

УДК 621.72+539.65

Баскевич О.С., с.н.с., к.ф.-м.н.,

Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко–технологічний університет”

Соболев В.В., д-р техн. наук, професор

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». м. Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЗМІНИ ЕНЕРГІЇ ЗВ'ЯЗКУ УДАРНИМИ ХВИЛЯМИ ПІД ЧАС НАДГЛИБОКОГО ПРОНИКАННЯ МІКРОЧАСТИНОК В МЕТАЛЕВІ МІШЕНІ

Високоенергетичні методи обробки матеріалів на протязі багатьох років залишаються в числі пріоритетних наукових напрямків, спрямованих на отримання нових функціональних матеріалів зі спеціальними властивостями. 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). Дослідження фазових і структурних перетворень у твердому тілі із застосуванням різних фізичних способів впливу на мікроструктуру свідчать про те, що прості впливи, наприклад, удар, нагрівання, стиск, проходження електричного струму та ін., не приводять до принципово нових результатів. Відомо, що чим менше факторів бере участь в обробці матеріалу, тем менше запасена внутрішня енергія мікроструктури, нижче рівня ентальпії і тим менше ймовірність ефективного управління змінами властивостей. У таких випадках, як правило, кінцевий результат виявляється відносно легко прогнозованим.

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 200мм 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 виділенням 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 [1–8]. Зміна структури мішені носить локальний характер, оскільки, в явищі НГПМ беруть участь близько 1% мікрочастинок. Частинки які проникають в мішень утворюють систему частково залікованих каналів зі складною структурою.

Встановлений ефект неможливо 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 проникання 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. Під час аномально глибокого проникання мікрочастинок у метали утворюються хімічні елементи, яких не було до взаємодії [4].

Переміщення мікрочастинки у твердому середовищі на аномально великі глибини не може бути представлено у вигляді відомих гідродинамічних моделей. Практично відсутній опір прониканню твердих мікрочастинок, на наш погляд, пов'язаний з аномально низькими значеннями коефіцієнту в'язкості металу перешкоди, що в свою чергу залежить від енергії зв'язку атомів.

Припустимо, що ефект надглибокого проникання спричиняє зменшення енергії хімічних зв'язків. Відомо, що руйнування хімічного зв'язку можна здійснити трьома методами:

- збудженням електронів зв'язку (перехід з основного стану в більш високий) (рис.1);
- бомбардуванням хімічних зв'язків вільними електронами (зайві електрони);
- взаємодією електричних зарядів (іонів та електронів) з хімічними зв'язками (рис.2);
- механічним розривом;
- одночасним впливом двох або трьох методів. На практиці, при НГПР, із великою часткою ймовірності одночасно, діють усі методи та підсилюють взаємодію з хімічними зв'язками. Під час НГПР в об'ємі мішені

утворюються як позитивні, так і негативні іони, які і створюють плазму твердого тіла.

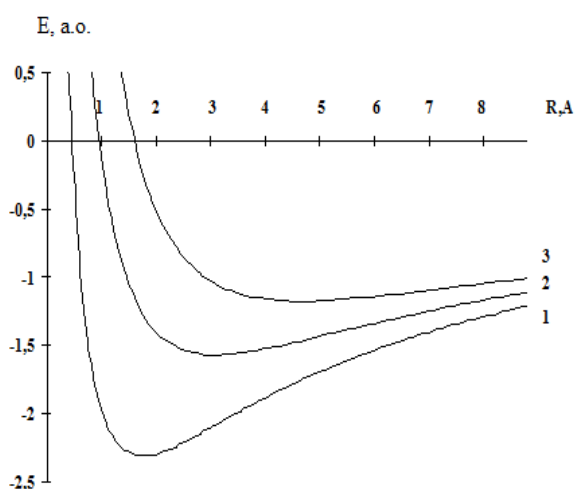


Рис.1. Енергія зв'язку системи Fe–Fe в станах: 1– $\frac{1}{2}, 0, 0$, 2– $\frac{3}{2}, 0, 0$, 3– $\frac{5}{2}, 0, 0$

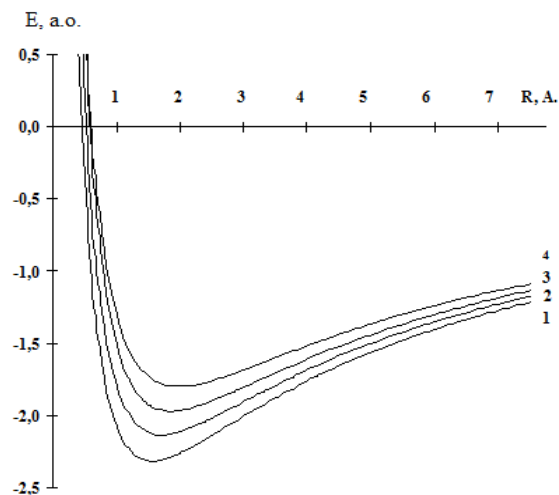


Рис.2. Енергія зв'язку системи Fe–Fe при дії на неї заряду $q=2$ ат.од.на відстанях: 1–5 а.о., 2–4 а.о., 3–3 а.о., 4–2 а.о.

Таким чином, з рис.1–2 видно, що енергія зв'язку при дії на неї різних факторів зменшується, що в свою чергу спричиняє зменшення і інших фізичних параметрів, які пов'язані з нею. Проте, енергія зв'язку зменшується в обмеженому об'ємі на протязі дуже малого проміжку часу, під час якого можливі короткочасні зміни фазового стану. Оцінимо час зміни енергії зв'язку.

Під час удару мікрочастинок об перешкоду виникає ударна хвиля, яка поширюється зі швидкістю 5100 м/с (для мішені з Fe), і відбувається взаємодія звукових хвиль (фононів) з вільними електронами металу та електронами, що утворюють хімічні зв'язки [9]. Розрахуємо час звукової хвилі:

$$t_{zv} = \frac{R}{V} = 0.25 \cdot 10^{-9} \text{ c ,}$$

де:

R – радіус мікрочастинок, V - швидкість мікрочастинок.

При ударі про мішень мікрочастинка різко гальмує, а вільні електрони поверхні спрямовуються вглиб мішені зі швидкістю 1000 м/с. Звукові хвилі, випереджаючи мікрочастинок, взаємодіють із хімічними зв'язками і вільними електронами (взаємодія електронів з фононами) [9]. Це приводить до того, що електрони на зв'язку та вільні електрони збуджуються, тобто переходять на більш високий енергетичний рівень. А це означає, що енергія зв'язку зменшується на ΔE (рис.1.). Перехід електронів на більш високі рівні можливі з

рівня $\frac{1}{2}$ на рівень $\frac{3}{2}$, з рівня $\frac{3}{2}$ на рівень $\frac{5}{2}$ і т.д. Деякі електрони перетворюються в вільні. При цьому переходи супроводжуються випромінюванням квантів енергії. Переходи електронів тривають $t_{\text{vozb}} = 10^{-12} - 10^{-13} \text{ c}$. При цьому релаксація валентних електронів при переході на більш низькі рівні триває $t_{\text{Relax}} = 10^{-4} - 10^{-5} \text{ c}$, а релаксація вільних електронів $t_{\text{Relaxsv}} = 10^{-12} - 10^{-13} \text{ c}$ [8]. Тобто. можна стверджувати, що вільні електрони в цьому випадку відіграють роль донорів енергії, яка переходить на хімічні зв'язки, зменшуючи їх енергію. При цьому можна стверджувати, що зменшення енергії спричиняють декілька факторів, які відбуваються одночасно і накладаються один на одного. Зв'язки додатково збуджуються і рвуться, і мікрочастинка починає рух у плазмі твердого тіла в обмеженому об'ємі, навколо траєкторії її руху.

Проведемо оцінку прискорення мікрочастинки та час її руху в мішені. При глибині проникання частки на 0,2 м її прискорення рівне $a = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$, а час, через який вона зупиниться - $t = 4 \cdot 10^{-4} \text{ c}$. Порівнюючи t і t_{Relax} , можемо констатувати, що не на всіх хімічних зв'язках встигає відбутися релаксація за час руху мікрочастинки.

Таким чином, можна стверджувати, одним із ключових факторів надглибокого проникання мікрочастинок в металеві мішені є фактор різниці між часом розриву хімічних зв'язків та їх релаксацією (утворенням) нових хімічних зв'язків, яка приблизно дорівнює часу релаксації хімічних зв'язків.

На основі даних припущень можна зробити наступні припущення:

1. Мікрочастинка, яка вилітає при кумулятивному вибуху являє собою плазмову частку, що містить як позитивні, так і негативні іони на своїй поверхні, а при взаємодії з молекулами повітря відбувається додаткове збільшення числа елементарних зарядів до $10^4 - 10^5$.

2. Під час зіткнення з мішенню мікрочастинка різко гальмує і електронна хмара спрямовується вглиб перешкоди. Однак поперед частки рухається звукова хвиля (фонони) зі швидкістю 5100 м/с (для сталі). Фонони взаємодіють із хімічними зв'язками і вільними електронами всередині металу. Це приводить до зменшення хімічних зв'язків або їх руйнування.

3. Мікрочастинки налітають на ці вільні електрони і хімічні зв'язки електрони мікрочастинки рвуть хімічні зв'язки, завдяки високій енергії $T=10000\text{K}$, $P=$, Оскільки, хімічні зв'язки зруйновані, то іони перебувають деякий час в іонному стані (плазма твердого тіла) або квазіплазмі, подібної рідкого стану. При цьому опір стає незначним і мікрочастинка рухається як у квазірідині. Проведений розрахунок коефіцієнту в'язкості становить 0,05–0,065 н/м [5].

4. Після проходження мікрочастинки відбувається релаксація хімічних зв'язків.

5. Мікрочастинка залишає після себе турбулентний слід, подібний руху в рідині. Турбулентний слід починає кристалізуватися, а оскільки швидкість кристалізації більша від швидкості руху квазірідини, то повністю циліндр не заповнюється і залишається вузький циліндр (слід). Структура закристалізованого турбулентного сліду різко відрізняється від структури самої мішені завдяки високій швидкості кристалізації.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Sobolev V.V. Shock wave use for diamond synthesis / V.V. Sobolev, Y.N. Taran, S.I Gubenko // Journal de Physique IV. Colloque. – 1997. – PP.73-75.
2. Glasmacher U.A. Phase Transitions in Solids Stimulated by Simultaneous Exposure to High Pressure and Relativistic Heavy Ions / U.A. Glasmacher, M. Lang, H. Keppler // Physical Review Letters, 2006. – 96, 195701 (17 May 2006).
3. Sobolev, V.V. Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements / V.V. Sobolev, S.M Usherenko // Journal de Physique. IV. – 2006. – 134.– PP.977 – 982.
4. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание микрочастиц в преграды и создание композиционных материалов. – Минск: НИИ импульсных процессов с опытным производством. 1998. – 210 с.
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, 2016. – № 6. – С.75-83.
6. Баскевич О.С. Модель надглибокого проникання мікрочастинок 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.
7. Баскевич А.С. Изучение особенностей сверхглубокого проникания микрочастиц в металлические мишени/ А.С. Баскевич // Вісті Донецького гірничого інституту, 2017. – №2(41). – С.182–188.
8. Баскевич О.С. Вивчення умов отримання додаткової енергії при надглибокому прониканні мікрочастинок у металеві мішені/ О.С. Баскевич //В сб.науч. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», Вып. 104, Серия «Стародубовские чтения 2018» – Днепро, 2018. – С.36–41.
9. Займан Дж. Электроны и фононы / Изд-во ИЛ., 1962. –.488 с.