

УДК 621.7–539.64

## МОДЕЛЬ НАДГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ МИКРОЧАСТИНОК У МЕТАЛЕВИ МІШЕНІ ПРИ НАДЗВУКОВИХ ШВИДКОСТЯХ

БАСКЕВИЧ О.С. *к.ф.–м.н., с.н.с.*

Науково–дослідна лабораторія хімії і технології порошкових матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко–технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 491–26–30, e-mail: abaskevich@ukr.net, ORCID ID: 0000–0002–3227–5637

**Анотація. Мета.** Побудова механізму та моделі залежності між розмірами мікрочастинок мікронних розмірів, і глибиною надглибокого проникання в сталю мішень при бомбардуванні її мікрочастинками з швидкостями 1–3 км/с. **Методика.** В якості матеріалів для дослідження були обрані: інструментальна сталь Р6М5. Досліджувалися структура, тонка структура і елементний склад мішеней до і після бомбардування. Проведений сумісний аналіз термодинамічних, гідродинамічних та квантово–механічних розрахунків з метою встановлення моделі надглибокого проникання мікрочастинок. **Результати.** Проведений комплекс теоретичних та експериментальних досліджень показав, що при бомбардуванні металевих мішеней мікрочастинками розмірами до 100 мкм відбувається мікросекундне різке зниження в'язкості металу на основі явищ квантової механіки. **Наукова новизна.** Встановлено, що під час бомбардування металів мікрочастинками, які летять з надзвуковою швидкістю, відбувається мікросекундне зниження в'язкості в металевій мішені для визначеного інтервалу розмірів мікрочастинок. **Практична значимість.** Розуміння механізмів надглибокого проникання мікрочастинок дозволить створити для промисловості нові конструкційні матеріали з унікальними властивостями.

*Ключові слова:* надглибоке проникнення; структура; в'язкість; тонка структура; глибина проникнення; час релаксації

## МОДЕЛЬ СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МИШЕНИ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

БАСКЕВИЧ А.С., *к.ф.–м.н., с.н.с.*

Научно–исследовательская лаборатория химии и технологии порошковых материалов, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико–технологический университет», пр. Гагарина, 8, 49005, Днепр, Украина, тел. +38 (095) 491–26–30, e-mail: abaskevich@ukr.net, ORCID ID: 0000–0002–3227–5637

**Аннотация. Цель.** Построение механизма и модели зависимости между размерами микрочастиц микронных размеров, и глубиной сверхглубокого проникания в стальную мишень при бомбардировке ее микрочастицами со скоростями 1–3 км/с. **Методика.** В качестве материалов для исследования были избраны: инструментальная сталь Р6М5. Исследовались структура, тонкая структура и элементный состав мишеней до и после бомбардировки. Проведенный совместный анализ термодинамических, гидродинамических и квантово–механических расчетов с целью установления модели сверхглубокого проникания микрочастиц. **Результаты.** Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований показал, что при бомбардировке металлических мишеней микрочастицами размерами до 100 мкм происходит микросекундное резкое снижение вязкости металла на основе явления квантовой механики. **Научная новизна.** Установлено, что во время бомбардировки металлов микрочастицами, которые летят со сверхзвуковой скоростью, происходит микросекундное снижение вязкости в металлической мишени для определенного интервала размеров микрочастиц. **Практическая значимость.** Понимание механизмов сверхглубокого проникания микрочастиц позволит создать для промышленности новые конструкционные материалы с уникальными свойствами.

*Ключевые слова:* сверхглубокое проникание; структура; вязкость; тонкая структура; глубина проникания; время релаксации

## THE MODEL OF THE SUPERDEEP PENETRATION OF MICROPARTICLES INTO A METAL TARGET AT SUPERSONIC SPEEDS

BASKEVYCH O.S.<sup>1</sup> *Ph. D., Senior Fellow.*

**Annotation. Purpose.** Creation of the mechanism and model the dependencies between the sizes of microparticles of a micron size, and depth of the ultradeep penetration into a steel target at its bombardment with micro–particles with velocities 1–3 km/s.

**Methodology.** As materials for the study were selected: tool steel R6M5. Studied the structure, fine structure and elemental composition of the targets before and after bombing. A joint analysis of the thermodynamic, hydrodynamic and quantum mechanical calculations with the aim of establishing models of superdeep Printania microparticles. **Findings.** The complex of theoretical and experimental studies have shown that in the bombardment of metal microparticles with sizes up to 100  $\mu\text{m}$  occurs microsecond a sharp decrease in the viscosity of the metal based on the phenomena of quantum mechanics. **Scientific novelty.** It is established that during the bombardment of the metal microparticles, which fly at supersonic speed occurs microsecond viscosity loss in metal target for a certain interval of sizes of microparticles. **Practical value.** Understanding of the mechanisms of ultradeep penetration of microparticles will create for the industry new structural materials with unique properties.

**Keywords:** Super-deep penetrating: structure; viscosity, the fine structure; a dept penetrating; time of relaxation

### Введення

Створення матеріалів з прогнозованими властивостями з метою підвищення їх рівня експлуатаційних та технологічних властивостей є однією з найактуальніших задач сучасного матеріалознавства. Розв'язання даної проблеми є перспективним напрямком у зв'язку з можливістю цілеспрямованого створення нових структур металів і сплавів і, як наслідок, одержання нового комплексу фізичних і механічних властивостей. Розробка та застосування нових прогресивних методів зміцнення і мікролегування металів з використанням висококонцентрованих потоків енергії для отримання деталей машин, технологічного оснащення і інструмента використовується в останні 30 років. Одним з найбільш ефективних способів перебудови структури металів є вплив на них імпульсних навантажень. Високі імпульсні навантаження в ході обробки призводять до появи метастабільних структурних комплексів, які не можуть бути однозначно оцінені з позиції статичних і довготривалих процесів. Використання методу Ушеренко, який полягає в надглибокому прониканні тонкодисперсних твердих мікрочастинок діаметром 1–1000 мкм із швидкістю порядку 1 км/с у тверді металеві перешкоди (мішені). При цьому встановлено аномально виділенням енергії, в  $10^2 \dots 10^4$  разів більшою за кінетичну енергію часток в момент їх удару об перешкоду.

Встановлено, що довжина нитковидного каналу в сталі досягала до 200 мм і навіть більше. Розрахунки показали, що кінетичної енергії частки достатньо для проникання в мішень на глибину не більше 6–10 діаметрів самої частки. Виявлений ефект не можливо пояснити з позицій сучасної термодинаміки, електродинаміки, гідродинаміки та квантової механіки, так як відбуваються надшвидкі взаємодії і хімічні реакції для яких класичні закони взаємодії необхідно удосконалювати і описувати їх критичні характеристики [1].

Встановлено, що високий ступінь фізико-хімічної активності твердих тіл і збільшення масштабів перетворень у їхній мікроструктурі відбуваються навіть при слабких енергетичних впливах, але тільки в тому випадку, якщо вихідний стан твердого тіла характеризується великим запасом надлишкової внутрішньої енергії. Із цього погляду особливо показовими є ефекти, виявлені в металах у результаті надглибокого проникання мікрочастинок.

Для пояснення надглибокого проникання мікрочастинок в метали необхідно більш детально розглянути проникання на основі сучасних законів фізики. Основна ідея комплексних обробок складається у фізичних впливах на попередньо дестабілізовану мікроструктуру матеріалів. Як ілюстрація нових результатів, отриманих при використанні комплексу обробок, можуть бути: переходи металу мішені в аморфний стан при одночасній дії високого тиску та опромінення потоками важких іонів [2]; аномально глибоке проникання мікрочастинок у метали з утворенням хімічних елементів, яких не було до взаємодії [3]. Із використанням стандартних експериментальних методик і способів обробки подібні результати в жодному експерименті не були отримані.

### Мета

Таким чином, метою даної роботи є побудова механізму та моделі залежності між розмірами мікрочастинки мікронних розмірів, і глибиною надглибокого проникання в сталю мішень при бомбардуванні її мікрочастинками з швидкостями 1-3 км/с.

### Матеріал

Металеві перешкоди виготовлялися конструкційної сталі Р6М5. Заряди вибухової речовини виготовлялися з амоніту №БЖВ; порошки з мікрочастинок заліза до 125 мкм. Проводився мікрорентгеноспектральний аналіз (РЕММА-102-2); рентгеноструктурний аналіз (ДРОН-2) і ін. Вимір поверхневої щільності зарядів проводилося безконтактним індукційним методом. Обробка експериментальних даних проводилася із застосуванням теорії випадкових помилок. У роботі використано квантово-механічну модель динаміки хімічного зв'язку в полі кулонівського центру.

### Методика і результати

Переміщення мікрочастинки у твердому середовищі на більшій глибині не може бути представлено у вигляді відомих гідродинамічних та інших моделей. Практично відсутній опір прониканню твердих мікрочастинок може бути пов'язаний з аномально низькими значеннями в'язкості металу перешкоди. Дopusкаємо, що в'язкість змінюється тільки в межах зони, обмеженої

поверхнями контакту перешкоди та мікрочастинки. (рис.1).

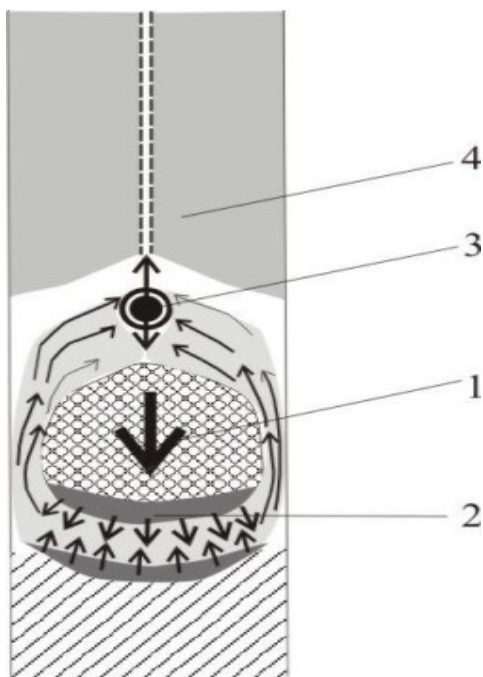


Рис. 1. Модель проникання мікрочастинки в мішень [1]: 1 – мікрочастинка; 2 – плазма; 3 – область співударяння потоків плазми; 4 – канална структура / Model of penetrating of microparticle in a target: 1 is a microparticles; 2 is plasma; 3 is an area of hitting of streams of plasma; 4 is a channel structure

У зв'язку з цими даними виникають припущення про механізм формування плазми як імовірної причини, що викликає стрибкоподібну зміну в'язкості металу

Вибір на користь такого механізму обумовлений результатами аналізу експериментальних досліджень, які представлені в якості декількох аргументів на користь плазмової концепції.

1. Надглибоке проникання на глибини до 200 мм спостерігається тільки у випадку розгону великої кількості мікрочастинок. Для одиночної частинки надглибоке проникання відсутнє.

2. У процесі надглибокого проникання мікрочастинки завжди реєструється сильне електромагнітне випромінювання, що випромінюється із металеві перешкоди, що може свідчити про взаємодію електричних зарядів високої щільності з мікроструктурою мішені.

3. На аномально великі глибини проникають мікрочастинки, у яких початкові розміри не перевищують  $\sim 100$  мкм. Критичний розмір проникаючих часток  $d > 10^{-4}$  м. [4].

4. Проникання мікрочастинки на аномально великі глибини не відбувається, якщо швидкість співударяння мікрочастинки з перешкодою виходить за межі деякого діапазону швидкостей (0,5...3,0 км/с) [1].

5. По мірі проходження мікрочастинки у каналах, що утворюються, відбувається кристалізація нових фаз із елементів перешкоди, мікрочастинки і нових хімічних елементів, які у вихідних матеріалах не виявлялися.

Проведені експерименти по бомбардуванню сталі R6M5 показали, що на поверхні сталі утворюється кратер (Рис.2), а в поперечному розрізі зразка видно треки та сама мікрочастинка (рис.3). В результаті мікрорентгеноспектральних аналізів сталі R6M5 в зонах, що примикають до кратеру і поздовжнього перерізу з'явилися нові хімічні елементи, яких не було в вихідних зразках, а саме: Al змінюється від 2,55 ат.% до 4,25 ат.%; Ti – від 0,06 ат.% до 2,51 ат.%; Ca – від 2,59 ат.% до 5,63 ат.% і Cl – від 0,86 ат.% до 1,96 ат.%.

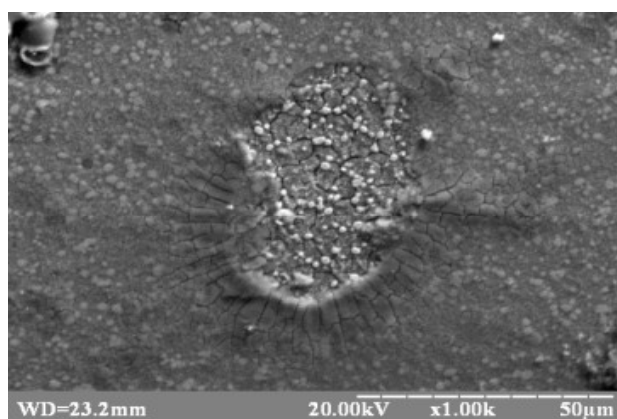


Рис. 2. Кратер та мікроструктура поверхні сталі R6M5 після бомбардування мікрочастинками зі швидкістю 100 м/с / Crater and surface microstructure of steel R6M5 after the bombing of the microparticles at a speed of 1000 m/s

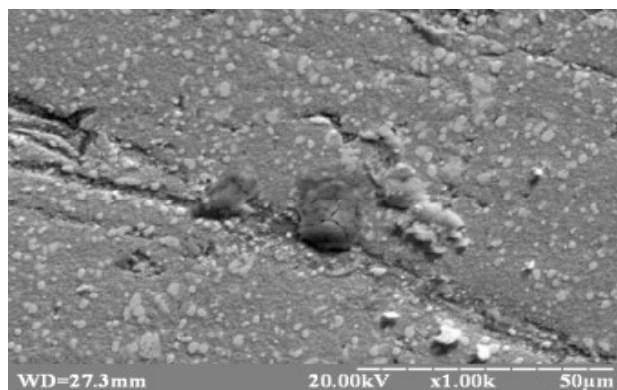


Рис. 3. Мікроструктура поверхні сталі R6M5 після бомбардування мікрочастинками зі швидкістю 1000 м/с (поздовжній переріз) / The microstructure the steel R6M5 surface and the microparticles after the bombing of the microparticles microparticles at a speed of 1000 m/s (longitudinal section)

Проведений рентгеноструктурний аналіз (рис.4) показав, що параметри тонкої структури змінюються в поперечному і поздовжньому перерізах. (таблиця 1,

зразок 1 і зразок 2), а це свідчить про значний вплив на структуру сталей мішеней.

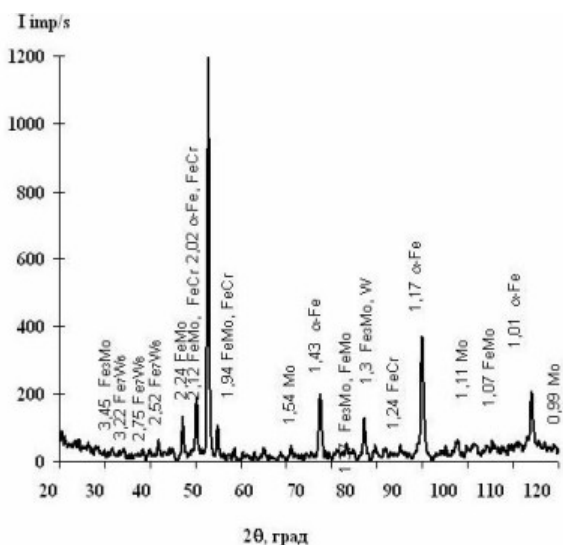


Рис. 4. Рентгенівська дифрактограма поверхні сталі R6M5 до бомбардування мікрочастинками. Co-K<sub>α</sub> випромінювання / Microstructure of the steel R6M5 X-ray diffraction pattern of the surface of the steel R6M5 before the bombing microparticles. Co-K<sub>α</sub> radiation.

Таблиця 1

**Залежність параметрів тонкої структури сталі R6M5 від умов обробки мікрочастинками / The dependence of the parameters of fine structure of steel on the conditions of processing microparticles**

Зразок	Параметр кристалічної решітки, а, нм	Розмір кристалітів, L, нм	Ступінь Мікро-напружень, %*10 <sup>-3</sup>	Густина дислокацій, D*10 <sup>10</sup> , см <sup>-2</sup>
1	0,28691	154,1	1,58	7,50
2	0,28715	149,1	1,27	7,84

Оцінки енергії, витраченої на розгін мікрочастинок, з одного боку, і енергії, необхідної для розриву хімічних зв'язків між атомами перешкоди і для утворення нових елементів, з іншої, відрізняються більш ніж в 10<sup>5</sup> разів, що ставить під сумнів можливість прояву ефекту СГП. Однак сотні експериментів підтверджують стабільний прояв цього ефекту. Спроби пояснити отримані результати в рамках відомих гідродинамічних моделей виявляються неспроможними. Таким чином, очевидним стає завдання пошуку нових фізичних процесів, що стимулюють розрив зв'язків у металі перешкоди і особливо – утворення елементів, які у вихідному стані були відсутні.

Експериментально встановлено, що проникання мікрочастинок на глибини до 200 мкм завжди стабільне, якщо швидкість розгону (кінетична енергія) і розмір мікрочастинок відповідають деяким

граничним значенням. Наступна особливість – мікрочастинки в кумулятивному прискорювачі піддаються стиску, перемішуванню, інтенсивному тертю та розігріву. Розгін мікрочастинок у згустку забезпечує продовження процесу інтенсивного тертя їхніх поверхонь, який утворює на їх поверхні хмару надлишкових електронів. Максимальний час формування згустку мікрочастинок у кумулятивному прискорювачі до 10 мкс. Оцінка температури нагрівання мікрочастинок заліза діаметром 65 мкм проводилася за методикою [4]. Розрахунки нагрівання мікрочастинок від часу показали, що їх максимальна температура не перевищує 600 К, а це означає, що вони взаємодіють в твердому стані. Аналізуючи отримані закономірності і з урахуванням фізичних характеристик матеріалу мікрочастинок, вибиралася конструкція вибухового кумулятивного прискорювача, призначеного для формування згустку мікрочастинок у заданому інтервалі часу.

Стрибокподібне зменшення в'язкості є наслідком квантово-механічних ефектів. В результаті удару мікрочастинок у перешкоди виникає ударна хвиля, що поширюється зі швидкістю 5100 м/с (для технічного заліза), і відбувається взаємодія фононів з вільними електронами металу та електронами, що утворюють хімічні зв'язки [5,6]. Розрахунок часу звукової хвилі для мікрочастинок діаметром 20...120 мкм склав (2...12)×10<sup>-8</sup>с. Звукові хвилі, випереджаючи мікрочастинки, взаємодіють із хімічними зв'язками і вільними електронами (взаємодія електронів з фононами). Це призводить до того, що електрони на зв'язку і вільні електрони збуджуються, тобто переходять на більш високі енергетичні рівні. А це означає, що енергія зв'язку зменшується на  $\Delta E$  [7]. Переходи електронів можливі з рівня 1/2 на рівень 3/2, з рівня 3/2, на рівень 5/2 і т.д. При цьому переходи супроводжуються випромінюванням квантів енергії. Перехід (розрив хімічних зв'язків) електронів триває  $t_{\text{vozb}} = 10^{-12} - 10^{-13} \text{ c}$ . При цьому релаксація валентних електронів при переході на більше низькі рівні триває  $t_{\text{Relax}} = 10^{-4} - 10^{-5} \text{ c}$ , а релаксація вільних електронів  $t_{\text{Relaxsv}} = 10^{-12} - 10^{-13} \text{ c}$  [5]. Тобто, можна стверджувати, що вільні електрони в цьому випадку відіграють роль донорів енергії, що переходить на хімічні зв'язки, розпушуючи їх. Зв'язки додатково збуджуються та рвуться, частка починає рух у плазмі твердого тіла [8,9]. Порівнюючи  $t_{\text{Relaxsv}}$  і  $t_{\text{Relax}}$ , можна констатувати, що не на всіх хімічних зв'язках встигає відбутися релаксація за час руху мікрочастинок [10]. В якості першого наближення використовували стаціонарну формулу Стокса для ідеального шару  $ma = 6\pi\eta rv$  [11], де  $\eta$  – в'язкість,  $v$  – швидкість мікрочастинок,  $m$  – маса мікрочастинок,  $r$  – радіус мікрочастинок,  $a$  – прискорення мікрочастинок. Розрахуємо величину в'язкості для сталі мішені в межах каналу, по якому рухається мікрочастинка діаметром 65 мкм і

проникає на глибину 0,2 м, маючи середню швидкість 1000 м/с. Результати розрахунків показали, враховуючи змінний характер прискорення, що в'язкість в межах каналу проникнення має змінний характер (рис.5). Понижена в'язкість тримається в межах часу релаксації.

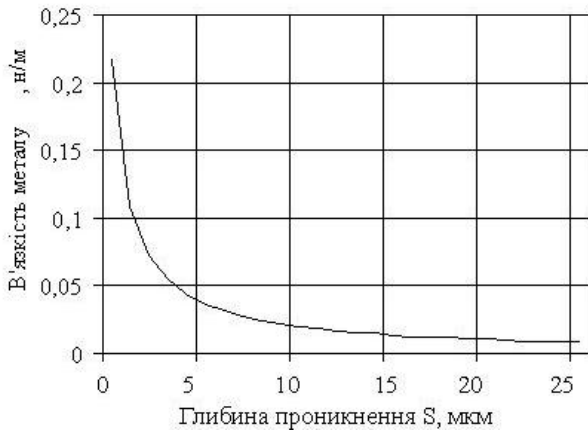


Рис. 5. Залежність в'язкості сталі R6M5 від глибини проникання залізної мікрочастинки розміром 65 мкм, якщо мікрочастинка рухається зі швидкістю 1000 м/с / Dependence of viscosity of steel of R6M5 on the depth of penetration microparticles by a size 65 mkm, that moves with speed a 1000 m/s

Враховуючи нижче наведені викладки і змінюючи розмір мікрочастинок, установили залежність між глибиною проникнення мікрочастинок від їх розмірів (рис.6).

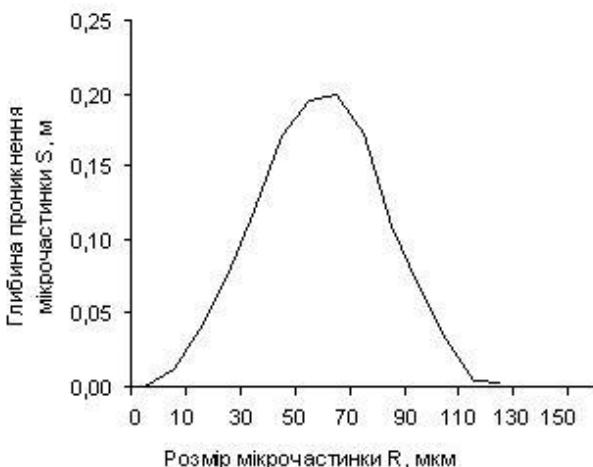


Рис. 6. Залежність глибини проникання мікрочастинок розмірами 5-120 мкм в сталі R6M5, які рухаються зі швидкістю 1000 м/с, від розміру мікрочастинок / Dependence of depth of penetration of microparticles by sizes 5-120 mkm in steel of R6M5, that move with speed a 1000 m/s, from the size of microparticles

Таким чином, для металевих перешкод залежність між глибиною проникання мікрочастинок від їх розмірів має екстремальний характер, який залежить від змінних величин: часу взаємодії, розміру мікрочастинок (до 120 мкм), початкової швидкості мікрочастинок, густини мішені.

### Результати

Проведений комплекс досліджень по визначенню особливостей надглибокого проникнення мікрочастинок заліза показав складний характер залежності від багатьох факторів і встановлено залежність між розмірами частинок, швидкістю частинки і глибиною проникання.

### Наукова новизна і практична цінність

Вперше встановлено, що під час мікро і наносекундних взаємодій мікрочастинок з металевими мішенями відбувається стрибкоподібне зниження в'язкості. Глибина проникнення мікрочастинок має екстремальний характер для частинок з розмірами до 120 мкм. Виділення енергії в каналі проникнення мікрочастинок під час надглибокого проникнення мікрочастинок на три порядки більше ніж при хімічних реакціях. А це при подальшій розробці механізмів дозволить створити нові конструкційні матеріали і нові джерела енергії.

### Висновки

1. Проведений комплекс експериментальних і теоретичних досліджень показав, що глибина проникання мікрочастинок розмірами до 120 мкм має екстремальний характер. При цьому, найбільшу глибину проникнення мають мікрочастинок з розмірами 50–80 мкм.

2. Надглибоке проникання мікрочастинок на глибини до 200 мм спостерігається тільки у випадку розгону великої кількості мікрочастинок і зарядження їх негативними зарядами. Для одиночної частинки надглибоке проникання відсутнє.

3. Ефект надглибокого проникання мікрочастинок базується на квантових ефектах, а саме різниці в інтервалах часу розриву хімічних зв'язків та їх відновлення (релаксації). Оскільки час релаксації на кілька порядків більший за час розриву хімічних зв'язків, то впродовж даного часу в каналі проникнення відбувається різке зниження (стрибкоподібне) в'язкості, і отже проникнення мікрочастинок стає можливим на глибини до 0,2 м.

4. В результаті проходження мікрочастинок у каналах проникання відбувається кристалізація нових фаз із елементів перешкоди, мікрочастинок і нових хімічних елементів, які у вихідних матеріалах не виявлялися.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание микрочастиц в преграды и создание композиционных материалов/ С.М. Ушеренко // – Минск: НИИ импульсных процессов с опытным производством. 1998. – 210 с.
2. Glasmacher U.A. Phase Transitions in Solids Stimulated by Simultaneous Exposure to High Pressure and Relativistic Heavy Ions / Glasmacher U.A., Lang M., Keppler H. et al. // Physical Review Letters, 96, 195701 (17 May 2006).
3. Sobolev, V.V., Usherenko, S.M. Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements / V.V. Sobolev, S.M. Usherenko // Journal de Physique. IV. – 2006. – 134.–P.977–982.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков // Изд-во “Высшая школа”.–1967.–599с.
5. Sobolev V.V. Mechanism of thick metal walls penetration by high-speed microparticles/ V.V.Sobolev, O.S.Baskevych, L.M.Shyman, S.M.Usherenko // Науковий вісник НГУ, № 6.–2016.–С.75–83.
6. Платцман Ф. Волны и взаимодействия в плазме твердого тела / Ф. Платцман, П. Вольф // Издательство «МИР», 1975.– 436 с.
7. Береза О.Ю. Розрахунок енергії хімічного зв'язку фаз, що містять бор у сплавах системи Fe–B–C / О.Ю. Береза, Н.Ю. Філоненко О.С. Баскевич // Наукові вісті національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».–№4(84).–2012.–С.116–120.
8. Чайновт А. Плазма твердого тела / А. Чайновт, С. Бухебаум / УФН.– Т.90, вып.1.–1966.– 179–193 с.
9. Фортов В.Е. Пылевая плазма/ В.Е Фортов., А.Г. Храпак, С.А. Храпак [та ін] // УФН.–Т.174,№5. 2004.– С. 495–544.
10. Blombergen N. Relaxation Effect in Nuclear Magnetic Resonance Absorbtion / N. Blombergen, E.M Purcell., R.V Pound. // Phys.Rev.–V.73,issue 7.–1948.–679–712 p.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа/ Лойцянский Л.Г. // Учебн. Для вузов.–М.:Дрофа, 2003.– 840 с.

REFERENCES

1. Usherenko S.M. Sverchglubokoe pronikanie mikrocastits v pregrady i sozdanie kompozitsionnykh materialov/ S.M. Usherenko // – Minsk: NII impulsnykh processov s opynym proizvodstvom. 1998. – 210 p.
2. Glasmacher U.A. Phase Transitions in Solids Stimulated by Simultaneous Exposure to High Pressure and Relativistic Heavy Ions / Glasmacher U.A., Lang M., Keppler H. et al. // Physical Review Letters, 96, 195701 (17 May 2006).
3. Sobolev, V.V., Usherenko, S.M. Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements / V.V. Sobolev, S.M. Usherenko // Journal de Physique. IV. – 2006. – 134.–P.977–982.
4. Lykov A.V. Teoriia teploprovodnosti / A.V. Lykov // Izd-vo “Vyshaia shkola”.–1967.–599 p.
5. Sobolev V.V. Mechanism of thick metal walls penetration by high-speed microparticles/ V.V.Sobolev, O.S.Baskevych, L.M.Shyman, S.M.Usherenko // Naukovyi vistnyk NGU, № 6.–2016.–С.75–83.
6. Plattsman F. Volny I vzaimodeistviia v plazme tverdogo tela / F. Plattsman, P. Volf // Izdatelstvo «MIR», 1975.–436 с.
7. Bereza O.Yu. Rozrachunok energii chimichnogo zviazky faz, shcho mistiat bor u splavach systemy Fe–B–C / O.Yu Bereza, N.Yu. Filonenko, O.S. Baskevych // Naukovi visti natsionalnogo technichnogo universytetu Ukrainy «Kyivskiy politechnichniy insytut».–№4(84).–2012.–С.116–120.
8. Chainovet A. Plazma tverdogo tela / A. Chainovet, S. Buchenbaum / UFN.– Т.90, vyp.1.–1966.– 179–193 с.
9. Fortov V.E. Pylevaia plazma / V.E Fortov., A.G. Chrapak, S.A. Chrapak [ta in] // UFN.–Т.174,№5. 2004.– P. 495–544.
10. Blombergen N. Relaxation Effect in Nuclear Magnetic Resonance Absorbtion / N. Blombergen, E.M Purcell., R.V Pound. // Phys.Rev.–V.73,issue 7.–1948.–679–712 p.
11. Loitsianskii L.G. Mechanika zhidkosti i gaza/ Loitsianskii L.G. // Uchebn. Dlia vuzov.–М.:Drofa, 2003.–840 p.

*Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В. Г. Верещаком (Україна), д-ром. техн. наук, проф. Л. М. Дейнеко (Україна)*