

УДК 621.7–539.64

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.36.4

## ВИВЧЕННЯ УМОВ ОТРИМАННЯ ДОДАТКОВОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ НАДГЛИБОКОМУ ПРОНИКАННІ МІКРОЧАСТИНОК У МЕТАЛЕВІ МІШЕНІ

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.** Встановити механізм появи додаткової енергії в сталених мішенях під час надглибокого проникання мікрочастинок. **Методика.** В якості матеріалів для дослідження були обрані: сталь 45 та інструментальна сталь Р6М5. Досліджувалася структура і елементний склад мішеней до і після бомбардування. Проведений сумісний аналіз термодинамічних, гідродинамічних та квантово-механічних розрахунків з метою встановлення механізму надглибокого проникання мікрочастинок та появи додаткової енергії. **Результати.** Проведений комплекс теоретичних та експериментальних досліджень показав, що при бомбардуванні металевих мішеней мікрочастинками розмірами до 200 мкм відбувається мікросекундне різке зниження в'язкості металу на основі явищ квантової механіки та локальних ядерних реакцій, які відбуваються за рахунок дестабілізації структури. **Наукова новизна.** Встановлено, що під час бомбардування металів мікрочастинками, які летять з надзвуковою швидкістю, відбувається мікросекундне зниження в'язкості в металевій мішені і відбуваються локальні ядерні реакції та реакції анігіляції в зоні проходження мікрочастинок. **Практична значимість.** Розуміння механізмів надглибокого проникання мікрочастинок і локальних ядерних реакцій дозволить створити для промисловості нові конструкційні матеріали з унікальними властивостями та наблизитися до створення нових джерел енергії.

**Ключові слова:** надглибоке проникнення; структура; теплопровідність; глибина проникнення; локальні ядерні реакції.

## ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ СВЕРХГЛУБОКОМ ПРОНИКАНИИ МИКРОЧАСТИЦ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МИШЕНИ

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.** Установить механизм появления дополнительной энергии в стальных мишенях во время сверхглубокого проникания микрочастиц. **Методика.** В качестве материалов для исследования были выбраны: сталь 45 и инструментальная сталь Р6М5. Исследовалась структура и элементный состав мишеней до и после бомбардировки. Проведенный совместный анализ термодинамических, гидродинамических и квантово-механических расчетов с целью установления механизма сверхглубокого проникания микрочастиц и появления дополнительной энергии. **Результаты.** Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований показал, что при бомбардировке металлических мишеней микрочастицами размерами до 200 мкм происходит микросекундное резкое снижение вязкости металла на основе явлений квантовой механики и локальных ядерных реакций, которые происходят за счет дестабилизации структуры. **Научная новизна.** Установлено, что во время бомбардировки металлов микрочастицами, которые летят со сверхзвуковой скоростью, происходит микросекундное снижение вязкости в металлической мишени и происходят локальные ядерные реакции, и реакции анигиляции в зоне прохождения микрочастиц. **Практическая значимость.** Понимание механизмов сверхглубокого проникания микрочастиц и локальных ядерных реакций позволит создать для промышленности новые конструкционные материалы с уникальными свойствами и приблизиться к созданию новых источников энергии.

**Ключевые слова:** сверхглубокое проникновение; структура; теплопроводность; глубина проникновения; локальные ядерные реакции.

## STUDY OF TERMS OF RECEIPT OF ADDITIONAL ENERGY AT SUPER-DEEP GETTING OF MICROPARTICLES TO METALLIC TARGETS

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

**Annotation. Purpose.** To set the mechanism of appearance of additional energy in steel targets during the super-deep penetrating of microparticless. **Methodology.** As materials for research were chosen: steel 45 and instrumental steel of P6M5. A structure and element composition of targets was investigated before and after bombardment. Conducted joint analysis of thermodynamics, hydrodynamic and квантово- of mechanical calculations with the purpose of establishment of mechanism of the super-deep penetrating of microparticless and appearance of additional energy. **Findings.** The conducted complex of theoretical and experimental researches showed that at bombardment of metallic targets microparticless by sizes to 200 мкм takes place the микросекундное fall-off of viscosity of metal on the basis of the phenomena of quantum mechanics and local nuclear reactions, that take place due to destabilization of structure. **Scientific novelty.** It is set that during bombardment of metals microparticless that fly with supersonic speed, there is the микросекундное decline of viscosity in a metallic target and there are local nuclear reactions, and реакції анигиляції in the zone of passing of microparticless. **Practical value.** Understanding of mechanisms of the super-deep penetrating of microparticless and local nuclear reactions will allow to create for industry new construction materials with unique properties and to get around creation of new energy sources.

**Keywords:** super-deep penetration; structure; heat conductivity; depth of penetration; local nuclear reaction.

## Вступ

Цілеспрямоване створення матеріалів з підвищеними властивостями з метою збільшення їх рівня експлуатаційних та технологічних властивостей, а також для здешевлення їх виробництва є однією з найактуальніших задач сучасного матеріалознавства. Розв'язок даної проблеми є перспективним напрямком у зв'язку з можливістю цілеспрямованого створення нових структур металів і сплавів і, як наслідок, одержання нового комплексу фізико-хімічних і механічних властивостей. Одним із методів для збільшення фізико-хімічних властивостей поверхневого шару є використанням висококонцентрованих потоків енергії, а саме метод вибухового легування поверхні мікрочастинками різного складу. При використанні даного методу відбувається явище надглибокого проникання речовини (НГПР). Одним з найбільш ефективних способів перебудови структури металів є вплив на них імпульсних навантажень. Граничні імпульсні навантаження в ході обробки призводять до появи метастабільних структурних комплексів, які не можуть бути однозначно оцінені з позиції статичних і довготривалих процесів. Вивчення явища НГПР показало, що тонкодисперсні тверді мікрочастинки діаметром 1–500 мкм, які рухаються зі швидкістю 1–3 км/с проникають у тверді металеві перешкоди (мішені) на глибини до 10000 їх діаметрів, а 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 мікрочастинки. Оцінка енергії, необхідної для проникання мікрочастинок встановила аномальне виділення енергії, яка в  $10^2 \dots 10^4$  разів більша за кінетичну енергію мікрочастинок в момент їх удару об перешкоду.

Відомо, що структура металів і сплавів змінюється під впливом дії ударних хвиль, створених під час співударяння високошвидкісного потоку мікрочастинок з урахуванням термодинамічних, гідродинамічних та квантово-механічних явищ [1–4]. Зміна структури мішені носить локальний характер, оскільки, в явищі НГПМ беруть участь близько 1%

мікрочастинок. Частинок які проникають в мішень утворюють систему частково залікованих каналів. Канали мають складну структуру.

Встановлений ефект не можливо пояснити з позицій сучасної термодинаміки, електродинаміки, гідродинаміки та квантової механіки, так як механізми надшвидких взаємодій і хімічних реакцій необхідно удосконалювати та описувати їх критичні характеристики.

Для пояснення процесів надглибокого проникання мікрочастинок в метали необхідно розглянути проникнення на основі відомих законів фізики. Основна ідея складається у визначенні фізичних впливів на попередньо дестабілізовану мікроструктуру матеріалів. Такі впливи призводять до того, що кристалічні структури металу мішені після охолодження переходять в аморфний стан при одночасній дії високого тиску та опромінення потоками важких іонів [5]; аномально глибоке проникання мікрочастинок у метали з утворенням хімічних елементів, яких не було до взаємодії [4].

## Мета

Таким чином, мета даної роботи заключається у вивченні механізму НГПР та встановленні залежності між параметрами мікрочастинок мікронних розмірів та глибиною надглибокого проникання в стальну мішень при бомбардуванні її мікрочастинками з швидкостями 1-3 км/с. Також необхідно встановити механізм утворення нових хімічних елементів.

## Матеріали

Металеві перешкоди виготовлялися конструкційної сталі Р6М5, Сталі 45. Заряди вибухової речовини виготовлялися з амоніту №6ЖВ; порошки з мікрочастинок заліза до 125 мкм. Проводився рентгеноспектральний аналіз (Princeton Gamma-Tech); 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

Дослідження надглибокого проникання складається із декількох етапів. Перший етап – це дослідження впливу умов кумулятивного вибуху на глибину проникнення мікрочастинок в мішень. На рис. 1 показано схему кумулятивного заряду [4]:

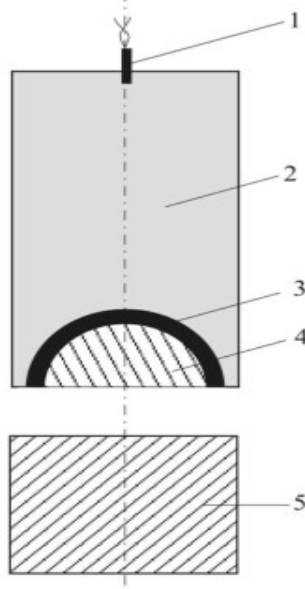


Рис. 1. Схема вибухового генератора плазмових струменів: 1 – електродетонатор; 2 – вибухова речовина; 3 – пластина-ударник; 4 – конічна виїмка; 5 – сталеві матриця./ Scheme of an explosive generator of plasma jet: 1 – electrical detonator; 2 – explosive substance; 3 – drum plate; 4 – conical groove; 5 – steel matrix.

Після вибуху мікрочастинок прискорюються в напрямку до сталеві мішені (рис.1). При цьому утворюється пильова плазма з температурою мікрочастинок близько 1000K. Такі частинки пильової плазми стабільні і їх заряд визначається процесами прилипання електронів і іонів. Під час вибуху частинки розганяються до швидкості 3–5 км/с і заряджаються потоками електронів та іонів, а також шляхом фото-, термо-, та вторинної емісії. Емісія електронів може призводити як до позитивного так і до негативного заряду мікрочастинок. Мікрочастинок мають відносно великий розмір частинок (10–150 мкм) і можуть заряджатися до дуже великих зарядів ( $10^2$ – $10^5$  елементарних зарядів). В результаті чого кулонівська енергія взаємодії набагато перевищує теплову енергію мікрочастинок і вступають у взаємодію зі сталеві мішенню. На (Рис.2) показано поверхню Сталі 45 після бомбардування мікрочастинок SiC.

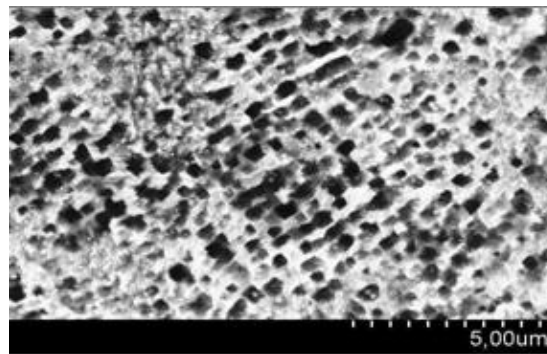


Рис.2 Поперечний переріз сталеві перешкоці біля поверхні./ Cross-section of the obstacle near the surface.

Оцінка енергії мікрочастинок, яка має температуру 1000 K і рухається зі швидкістю 1000 м/с, а також енергії електричних зарядів на їх поверхні недостатньо для розриву хімічних зв'язків між атомами перешкоди і для утворення нових елементів і відрізняються більш ніж в  $10^5$  разів, що ставить під сумнів можливість прояву ефекту НГПР. Розглянемо схему проникнення мікрочастинок в металеві мішень з утворенням плазми, дестабілізованої структури, незалікованого каналу діаметром приблизно 1,5 мкм та зоною утворення нових елементів (рис.3).

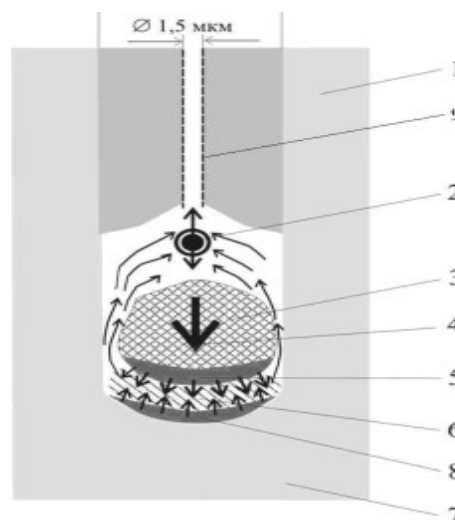


Рис.3. Схема утворення плазми на межі розділу "мікрочастинка-мішень": 1 – зона каналу, який немає нових сполук і фаз; 2 – область співударання потоків плазми; 3 – мікрочастинка-ударник; 4 – напрям руху мікрочастинок; 5 – розігріта поверхня мікрочастинок; 6 – плазма; 7 – вихідна структура мішені; 8 – дестабілізована структура; 9 – область структурних новоутворень в зоні каналу./ The scheme of plasma formation at the interface of the "microparticle–target": 1 – a channel zone that does not have new compounds and phases; 2 – the region of coincidence of plasma stream; 3 – microparticle drummer; 4 – direction of motion of a microparticle; 5 – warmed surface of microparticles; 6 – plasma; 7 – initial target structure; 8 – destabilized structure; 9 – area of structural neoplasms in the canal zone.

Сотні експериментів підтверджують стабільний прояв даного ефекту. Докажемо, що кінетична енергія є недостатньою для утворення плазми. Для оцінки ступеня нагрівання стінок мішені розв'яжемо дві задачі. Перша задача це охолодження кулі радіусом 30 мкм, а друга – нагрівання необмеженого циліндру по якому рухається мікрочастинка. Для цього використаємо диференційне рівняння теплопровідності для симетричної задачі (для кулі) [6]:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (1)$$

де  $(\tau > 0; 0 < r < R)$ .

При граничних умовах:  $T(0, r) = f(r)$ ,  
 $T(R, r) = T_c = const$ ,  $T(0, r) \neq \infty$ ,  $\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0$ , де

$\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності,  $R$  – радіус кулі,  $r$  – поточне значення радіусу кулі,  $\tau$  – час нагрівання.

Для якої розв'язок має вид:

$$T(r, \tau) = \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n^2 J_0^2(k_n R) V_0(k_n r)}{J_0^2(k_n R_0) - J_0^2(k_n R)} \cdot e^{-\alpha k_n^2 \tau} \cdot \int_{R_0}^R r f(r) V_0(k_n r) dr,$$

де  $V_0(k_n r) = J_0(k_n r) Y_0(k_n R) - J_0(k_n R_0) Y_0(k_n r)$ ,

а  $J_0(x)$  – функція Бесселя першого роду нульового порядку,  $Y_0(x)$  – функція Бесселя другого роду нульового порядку.

Для необмеженого циліндру диференційне рівняння теплопровідності має вид:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (2)$$

де  $(\tau > 0; 0 < r < R)$ .

При граничних умовах:  $T(0, r) = f(r)$ ,

$T(R, r) = T_c = const$ ,  $T(0, r) \neq \infty$ ,  $\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0$ ,

а розв'язок має вид:

$$T(r, \tau) = \frac{T(r, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = 1 - \frac{R}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \operatorname{erfc} \frac{(2n-1) - \frac{r}{R}}{2\sqrt{F_0}} - \operatorname{erfc} \frac{(2n-1) + \frac{r}{R}}{2\sqrt{F_0}} \right].$$

Проведені розрахунки показали, що температура кулі в об'ємі біля поверхні зменшується на 100–200K в залежності від розміру, а температура циліндру в об'ємі біля внутрішнього радіуса підвищується від 50 до 100K. Таке мале підвищення температури пояснюється малими проміжками часу взаємодії між мікрочастинкою і мішенню.

У зв'язку з цим встановлено, що механізм формування плазми навколо мікрочастинки повинен мати стрибкоподібну зміну в'язкості металу [7]. Дане твердження обумовлене результатами аналізу експериментальних досліджень, які представлені в якості декількох аргументів на користь плазмової концепції. По перше: надглибоке проникання на глибини до 200 мм спостерігається тільки у випадку розгону великої кількості мікрочастин, а у процесі

надглибокого проникання мікрочастинки завжди реєструється сильне електромагнітне випромінювання, що випромінюється із металевої перешкоди. 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 [4].

В попередніх роботах [2,3,7] встановлено, що стрибкоподібне зменшення в'язкості є наслідком квантово-механічних ефектів. В результаті удару мікрочастинки у перешкоді виникає ударна хвиля, що поширюється зі швидкістю 5100 м/с (для технічного заліза), і відбувається взаємодія фонових з вільними електронами металу та електронами, що утворюють хімічні зв'язки [2,7]. Ця дія і спричиняє короточасне зниження в'язкості. Час зниження в'язкості пропорційний різниці часу релаксації і часу розриву хімічних зв'язків [2–7].

Якщо припустити, що під час надглибокого проникнення відбувається дестабілізація атомів і ядер в області структурних новоутворень (рис.4), то можливий  $K$ -захват ядром орбітального електрона із однієї з найближчих оболонок. Електронному захвату відповідає перетворення протона в ядрі в нейтрон [8,9]:

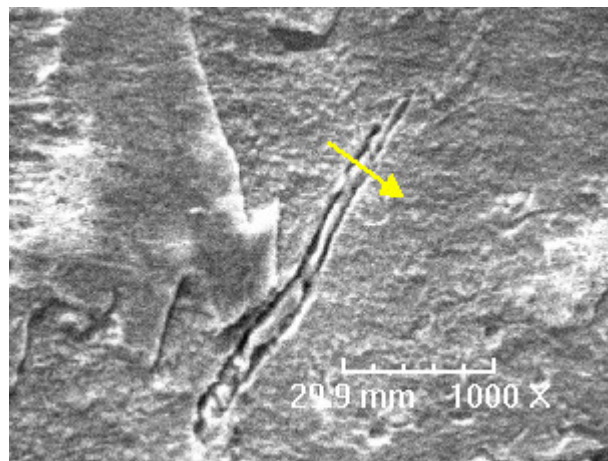
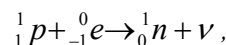
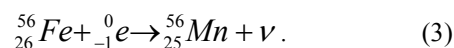


Рис.4. Повздовжній переріз зразка в області проникнення мікрочастинки (область структурних новоутворень в зоні каналу)./Longitudinal section of the region of penetration of the microparticle (the region of structural neoplasms in the channel area).



де  $\nu$  – нейтрино.

Для випадку проходження мікрочастинки в сталій мішені, утворення марганцю відбувається за наступної реакції [8,9]:



Підтвердженням даної реакції є рентгеноспектральний аналіз сталі 45 (Рис.5) вздовж стрілки, зображеної на рис.4.

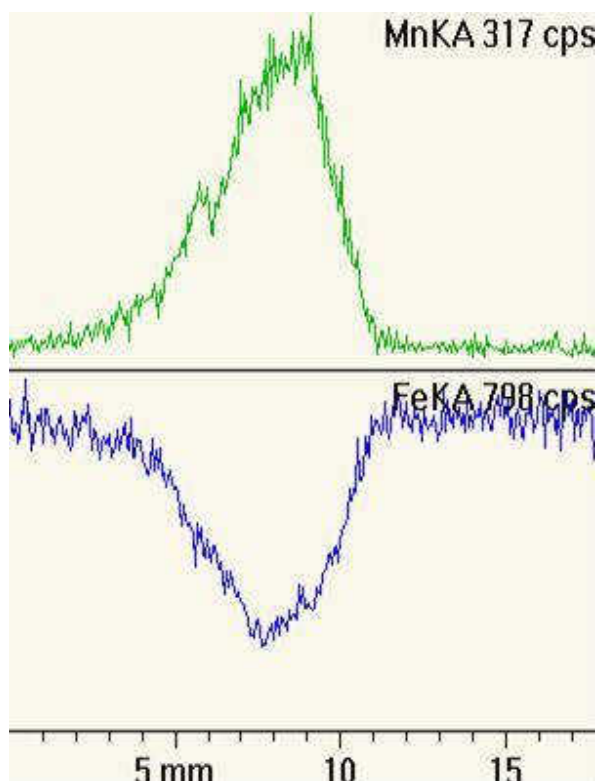
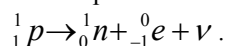
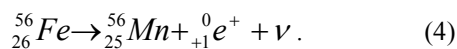


Рис5. Розподіл елементів Mn і Fe вздовж перерізу, який зображений на рис.4.(Princeton Gamma-Tech) /Distribution of elements Mn and Fe along the cross section which is shown in Fig. 4. (Princeton Gamma-Tech)

Крім  $K$ -захвату має ще місце  $\beta^+$  розпад який характерний для ядер, що мають надлишкове число протонів, і при цьому протон перетворюється в нейтрон, позитрон і нейтрино:



Під час  $\beta^+$  розпаду атомний номер ядра зменшується на одиницю, а масове число практично не змінюється:



Вивільнений позитрон вилітає з ядра і взаємодіє з одним із орбітальних електронів в результаті чого відбувається утворення двох  $\gamma$  квантів з енергією по 0,51 Мев кожний. Така реакція називається анігіляцією, а  $\gamma$  – кванти реєструються приладами [10,11]. Енергія, що виділяється під час численних реакцій анігіляції витрачається на ядерні реакції, в

результаті яких відбувається трансмутація елементів та плавлення мішені в зоні проходження мікрочастинки. Підтвердженням даного твердження є результати бомбардування сталених мішеней мікрочастинками різного складу під час яких кількість марганцю збільшується від 0,001 а.о. маси до 45% а.о. маси.

### Результати

Таким чином, можна стверджувати, що під час надглибокого проникнення мікрочастинки відбувається дестабілізація структури мішені в області їх проходження і відбуваються локальні ядерні реакції.

### Наукова новизна і практична цінність

Вперше встановлено, що під час мікро і наносекундних взаємодій мікрочастинки з металевими мішенями відбувається стрибкоподібне зниження в'язкості та локальні ядерні реакції. А це дозволить при подальшій розробці механізмів надглибокого проникнення дозволить створити нові конструкційні матеріали і нові джерела енергії.

### Висновки

1. Проведений комплекс експериментальних і теоретичних досліджень показав, що виділення енергії в каналі надглибокого проникнення мікрочастинки на три порядки більше, ніж при хімічних реакціях.
2. Аномальне виділення енергії відбувається за рахунок сумарної дії локальних ядерних реакцій та взаємодії фононів з матеріалом мішені, які спричиняють стрибкоподібне зменшення в'язкості в каналі проходження мікрочастинки.
3. Після проходження мікрочастинки у каналах проникнення відбувається кристалізація нових фаз із елементів перешкоди, мікрочастинки і нових хімічних елементів, які у вихідних матеріалах не виявлялися.
4. Проведений комплекс досліджень по визначенню особливостей надглибокого проникнення мікрочастинки в залізни мішені показав складний характер залежності, який залежить від багатьох факторів.
5. Пояснення механізму локальних ядерних реакцій дасть змогу створити нові керовані джерела енергії.

### 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. Баскевич А.С. Изучение особенностей сверхглубокого проникания микрочастиц в металлические мишени/ А.С. Баскевич// Вісті Донецького гірничого інституту, №2(41).–2017.–С.182–188.
3. Баскевич О.С. Модель надглибокого проникания микрочастинок у металеві мішені при надзвукових швидкостях/ О.С. Баскевич //В сб.науч. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение»,

- Вып. 95, Серия «Стародубовские чтения 2017» – Днепро, 2017. – С.15–21.
4. 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.
  5. 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).
  6. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков // Изд-во “Высшая школа”.–1967.–599с.
  7. 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.
  8. Широков Ю.М. Ядерная физика/ Ю.М.Широков, Н.П.Юдин//М.:”Наука”, Главная редакция физико-математической литературы.–1980.–728с.
  9. Mukhin K.N. Eksperimental’naia jadernaia fizika/ K.N.Mukhin // M/: Energoatomizdat, Izd.5.–1993.–376 p.
  10. Седов В.Л. Аннигиляция позитронов в металлах/ В.Л. Седов // Успехи физических наук.-Т.94, вып.3.-1968.-С.417-438.
  11. Графутин В.И. Особенности механизма аннигиляции позитронов в муталлах/ В.И.Графутин, Е.П. Прокофьев, Г.Г. Мясищев, Ю.В. Фунтиков//Физика твердого тела.-Т.41, вып.6.-1999.-С.929-934.

#### 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. Baskevich A.S. Izucheniie osobennostei sverkhglubokogo pronikaniia mikrochastitz v metallicheskie misheni/ A.S. Baskevich// Visti Donetskogo girnychogo instytutu, №2(41).–2017.–P.182–188.
3. Baskevich O.S. Model nadglybokogo pronykannia mikrochastynor u metalevi misheni pry hadzvukovykh shvydkostiakh/ O.S. Baskevich //V sb. Nauch. Trudov «Stroitelstvo, Materialovedeniie, Mashinostroieniie», Vyp. 95, Seriiia «Starodubovskiiie chteniia 2017» – Dnipro, 2017. – P.15–21.
4. 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.
5. 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).
6. Lykov A.V. Teoriiia teploprovodnosti / A.V. Lykov // Izd-vo “Vyshaia shkola”.–1967.–599 p.
7. 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.–P.75–83.
8. Shirokov Ju.M. Jadernaia phizika/ Ju.M. Shirokov, N.P. Judin// M.: Glavnaia redaktziia phiziko–matematicheskoi literatury.–1980.–728 p.
9. Mukhin K.N. Eksperimental’naia jadernaia fizika/ K.N.Mukhin // M/: Energoatomizdat, Izd.5.–1993.–376 p.
10. Sedov V.L. Annigiliatsia pozitronov v metallach/V.L.// Uspechi phizicheskikh nauk.- T.94, vyp.3.-1968.-P.417-438.
11. Graphutin V.I. Osobennosti mekhanisma annigiliatii positronov v metallach/ Phisica tverdogo tela.- T.41, вып.6.-1999.-P.929-934.

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