10 мкм (10×10^{-6} м).
 - швидкість (v_0): 200 м/с.
- **мішень (підкладка):** шамот (алюмосилікатна кераміка).
 - геометрія: пружний напівпростір (плоска поверхня).
- **цільові показники:**
 - максимальний контактний тиск (P_{max} або P_0).
 - розподіл головних напружень ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).
 - максимальні дотичні напруження (τ_{max}), відповідальні за пластичність.
 - радіальні розтягуючі напруження, відповідальні за утворення кільцевих тріщин.

1.1. Методологія та обмеження

Як основний інструмент аналізу використовується теорія контактних напружень Генріха Герца. Застосування даної теорії до динамічного удару (квазістатичне наближення) є припустимим за умови виконання низки умов:

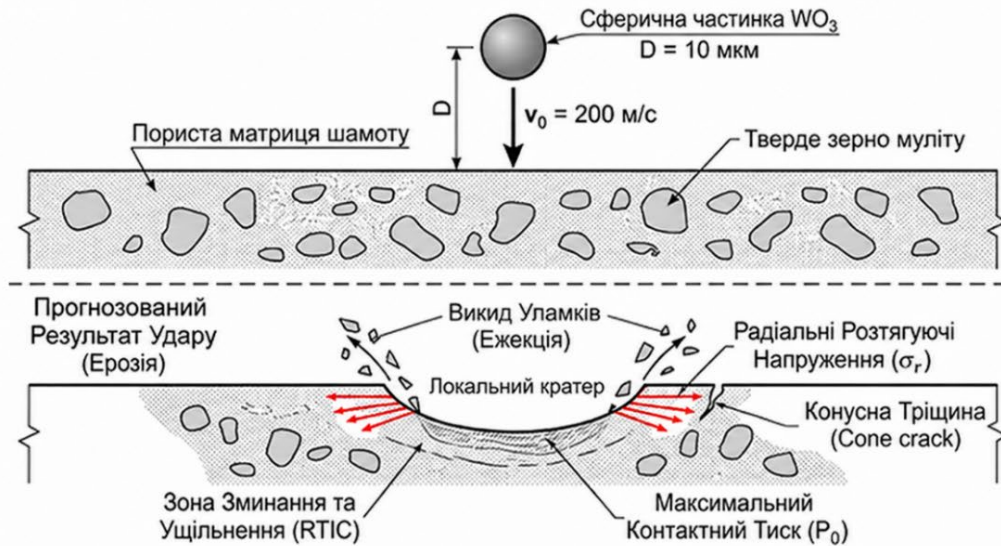


Рис. 1. Розрахункова схема

1. **Малість деформацій:** Радіус плями контакту a має бути малим порівняно з радіусом частинки R ($a \ll R$).

2. **Пружність:** Матеріали повинні підпорядковуватися закону Гука до моменту руйнування.

3. **Відсутність хвильових ефектів:** Швидкість удару має бути суттєво нижчою за швидкість поширення пружних хвиль у матеріалі ($v_0 \ll c_0$). Для кераміки швидкість звуку зазвичай становить 3000–8000 м/с, що робить швидкість 200 м/с допустимою для квазістатичного аналізу (менше 10% від c_0).

Однак, з огляду на високу швидкість та крихкість кераміки, звіт також включає аналіз виходу за межі пружності, оцінюючи ймовірність пластичної деформації та дроблення на основі критеріїв Мізеса та Ренкіна.

2. Фізико-механічні властивості матеріалів

Точність розрахунку напружень безпосередньо залежить від достовірності вхідних даних про властивості матеріалів. Керамічні матеріали, такі як WO_3 та шамот, характеризуються значним розкидом властивостей залежно від пористості, фазового складу та технології спікання. У цьому розділі проводиться критичний аналіз доступних дослідницьких даних для вибору найбільш репрезентативних значень («ефективних властивостей») для моделювання.

2.1. Триоксид вольфраму (WO_3)

Триоксид вольфраму являє собою поліморфний матеріал, кристалічна решітка якого зазнає спотворень типу перовскіту (ABO_3). При кімнатній температурі стабільною є моноклінна фаза ($\gamma-WO_3$), хоча залежно від умов синтезу

можуть бути присутні триклінні або гексагональні модифікації.

2.1.1. Густина

Теоретична густина кристалічного WO_3 розраховується на основі параметрів решітки. Дослідження методом DFT (теорія функціонала густини) та експериментальні дані вказують на значення в діапазоні 7.16–7.30 г/см³.

- **Обране значення:** Для консервативного розрахунку (максимізації кінетичної енергії) приймаємо густину щільної частинки: $\rho_1 = 7200 \text{ кг/м}^3$.

2.1.2. Пружні властивості

WO_3 є відносно жорстким оксидом.

- **Модуль Юнга (E):** Різні джерела наводять дані, отримані як експериментально (на тонких плівках і спечених зразках), так і теоретично (ab initio розрахунки).

- Розрахунки з перших принципів (DFT) для кубічної фази дають значення об'ємного модуля пружності (B) близько 205–228 ГПа та модуля зсуву (G) близько 123–153 ГПа.

- Використовуючи співвідношення для ізотропного наближення ($E = \frac{9BG}{3B+G}$), отримуємо діапазон значень $E \approx 300 \dots 350$ ГПа.

- Експериментальні дані для тонких плівок на ПАР-резонаторах іноді показують менші значення через мікроструктурні дефекти, проте для монокристалічної частинки слід орієнтуватися на верхні межі.

- **Коефіцієнт Пуассона (ν):** Значення варіюються у вузькому діапазоні 0.25–0.28.

- **Обрані значення:** $E_1 = 300 \text{ ГПа}$, $\nu_1 = 0.26$.

2.1.3. Міцнісні характеристики

Кераміка WO_3 є крихкою. Твердість за Вікерсом (HV) становить близько 15.3 ГПа (~1500

HV) для щільних зразків. Це важливий параметр для оцінки ймовірності руйнування самої частинки при ударі.

2.2. Шамот (Алюмосилікатний вогнетрив)

Шамот – це композиційний матеріал, який отримують шляхом випалу глини (каоліну) до втрати пластичності (утворення муліту та кристобаліту), подальшого подрібнення та змішування зі сполучною глиною з повторним випалом. Його властивості критично залежать від співвідношення фаз (склофаза/муліт) та пористості.

2.2.1. Гетерогенність та вибір моделі

Структура шамоту складається з твердих зерен ("грогу"), занурених у більш м'яку та пористу матрицю.

- Зерна муліту: $E \approx 150 \dots 220 \text{ ГПа}$.
- Пориста матриця: $E \approx 5 \dots 20 \text{ ГПа}$.

При ударі частинки розміром 10 мкм можливі два сценарії:

1. Удар об тверде зерно муліту.
2. Удар об "ефективне середовище" (матрицю).

Для найбільш загального випадку (і враховуючи, що шамот частіше розглядається як макроскопічно однорідний матеріал в інженерних розрахунках футерівок) ми будемо використовувати властивості щільної шамотної цегли, але також проведемо аналіз чутливості.

2.2.2. Модуль Юнга (E)

Аналіз літератури показує широкий розкид:

- Пористі ізоляційні цегли: $E \approx 2 \dots 5 \text{ ГПа}$.
- Конструкційні щільні шамотні вироби (класу ША, ШБ): $E \approx 10 \dots 25 \text{ ГПа}$.
- Ультразвукові вимірювання динамічного модуля часто дають вищі значення, ніж статичні випробування.
- У дослідженнях геополімерів з наповнювачем із шамоту модуль Юнга досягає 17.7 ГПа при 50% наповненні.

• **Обране значення:** Для розрахунку максимальних напружень (найгірший сценарій для

частинки і найкращий для передачі енергії) доцільно вибрати вище значення, характерне для якісного щільного шамоту: $E_2 = 20 \text{ ГПа}$.

2.2.3. Коефіцієнт Пуассона (ν)

Для пористої кераміки та вогнетривів коефіцієнт Пуассона зазвичай низький. Експериментальні дані для шамотних цеглин вказують на діапазон 0.10–0.19.

- **Обране значення:** $\nu_2 = 0.15$.

2.2.4. Густина та міцність

• Густина: 1800–2300 кг/м³ (залежно від марки).

• Міцність на стиск: 20–60 МПа. Зверніть увагу на цей параметр: він на порядки нижчий за очікувані контактні напруження.

Всі визначені параметри розрахунків зведемо в таблицю 1.

3. Теоретичні основи розрахунку контактних напружень

Для визначення напружено-деформованого стану (НДС) у зоні контакту використовується класична теорія пружного удару Герца. Дана теорія дозволяє пов'язати кінетичну енергію налітаючої частинки з енергією пружної деформації матеріалів, визначаючи тим самим максимальну силу взаємодії та площу контакту.

3.1. Зведений модуль пружності (E^*)

Контактна жорсткість системи визначається комбінацією пружних властивостей обох тіл. Зведений модуль пружності E^* розраховується за формулою:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

Підставимо обрані значення:

- **внесок частинки (WO_3):**

$$\frac{1 - 0.26^2}{300 \times 10^9} \approx \frac{0.9324}{300} \text{ гПа}^{-1} \approx 0.00311 \text{ гПа}^{-1}$$

- **внесок підкладки (шамот):**

$$\frac{1 - 0.15^2}{20 \times 10^9} \approx \frac{0.9775}{20} \text{ гПа}^{-1} \approx 0.04888 \text{ гПа}^{-1}$$

Таблиця 1

Зведена таблиця параметрів для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця	Обґрунтування
Імпактор (WO_3)				
Діаметр	D	10×10^{-6}	м	запит користувача
Радіус	R_1	5×10^{-6}	м	геометрія
Швидкість	v_0	200	м/с	запит користувача
Густина	ρ_1	7200	кг/м ³	властивості матеріалу
Модуль Юнга	E_1	300	ГПа	властивості матеріалу
Коеф. Пуассона	ν_1	0.26	-	властивості матеріалу
Підкладка (Шамот)				
Радіус кривизни	R_2	∞	м	площина (напівпростір)
Модуль Юнга	E_2	20	ГПа	властивості матеріалу
Коеф. Пуассона	ν_2	0.15	-	властивості матеріалу

- **сумарна податливість:**

$$\frac{1}{E^*} \approx 0.00311 + 0.04888 = 0.05199 \text{ гПа}^{-1}$$

- **підсумковий зведений модуль:**

$$E^* = \frac{1}{0.05199} \text{ гПа} \approx 19.23 \text{ гПа}$$

Внесок шамоту в загальну податливість контакту становить близько 94% (0.04888/0.05199). Це означає, що жорсткість контакту і виникаючі напруження практично повністю визначаються властивостями м'якої підкладки. Частинка WO_3 у цій системі поводить себе практично як абсолютно твердий індентор.

3.2. Ефективна маса та енергія удару

Оскільки підкладка розглядається як нескінченний напівпростір, ефективна маса зіткнення дорівнює масі частинки m .

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_1$$

$$m = \frac{4}{3} \pi (5 \times 10^{-6})^3 (7200)$$

$$m \approx 1.333 \times 3.14159 \times 125 \times 10^{-18} \times 7200 \approx 3.77 \times 10^{-12} \text{ кг}$$

Кінетична енергія частинки перед ударом (W_k):

$$W_k = \frac{1}{2} m v_0^2$$

$$W_k = 0.5 \times (3.77 \times 10^{-12}) \times (200)^2$$

$$W_k = 0.5 \times 3.77 \times 10^{-12} \times 40000 = 7.54 \times 10^{-8} \text{ Дж}$$

3.3. Рівняння динамічного контакту

У момент максимального зближення частинок (швидкість дорівнює нулю) уся кінетична енергія переходить у потенційну енергію пружної деформації. Для контакту сфери та площини сила F пов'язана з глибиною впровадження δ законом:

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta^{3/2}$$

Робота пружної деформації (інтеграл сили за переміщенням) дорівнює:

$$W_{el} = \int_0^{\delta_{max}} F d\delta = \int_0^{\delta_{max}} \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta^{3/2} d\delta = \frac{8}{15} E^* \sqrt{R} \delta_{max}^{5/2}$$

Прирівнюючи $W_k = W_{el}$, ми можемо знайти максимальну глибину впровадження δ_{max} .

4. Результати

4.1. Максимальна глибина впровадження

(δ_{max})
З рівняння енергетичного балансу виразимо δ_{max} :

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{8}{15} E^* \sqrt{R} \delta_{max}^{5/2}$$

$$\delta_{max} = \left(\frac{15 m v_0^2}{16 E^* \sqrt{R}} \right)^{2/5}$$

Підстановка числових значень:

$$\delta_{max} = \left(\frac{2.262 \times 10^{-6}}{6.88 \times 10^8} \right)^{0.4} = (3.288 \times 10^{-15})^{0.4}$$

$$\delta_{max} \approx 1.61 \times 10^{-6} \text{ м} = 1.61 \text{ мкм}$$

Глибина впровадження становить 1.61 мкм, що дорівнює близько 32% від радіуса частинки ($R=5$ мкм). Це значення знаходиться на межі застосовності класичної теорії Герца (зазвичай $\delta < 0.1R$), що вказує на значні геометричні нелінійності. Проте для оцінки порядку напружень це наближення залишається найбільш надійним аналітичним інструментом.

4.2. Радіус плями контакту (a)

У теорії Герца радіус контакту пов'язаний із глибиною впровадження:

$$a = \sqrt{R \delta_{max}}$$

$$a = \sqrt{5 \times 10^{-6} \times 1.61 \times 10^{-6}}$$

$$a = \sqrt{8.05 \times 10^{-12}}$$

$$a \approx 2.84 \times 10^{-6} \text{ м} = 2.84 \text{ мкм}$$

4.3. Максимальна сила удару (F_{max})

$$F_{max} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \rho_1^{3/2}$$

$$F_{max} = \left(\frac{4}{3} \times 19.23 \times 10^9 \right) \times (0.002236) \times (1.61 \times 10^{-6})^{1.5}$$

$$(1.61 \times 10^{-6})^{1.5} \approx 2.04 \times 10^{-9}$$

$$F_{max} \approx 57.34 \times 10^6 \times 2.04 \times 10^{-9} \approx 0.117 \text{ Н}$$

4.4. Максимальний контактний тиск (P_0)

Розподіл тиску по площадці контакту є напівеліптичним. Максимальний тиск P_0 досягається в центрі плями контакту ($r = 0$).

$$P_0 = \frac{3F_{max}}{2\pi a^2}$$

$$P_0 = \frac{3 \times 0.117}{2\pi (2.84 \times 10^{-6})^2}$$

$$P_0 = \frac{0.351}{2\pi \times 8.06 \times 10^{-12}}$$

$$P_0 = \frac{0.351}{50.64 \times 10^{-12}}$$

$$P_0 \approx 6.93 \times 10^9 \text{ Па}$$

$$P_{max} \approx 6.93 \text{ ГПа}$$

Для верифікації можна використати пряму аналітичну формулу залежності тиску від швидкості, що виключає проміжні обчислення глибини:

$$P_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left(\frac{5\pi\rho_1 v_0^2}{4E^*} \right)^{1/5}$$

Підстановка значень у цю формулу дає результат $P_0 \approx 7.01 \text{ ГПа}$, що підтверджує коректність проведених вище обчислень. Відмінність

менше 1.5% пояснюється похибками округлення.

5. Аналіз тензора напружень

Лише одне значення максимального тиску не дає повної картини потенційного руйнування. Необхідно проаналізувати компоненти напружень у глибині матеріалу (для оцінки пластичності) та на поверхні (для оцінки крихкого руйнування) (рисунок 2.).

5.1. Розподіл напружень по осі симетрії (вісь z)

Розглянемо напруження на різній глибині під центром контакту.

На поверхні ($z = 0$):

У центрі плями контакту матеріал перебуває у стані всебічного стиснення:

- вертикальне напруження: $\sigma_z = -P_0 \approx -7.0 \text{ ГПа}$.
- радіальне та тангенціальне напруження: $\sigma_r = \sigma_\theta = -P_0 \frac{1+2\nu_2}{2}$.
- для шашоту ($\nu_2 = 0.15$): $\sigma_r = -P_0(0.65) \approx -4.55 \text{ ГПа}$.

Це стан "гідростатичного" стиснення перешкоджає руйнуванню безпосередньо в точці контакту, дозволяючи матеріалу витримувати навантаження, що значно перевищують його межу міцності при однобічному стисненні.

Максимальні дотичні напруження (τ_{max}):

Згідно з критерієм Треска або Мізеса, пластична деформація починається, коли дотичні напруження досягають межі плинності зсуву. Максимум дотичних напружень знаходиться під поверхнею на глибині $z \approx 0.48a$ (для $\nu = 0.3$) або трохи глибше для $\nu = 0.15$.

$$\tau_{max} \approx 0.31P_0$$

$$\tau_{max} \approx 0.31 \times 7.0 \text{ ГПа} \approx 2.17 \text{ ГПа}$$

5.2. Розтягуючі напруження (Механізм кільцевих тріщин)

Найбільш небезпечними для крихких керамічних матеріалів, якими є WO_3 , і шамот, є розтягуючі напруження. Вони досягають максимуму на контурі плями контакту ($r = a$) на поверхні ($z = 0$).

Формула для радіального напруження на межі контакту:

$$\sigma_{r(max)} = \frac{1-2\nu}{3} P_0$$

Для підкладки з шамоту ($\nu_2 = 0.15$):

$$\sigma_{r(max)} = \frac{1-0.30}{3} \times 7.0 = \frac{0.70}{3} \times 7.0 \approx 1.63 \text{ ГПа}$$

Таким чином радіальне напруження є розтягуючим (знак плюс), що провокує утворення кільцевих тріщин.

6. Характер руйнування

Отримані теоретичні значення напружень необхідно зіставити з реальними міцнісними характеристиками матеріалів, щоб визначити фізичну картину удару.

6.1. Порівняння з межею міцності шамоту

Шамот є пористим, крихким матеріалом.

- **Межа міцності на стиск (σ_{comp}):** Типові значення для якісного шамоту становлять 20–50 МПа (0.02...0.05 ГПа).

- **Межа міцності на розтяг (σ_{tens}):** Для кераміки зазвичай становить 1/10 від міцності на стиск, тобто близько 2–5 МПа.

- **Динамічна твердість (H_d):** Оцінюється як $H \approx 3\sigma_{yield}$. Навіть якщо прийняти оптимістичне значення межі плинності у 200 МПа (для зерен муліту), твердість складе близько 0.6–1.0 ГПа.

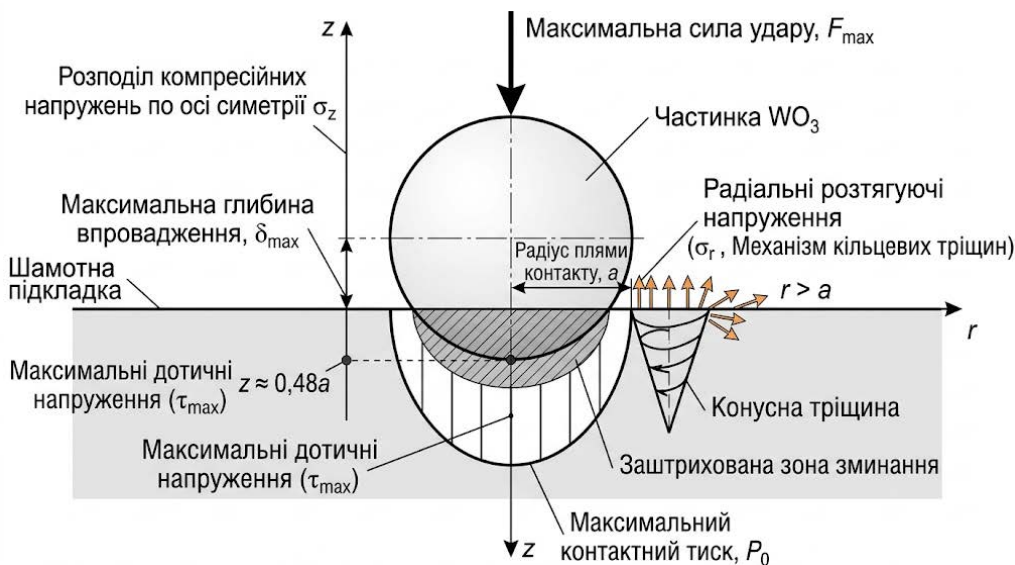


Рис. 2. Визначені параметри контактної взаємодії

Порівняння розрахункових та граничних напружень показує колосальне перевищення допустимих навантажень:

Тип напруження	Розрахункове значення (ГПа)	Межа міцності матеріалу (ГПа)	Коефіцієнт перевищення
Макс. тиск стиснення	7.0	~0.05 (макро), ~2.0 (мікро)	> 100x
Розтяг (поверхня)	1.63	~0.005	> 300x
Зсув (глибинний)	2.17	~0.2 (оцінка)	> 10x

Реалізація суто пружного удару (як передбачається в теорії Герца) **неможлива**.

1. Пластична течія та ущільнення: У зоні контакту відбудеться миттєве змінання пористої структури шамоту. Матеріал підкладки буде поводитися не як пружне тіло, а як пластичне або сипуче середовище.

2. Ерозія: Величезні розтягуючі напруження (1.63 ГПа) призведуть до миттєвого утворення мережі кільцевих тріщин і викришування матеріалу. Відбудеться утворення кратера.

3. Доля частинки (WO_3): Частинка WO_3 значно міцніша за шамот ($E = 300$ ГПа проти 20 ГПа), однак ударні навантаження у 7 ГПа можуть перевищити і її межу міцності (особливо враховуючи крихкість оксидів). Ймовірна

фрагментація частинки, але вона спрацює як "бронебійне осердя", проникаючи у м'яку мішень.

6.3. Аналіз впливу швидкості v_0 на контактні параметри

Проведемо аналіз впливу швидкості удару (в діапазоні 200–700 м/с) на основні показники контактної взаємодії.

Згідно з модифікованою теорією Герца, залежність параметрів удару від початкової швидкості v_0 є **нелінійною** (ступеневою). Це зумовлено тим, що кінетична енергія зростає квадратично (v^2), але контактна жорсткість (опір матеріалу) також зростає в міру збільшення площі контакту (глибини).

На рисунку 3 наведено залежності максимальної сили удару, максимального контактного тиску, максимальної глибини впровадження частинки, розтягуючих та дотичних напружень від швидкості частинки в діапазоні 200-700 м/с.

Максимальна глибина впровадження (δ_{max}) та радіус контакту (a)

– Глибина впровадження зростає пропорційно $v_0^{0.8}$ (майже лінійно). При збільшенні швидкості з 200 до 700 м/с (у 3.5 рази), глибина зростає з 1.61 мкм до 4.39 мкм.

– Важливо зазначити, що при $v_0 = 700$ м/с глибина (4.39 мкм) становить майже 88% від радіуса самої частинки (5 мкм). На таких

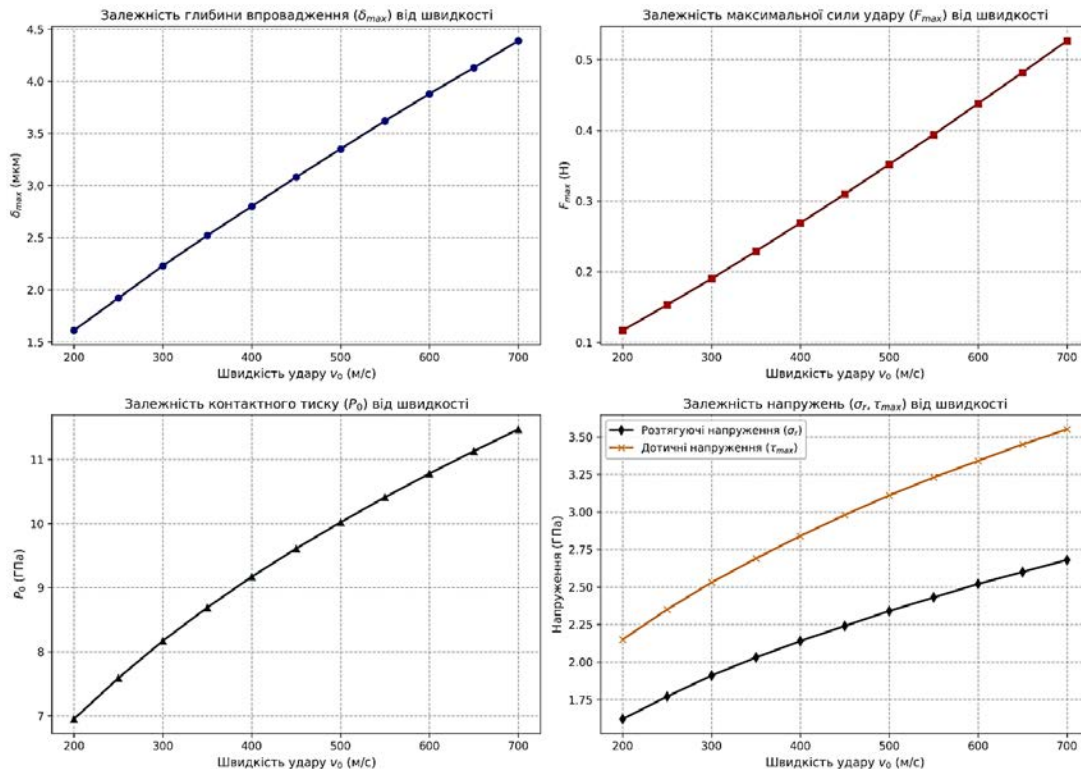


Рис. 3. Залежності основних параметрів контактної взаємодії від швидкості частинки

швидкостях частинка практично повністю занурюється у підкладку.

Максимальна сила удару (F_{max})

– Сила удару має найбільшу чутливість до зміни швидкості: $F_{max} \propto v_0^{1.2}$.

– У діапазоні від 200 до 700 м/с сила удару зростає з 0.117 Н до 0.527 Н (збільшення у 4.5 рази).

Максимальний контактний тиск (P_0)

– Контактний тиск зростає найповільніше: $P_0 \propto v_0^{0.4}$.

– Незважаючи на величезне зростання кінетичної енергії (у понад 12 разів), максимальний тиск зростає лише з ~6.9 ГПа до 11.47 ГПа (збільшення у 1.6 рази). Це пояснюється тим, що при ударі площа плями контакту (a^2) також збільшується, розподіляючи силу по більшій поверхні.

– Тим не менш, навіть тиск 6.9 ГПа вже у десятки разів перевищує межу міцності шамоту. Тиск 11.47 ГПа при 700 м/с гарантує миттєве перетворення матеріалу підкладки (і, найімовірніше, самої частинки WO_3) на дрібнодисперсний пил (тотальна фрагментація).

Розтягуючі та дотичні напруження (σ_r , τ_{max})

– Оскільки напруження прямо пропорційні контактному тиску (P_0), вони також підпорядковуються закону $v_0^{0.4}$.

– Радіальні розтягуючі напруження (σ_r), відповідальні за утворення поверхневих кільцевих тріщин (cone cracks), зростають з 1.62 ГПа до 2.68 ГПа. Оскільки межа міцності шамоту на розтяг становить лише кілька мегапаскалів (МПа), весь цей діапазон швидкостей лежить у зоні **сильного ерозійного зносу**.

Висновки. На підставі проведеного аналізу можна сформулювати такі висновки для прикладних задач:

1. **Ерозійний знос:** Удар частинок WO_3 (та аналогічних за густиною і твердістю) об шамотну футерівку при швидкостях ~200 м/с викликає інтенсивний ерозійний знос. Для захисту футерівки необхідно або знизити швидкість потоку (нижче 50 м/с), або використовувати більш щільні, корундові або карбідокремнієві вогнетриви з модулем Юнга > 300 ГПа.

2. **Формування покриттів:** Якщо метою є осадження WO_3 на шамот (наприклад, методом холодного напилення), то режим 200 м/с є надлишковим для цілісної підкладки, але може бути ефективним механізмом закріплення за рахунок глибокого інденування ("анкерування"), якщо утворений кратер заповнюється фрагментами самої розбитої частинки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Akedo J. Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: densification mechanism of ceramic layers. *Journal of the American Ceramic Society*. 2006. Vol. 89, № 6. P. 1834–1839. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.01030.x.
2. Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding in cold spraying. *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51, № 15. P. 4379–4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X.
3. Chung H., Kim H. J., Lee C. H. Review of the fragmentation and consolidation of ceramic particles in cold spray. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47, № 11. P. 15200–15215. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.02.162.
4. Kliemann J. O. Kinetisches Spritzen von Keramiksichten: Prozessverständnis und Schichteigenschaften: дис. ... д-ра інж. наук. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2011. 145 с.
5. Kliemann J. O., Gärtner F., Klassen T., Kreye H. Formation of cold-sprayed ceramic layers on metal surfaces. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011. Vol. 20, № 1–2. P. 292–298. DOI: 10.1007/s11666-010-9562-4.
6. Papyrin Y., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. Cold Spray Technology. Amsterdam: Elsevier, 2007. 336 p.
7. Schmidt T., Gärtner F., Assadi H., Kreye H. Development of a generalized parameter for cold spray deposition. *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54, № 3. P. 729–742. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
8. Schmidt T., Gärtner F., Assadi H. Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009. Vol. 18, № 5–6. P. 887–896. DOI: 10.1007/s11666-009-9382-7.
9. Yin S., Jenkins R., Lupoi R., Bolot R., Liao H. Impact bonding in cold spraying: A review of the thermal-mechanical mechanisms. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2018. Vol. 43, № 3. P. 200–221. DOI: 10.1080/10408436.2017.1320803.
10. Wang Z., Mao P., Huang C., Yu P., Li W., Yin S. Deposition mechanism of ceramic reinforced metal matrix composites via cold spraying. *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 85. P. 104167. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104167.

REFERENCES:

1. Akedo, J. (2006). Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: densification mechanism of ceramic layers [Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: densification mechanism of ceramic layers]. *Journal of the American Ceramic Society – Journal of the American Ceramic Society*, 89(6), 1834–1839. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01030.x>
2. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H. (2003). Bonding in cold spraying [Bonding in cold spraying]. *Acta Materialia – Acta Materialia*, 51(15), 4379–4394. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X)
3. Chung, H., Kim, H. J., & Lee, C. H. (2021). Review of the fragmentation and consolidation of ceramic particles in cold spray [Review of the fragmentation and consolidation of ceramic particles in cold spray]. *Ceramics International – Ceramics International*, 47(11), 15200–15215. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.162>
4. Kliemann, J. O. (2011). *Kinetisches Spritzen von Keramiksichten: Prozessverständnis und Schichteigenschaften* [Kinetic spraying of ceramic layers: Process understanding and layer properties] (Doctoral dissertation). Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg
5. Kliemann, J. O., Gärtner, F., Klassen, T., & Kreye, H. (2011). Formation of cold-sprayed ceramic layers on metal surfaces [Formation of cold-sprayed ceramic layers on metal surfaces]. *Journal of Thermal Spray Technology – Journal of Thermal Spray Technology*, 20(1–2), 292–298. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9562-4>
6. Papyrin, Y., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., & Fomin, V. (2007). *Cold Spray Technology* [Cold Spray Technology]. Elsevier.
7. Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., & Kreye, H. (2006). Development of a generalized parameter for cold spray deposition [Development of a generalized parameter for cold spray deposition]. *Acta Materialia – Acta Materialia*, 54(3), 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.005>
8. Schmidt, T., Gärtner, F., & Assadi, H. (2009). Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures [Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures]. *Journal of Thermal Spray Technology – Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5–6), 887–896. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9382-7>
9. Yin, S., Jenkins, R., Lupoi, R., Bolot, R., & Liao, H. (2018). Impact bonding in cold spraying: A review of the thermal-mechanical mechanisms [Impact bonding in cold spraying: A review of the thermal-mechanical mechanisms]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences – Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 43(3), 200–221. <https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1320803>
10. Wang, Z., Mao, P., Huang, C., Yu, P., Li, W., & Yin, S. (2024). Deposition mechanism of ceramic reinforced metal matrix composites via cold spraying [Deposition mechanism of ceramic reinforced metal matrix composites via cold spraying]. *Additive Manufacturing – Additive Manufacturing*, 85, 104167. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104167>



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026