

УДК 669.017; 621.7.044.2

Драгобецький В. В.  
Наумова О. О.  
Лотоус В. В.

## ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ТА СИНТЕЗУ ОБ'ЄМНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ ВИБУХОМ

Ударно-хвильове навантаження є ефективним і унікальним способом створення високого тиску, високої швидкості деформації й охолодження й може використовуватися як метод зміни механічних властивостей зі зміною структури й одержання конструкційних наноструктурних матеріалів.

Нові технології поверхневого зміцнення металевих матеріалів, що використовують концентровані потоки енергії, знаходять все більше застосування в промисловості. Зростаючі і усе більш різноманітні вимоги до матеріалів, що піддаються руйнуванню за різних умов експлуатації, примушують розробляти нові підходи до обробки поверхні. Найбільш перспективними є імпульсні способи зміцнення. Їх застосування стримується недостатньою вивченістю супутніх фізичних процесів.

Імпульсна дія призводить до істотного подрібнення зерна (у 2... 30 разів), тобто до підвищення ступеню фрагментації структури [1]. Для нових зерен характерна зубчастість меж. Рушійною силою процесів утворення виступів (зубчастості) служить різниця в локальній щільності дефектів по обидві сторони межі зерен. Наявність зубчастості меж є ознакою динамічної рекристалізації.

Таким чином, після імпульсної дії в сталях спостерігаються структурні ознаки двох процесів: високошвидкісної зрушуючої мікропластичної деформації по механізму двійникування і динамічної рекристалізації.

Для інструментальних сталей встановлено: після імпульсної обробки площа, яку займає карбідна фаза, збільшилася в 1,5 рази при одночасному подрібненні карбідних включень в середньому з 1,44 до 1,15 мкм. Встановлено також, що пластична деформація сприяє розпаду цементиту і переходу вуглецю в твердий розчин. Отже, процеси мікропластичної деформації, що протікають при імпульсному зміцненні, сприяють інтенсивнішому розчиненню карбідної фази і перерозподілу вуглецю в матриці. Зменшення розміру зерен карбідної фази, збільшення її площі і міри дисперсності в матриці сталі приводять до зростання в'язкості [1].

Ефект збільшення пластичності обумовлений також [1–7]:

- більше рівномірним і однорідним протіканням деформації за усім обсягом оброблюваної деталі;
- високошвидкісним розігріванням об'ємів деталі, що деформуються, вихровими струмами до температур порядку 250...350 °С, що прискорює деформаційні і дифузійні процеси;
- значним зниженням вірогідності виникнення в металі прихованих дефектів типу внутрішніх порушень суцільності.

Використання енергії конденсованих і газових вибухових речовин для синтезу матеріалу й модифікації матеріалу в ряді випадків набагато ефективніше традиційних технологій високих тисків у статичних умовах.

Метою дослідження є експериментальне та теоретичне обґрунтування можливості отримання об'ємних нано- та ультрадисперсних конструкційних матеріалів та покриттів при вибуховому навантаженні.

Найбільш повно досліджено ударне навантаження металів з максимальним тиском порядку 100 ГПа. У ряді досліджень установлені значні структурні зміни в крупнокристалічній міді при навантаженні тиском до 70 ГПа при різних швидкостях деформації [2, 3]. При ударному тиску вище певної граничної величини (30 ГПа) відбувається як гомогенне,

так і гетерогенне деформування. Це виражається в утворенні в зернах паралельних шарів шириною  $\approx 1 \div 2$  мкм із переходом  $1 \div 10$  мкм [4]. Для алюмінію аналогічні результати отримані при навантаженні  $\approx 10$  ГПа [4].

При ударно-хвильовому навантаженні відбувається інтенсивна пластична деформація, що досягає десятків відсотків за дуже короткий час ( $10^{-6} - 10^{-7}$  с). Утворення наноструктур у таких умовах підтверджене дослідженнями часток розміром у кілька мікрометрів при їх зіткненні з мішенню у технологічних процесах «холодного» газодинамічного, детонаційного й кавітаційного напилювання.

Пластичну деформацію частки при високошвидкісному зіткненні з недеформованою мішенню слід розглядати на основі закону збереження енергії або зміцнення руху, як це передбачається в роботах [3, 4]. Однак запропоновані рівняння не враховують дію зовнішніх масових сил, зовнішніх поверхневих сил, напруг при деформації частки. Рівняння збереження механічної енергії переважніше використовувати у вигляді:

$$\iiint_W \rho \vec{F} v dW + \iint_{\Sigma} \vec{\sigma}_n v d\Sigma = \iiint_W \sigma_{ik} e_{ik} dW + \frac{d}{dt} \iiint_W 0,5 \rho v^2 dW, \quad (1)$$

де  $W$  – матеріальний обсяг;

$\Sigma$  – поверхня, що обмежує матеріальний обсяг;

$\rho \vec{F} dW$  – зовнішні масові сили;

$\vec{\sigma}^n d\Sigma$  – зовнішні поверхневі сили;

$v$  – переміщення точки додатку поверхневих сил;

$\sigma_{ik}$  – напруги.

Процес фрагментації зерен при інтенсивній пластичній деформації (ІПД) можна розрахувати за допомогою рівняння (1) при знанні енергії, необхідної для дроблення зерен.

У рамках досліджень по інтенсивній пластичній деформації ДонФТІ показано, що збільшення тиску в осередку інтенсивної пластичної деформації приводить не тільки до стримання процесу руйнування матеріалу, але й підвищенню процесу фрагментації при вибухотермічній обробці, при цьому розміри зерен зменшуються приблизно в 10 раз і більш. Ударні хвилі в металах сприяють разорієнтації внутрішньозеренної структури вихідної пластичної матриці інтенсифікує бейнітні перетворення й підвищує температуру початку мартенситного перетворення, помітно змінює положення точки  $A_{C_1}$ .

Процес фрагментації зерен при ІПД можна розрахувати за допомогою рівняння (1), тобто в рамках фізичної механіки тіл, що деформуються. Ряд авторів [4–7] вважають, що для опису процесів інтенсивної пластичної деформації необхідно використовувати методи фізико-хімічної механіки матеріалів з використанням реологічних рівнянь стану й теорії індивідуальних дислокацій.

Згідно з положеннями цієї теорії рух часткових дислокацій приводить до фрагментації кристала. Зі збільшенням ступеня деформації розміри фрагментів зменшуються. Крім того фрагменти витягаються уздовж осі макродеформації й сильніше розвертаються друг щодо друга, тобто виникає турбулентність. При інтенсивній пластичній деформації фрагментація є домінуючою модою еволюції дефектної структури. Границі фрагментів служать місцями локалізації пластичних поворотів ґратів. Перехід до ротаційних мод пластичності й виникнення в кристалі можна розглядати базуючись на загальних видах Пригожина-Гленсдорфа про формування «дисипативних» структур у матеріалах, які випробовують інтенсивні зовнішні впливи [3, 4]. Інтенсивна пластична деформація приводить також до аморфізації структури.

Виходячи з того, що утворення нанооб'ємних матеріалів має стохастичний характер, значний інтерес представляє ентропійний підхід до проблеми фрагментації й аморфізації структури матеріалу.

Внаслідок того, що інтенсивна пластична деформація металу протікає в умовах неоднорідності напруженого стану, температури, хімічного потенціалу й багатофазності деформованого середовища. У результаті цього виникають необоротні потоки енергії, наявність яких обумовлює локальне виробництво ентропії.

В остаточному підсумку, розвиток процесу пластичної деформації, який обмежений руйнуванням визначається співвідношенням конкуруючих потоків, що прагнуть зруйнувати метал або перешкоджати цьому. Тобто який потік буде переважним або найбільш імовірним у даних умовах, той і визначить поведінку матеріалу.

Процес пластичної деформації необхідно зв'язати зі зміною ентропії тіла, а умова руйнування можна представити у вигляді:

$$S(\bar{t}) = S(0) + \Delta\bar{S} = S, \quad (2)$$

де  $\bar{t}$  – час руйнування;

$S(0)$  – щільність ентропії в початковий момент часу;

$\Delta\bar{S}$  – критичне значення щільності ентропії при заданому значенні ( $\bar{t}$ ).

При цьому:

$$S(\bar{t}) = \frac{n(\bar{r}, \bar{t})}{T}; \quad S(0) = \frac{n(\bar{r}, 0)}{T}; \quad \Delta\bar{S} = \frac{\Delta\bar{n}}{T}; \quad \bar{S} = \frac{\bar{n}}{T}, \quad (3)$$

де  $T$  – абсолютна температура;

$\bar{n}$  – щільність внутрішньої енергії.

Механічні процеси необхідно розглядати у взаємозв'язку з термічними й структурними процесами, що протікають у деформованому твердому тілі.

Одержання дрібнозернистої структури можливо, як у результаті термічного впливу на деформовані напівфабрикати й деталі при дифузійному відпалі, так і наступної деформації після дифузійного відпалу. При дифузійному відпалі, який пов'язаний із тривалою витримкою сплавів при високих температурах, у результаті якої зменшується ліквідаційна неоднорідність твердого розчину. Дифузійний відпал пов'язаний із протіканням дифузійних процесів, які не встигнули завершитися при первинній кристалізації. Інтенсифікувати процес дифузії, якщо не брати до уваги традиційних методів прискорення дифузії, ефективніше всього дією ударних хвиль високого тиску. Свідченням цього є процеси вибухотермічного зміцнення. Однак можливості цього методу зміцнення ще не використані повною мірою. Для подальшого здрібнювання зерна після гомогенізуючого відпалу необхідно проводити деформацію деталей і напівфабрикатів.

Великими можливостями для варіювання параметрами вибухового навантаження мають процеси обробки за схемою характерної для вибухового плакування. Багатошарові заготовки із прошарками з реакційної суміші можуть бути отримані (до 10 шарів і більш) за один вибух. Це дозволяє при доборі акустичної твердості пластин (трубчастих заготовок) і їх кількості побільшати тривалість дії імпульсу тиску. Крім того, пластини, які розташовані з боку ВВ випробовують багаторазовий ударний вплив. Пластина, що метається ВВ підпадає під вплив дії ударної хвилі й тепловому впливу ударних хвиль. Падіння плоскої ударної хвилі нормально до поверхні навантаження приводить до виникнення тривісного напруженого стану нерівномірного стиску. Максимальні дотичні напруження близькі за значенням прикладеному тиску  $P$ , особливі в тому випадку якщо швидкість поширення фронту детонації  $D$  близька до швидкості пружних хвиль у матеріалі відносний стиск при вибуховому навантаженні в ряді випадків досягає залежно від прикладеного тиску 14–27 %. У такий спосіб пластина, що метається безпосередньо ВВ зазнає не менш інтенсивної пластичної деформації, чим при гарячому куванні. Крім того, загальний тиск ударної хвилі на метал складається з холодної й теплової складових. При тисках 30–50 ГПа нагрівання речовини в ударній хвилі значний і впливає на властивості, особливо для метастабільних сплавів.

Для оцінки температури заготовки після зварювання вибухом передбачається, що різниця між кінетичною енергією пластини, що метається, і кінетичною енергією зварених пластин повністю переходить у тепло й розподіляється по товщині пакета рівномірно. Кількість тепла, що виділилося при метанні пакета із  $n$  пластин при зіткненні із  $n+1$  заготовкою, можна визначити з вираження:

$$Q_{n+1} = \sum_{i=1}^n Q_i + v_c^2 \sum_{i=1}^n \rho_i \delta_i \left( \frac{\rho_{n+1} \delta_{n+1}}{\rho_n \delta_n + \rho_{n+1} \delta_{n+1}} \right), \quad (4)$$

де  $Q_{n+1}$  – кількість тепла, що виділилася на одиницю площі пакета пластин;

$v_c$  – швидкість співударяння пластин;

$\rho_i, \delta_i$  – щільність й товщина пластин ( $i = 1 \dots n, n+1$ ).

При цьому енергією, що виділяється у шві, загубленої при польоті пластин можна зневажити. Максимальна температура на будь-якій відстані у відстані від границі з'єднання (зіткнення) складе:

$$T_{\max} = T_o + 0,5 Q_{n+1} C_{cp}^{-1} \rho_{cp}^{-1} (\pi / 2y)^{-0,5} \cdot \exp(-0,5), \quad (5)$$

де  $C_{cp}, \rho_{cp}$  – середня швидкість звуку й щільність шарів пакета заготовок.

Середня швидкість спаду температури у шві становить  $3-4 \cdot 10^6$  град/с при таких градієнтах температур можливе одержання аморфних матеріалів з розплаву.

Важливим параметром динамічного синтезу є час існування на границі розділу пластин стискаючих напруг. Поставлене завдання вирішено методом характеристик. Облік в'язкопластичних властивостей матеріалів пакета співударяючихся пластин дозволив описати явище загасання амплітуди пружного провісника й релаксацію напруг за його фронтом. Аналіз отриманого розв'язку й експериментальних даних дозволив зробити наступний висновок, що параметри навантаження та тривалість процесу забезпечують синтез алмазоподібних структур.

Встановлено, що тривалість імпульсу при метанні пакета пластин залежно від відстані між пластинами може бути збільшена в 2–10 раз.

Аналіз експериментальних даних наведених у літературних джерелах [4, 7] і результати розрахунків процесу зіткнення пластин, що метаються накладним зарядом ВВ дозволяє зробити припущення про можливість синтезу й алмазоподібних структур при запропонованій схемі навантаження.

Для реалізації процесу динамічного синтезу провели метання пакета із сьома пластинами товщиною 1,5 мм. Матеріали пластин вуглецева сталь (Ст 3) + латунь (Л62) + мідь (ЛЛ2Р) + вуглецева сталь (Ст3) + латунь (Л62) + мідь (М2Р) + сталь (Ст3). Зазор між пластинами склав 1,5 мм. У якості підстави використовувалася сталева плита з покриттям з карбиду вольфраму. У якості дистанційних елементів застосували циліндричні пластинки з пористого графіту. Поверхні мідних пластин, які співударялися з поверхнею сталевих пластин покривали тонким шаром графіту. Шар графіту наносили м'яким олівцем.

Швидкість детонації вибухової речовини АС-1 (амоніт зварювальний) склала  $3900-4200 \text{ мс}^{-1}$ . Зварений пакет пластин після вибухового навантаження представлений на рис. 3 після зварювання вибухом проводили термоциклічну обробку пакета пластин.

Після розпилювання й хімічного очищення були виділені монокристали алмаза різного фарбування. Максимальні розміри монокристалів 0,5–0,8 мм.

Таким чином, отримані позитивні результати, які підтвердили принципову можливість динамічного синтезу монокристалів алмаза в умовах навантаження відповідних до процесу вибухового плакування.

Виготовлені експериментальні зразки з біметалу мідь-латунь-нержавіюча сталь, алюміній-мідь-карбід вольфраму (рис. 1, а). Мідь з нанопокриттям з графіту, алюмінію, латуні (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Нанокристалічні об'ємні композитні матеріали;:  
а – латунь-мідь-нержавіюча сталь; б – алюміній-мідь-карбід вольфраму

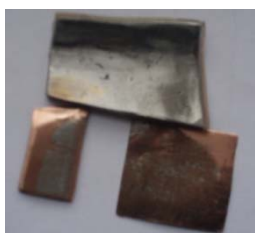


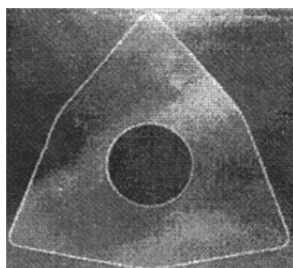
Рис. 2. Локальне легування сталі та міді наночастками латуні, алюмінію та графіту

Розроблені нові технології виробів із шаруватих металевих композицій з прошарками наноплівки графіту та його поліморфних модифікацій.

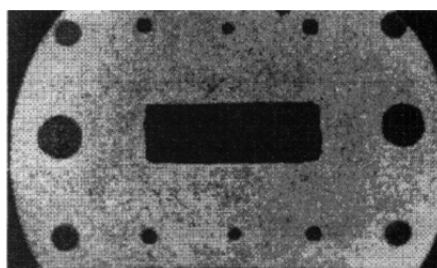
Схема процесу отримання нанокристалічних об'ємних матеріалів відповідає процесу вибухового плакування циліндричних стрижків.

В додаток до цієї схеми на вибухову речовину намотується детонуючий шнур. Це забезпечує виникнення додаткових дотичних напружень.

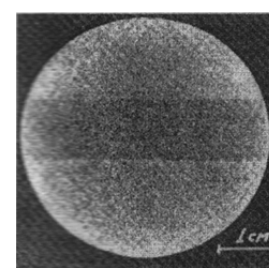
Візуалізація фізико-хімічних процесів при виготовленні нанооб'ємних матеріалів здійснювалося методом хемографії (рис. 3).



а



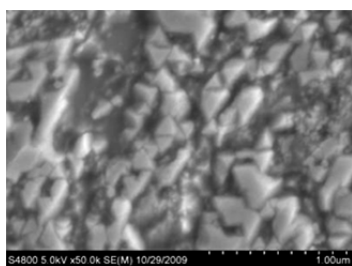
б



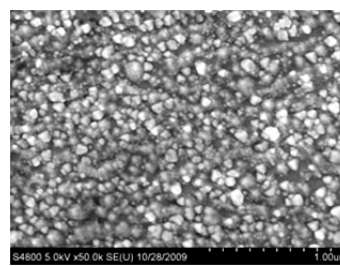
в

Рис. 3. Хемограми деталей, виготовлених з твердого сплаву (а), міді (б) та біметалу латунь-мідь (в)

Типові фотографії мікроструктури міді, що отримані з використанням скануючої електронної мікроскопії, надані на рис. 4, а. Вихідний розмір зерна міді складає 2–43 мкм. Стан поставки вихідного зразку – гарячекатаний пруток.



а



б

Рис. 4. Типові фотографії мікроструктури міді до вибухового навантаження (а) та після вибухового навантаження (б)

Мікроструктура міді, що отримана методом вибухової обробки надана на рис. 4, б. Мікроструктура мідного зразку є макроскопічні однородні та складаються з фактичного рівновісних зерен, середній розмір яких складає  $150 \pm 50$  нм.

### ВИСНОВКИ

На основі експериментальних досліджень встановлені фізичні явища та особливості формування субмікро- і наноструктур в металах при ударно-хвильовому навантаженні у процесах зміцнення та зварювання вибухом. У рамках теорії фрагментації з використанням ентропійного підходу обґрунтована можливість отримання та синтезу наноматеріалів при вибуховому навантаженні.

Обґрунтовані теоретичні положення процесів отримання об'ємних наноконструкційних матеріалів, вибухового легування матеріалів наночастками отриманих за допомогою зварювання вибухом шаруватих композиційних матеріалів з нанопрошарками. Результати аналітичних досліджень реалізовані у вигляді математичної моделі цих процесів.

Встановлено, що на стику процесів зварювання вибухом і вибухового зміцнення для ряду матеріалів можливий процес швидкої кристалізації. І цей процес, імовірно, дає можливість одержання монометалів з поверхневою структурою й властивостями, характерними для біметалів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лотоус В. В. *Новый метод взрывного упрочнения элементов горного оборудования* / В. В. Лотоус, В. Н. Чебенко, В. В. Драгобецкий // *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва : науково-виробничий журнал*. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Випуск 2 (10). – С. 68–73.
2. Евдокимов В. Д. *Технология упрочнения машиностроительных материалов : учебное пособие-справочник* / В. Д. Евдокимов, Л. П. Клименко, А. Н. Евдокимова ; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Д. Евдокимова. – 2-е изд-е. – К. : ИД «Профессионал», 2006. – 352.
3. *Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов* / А. Я. Багаутдинов, Е. А. Будовских, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
4. Соболев В. В. *Сверхглубокое проникновение микрочастиц в металлы* / В. В. Соболев, С. М. Ушеренко, Н. В. Билан, Л. Ю. Чебенко // *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва : науково-виробничий журнал*. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Випуск 2 (10). – С. 96–105.
5. Соболев В. В. *Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда* / В. В. Соболев // *Доклады НАН Украины*. – 2010. – № 4. – С. 88–95.
6. *Исследование возможности получения новых материалов при помощи импульсных сверхвысоких давлений* / В. К. Борисевич, А. И. Долматов, И. В. Скорченко, А. И. Сабакарь, В. В. Третьяк // *Авиационно-космическая техника и технология : научно-технический журнал*. – X. : «ХАИ», 2012. – С. 7–10.
7. Sobolev V. V. *Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements* / V. V. Sobolev, S. M. Usherenko // *Journal de Physique. IV France*. – 2006. – 134. – PP. 977–982.

Драгобецький В. В. – д-р техн. наук, проф. КНУ ім. М. Остроградського;

Наумова О. О. – асистент КНУ ім. М. Остроградського;

Лотоус В. В. – голова правління ВАТ «Полтавський ГЗК».

КНУ ім. М. Остроградського – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук.

ВАТ «Полтавський ГЗК» – Відкрите акціонерне товариство «Полтавський гірничозбагачувальний комбінат», м. Комсомольськ.

E-mail: [vldrag@kdu.edu.ua](mailto:vldrag@kdu.edu.ua)

Стаття надійшла до редакції 18.11.2013 р.