

УДК 534.26

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250619.13.316

НАНОМОДИФІКУВАННЯ СТРУКТУРИ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ У РЕЖИМІ НАДГЛИБОКОГО ПРОНИКНЕННЯ

БАСКЕВИЧ О. С.^{1*}, к. ф.-м. н., с. н. с.,
СОБОЛЕВ В. В.², д. т. н., проф.,
УШЕРЕНКО С. М.³, д. т. н., проф.

^{1*} 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

² Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38(050)342-61-98, e-mail: velo1947@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1351-6674

³ Кафедра порошкової металургії, зварювання і технології матеріалів, Білоруський національний технічний університет, вул. Я. Коласа, 24, 220013, Мінськ, Республіка Білорусь, e-mail: usherenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3227-5637

Анотація. *Мета дослідження* – встановити механізм надглибокого проникання речовин та залежності між параметрами мікрочастинок мікронних розмірів і глибиною надглибокого проникнення в армовані волокна. *Методика.* Як зразки для досліджень матричного матеріалу використовували мідь, латунь, алюмінієвий сплав АК12 і піддавали його динамічній обробці в режимі надглибокого проникнення. Шліфи до і після обробки досліджували за допомогою електронної мікроскопії, мікроаналізу, рентгеноструктурного та фазового аналізу, маспектрометрії та інших фізичних методів. *Результати.* У сплавах різногустинних кольорових металів у режимі надглибокого проникнення реалізоване об'ємне легування деталей як за рахунок застосування струменя мікрочастинок різних складів, так і за рахунок синтезу нових хімічних елементів та їх ізотопів. Використання надглибокого проникнення дозволило створити високолеговані сплави кольорових металів з концентрацією легуючих елементів від 0,35 мас. % до 26 мас. %. *Наукова новизна.* Встановлено, що під час бомбардування кольорових металів мікрочастинами різного складу, що летять із надзвуковою швидкістю, відбувається мікросекундне зниження міцності металеві мішені та локальні ядерні реакції в зоні проходження мікрочастинок. *Практична значимість.* Розуміння механізмів надглибокого проникнення мікрочастинок та реакцій їх взаємодії дозволить за частки секунди створювати для промисловості нові конструкційні матеріали з унікальними властивостями.

Ключові слова: надглибоке проникнення; структура; кольорові метали; мікрочастинка; міцність

НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ

БАСКЕВИЧ А. С.^{1*}, к. ф.-м. н., с. н. с.,
СОБОЛЕВ В. В.², д. т. н., проф.,
УШЕРЕНКО С. М.³, д. т. н., проф.

^{1*} Научно-исследовательская лаборатория химии и технологии порошковых материалов, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, 49005, Днепро, Украина, тел. +38 (097) 491-26-30, e-mail: abaskevich@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3227-5637

² Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. Яворницкого, 19, 49005, Днепро, Украина, тел. +38(050) 342-61-98, e-mail: velo1947@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1351-6674

³ Кафедра порошковой металлургии, сварки и технологии материалов, Белорусский национальный технический университет, ул. Я. Коласа, 24, 220013, Минск, Республика Беларусь, 220013, e-mail: usherenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3227-5637

Аннотация. *Цель исследования* – установить механизм сверхглубокого проникания веществ и зависимости между параметрами микрочастиц микронных размеров и глубиной сверхглубокого проникания в армированные волокна. *Методика.* В качестве образцов для исследований матричного материала использовали медь, латунь, алюминиевый сплав АК12 и подвергали его динамической обработке в режиме сверхглубокого проникания. Шлифы до и после обработки исследовали с помощью электронной микроскопии, микроанализа, рентгеноструктурного и фазового анализа, масспектрометрии и других физических методов. *Результаты.* В сплавах разноплотных цветных металлов в режиме сверхглубокого проникания реализовано объемное легирование деталей как за счет применения струй микрочастиц разных составов, так и за счет синтезированных новых химических элементов и их изотопов. Использование сверхглубокого

проникання дозволило створити високолегіровані сплави кольорових металів з концентрацією легуючих елементів від 0,35 мас.% до 26 мас.%. **Научна новизна.** Установлено, що во время бомбардування кольорових металів мікрочастинками різного складу, які летять зі сверхзвуковою швидкістю, відбуваються мікросекундне зниження міцності металургічної мішені та локальні ядерні реакції в зоні проходження мікрочастинки. **Практична значимість.** Розуміння механізмів сверхглибокого проникання мікрочастинки та реакцій їх взаємодії дозволить за доли секунди створювати для промисловості нові конструкційні матеріали з унікальними властивостями.

Ключові слова: сверхглибоке проникання; структура; кольорові метали; мікрочастинка; міцність

NANOMODIFICATION OF STRUCTURE OF NON-FERROUS METALS IN MODE OF SUPERDEEP PENETRATION

BASKEVYCH O.S.^{1*}, Ph. D., Senior Res.,

SOBOLEV V.V.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

USHERENKO S.M.³, Dr. Sc. (Tech.), Prof.

^{1*} Scientific-research laboratory of chemistry and technology of powdered materials, Ukrainian State University of Chemical Technology, 8, Naharina Ave., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 491-26-30, e-mail: abaskevich@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3227-5637

² Department of building, geotechnics and geomechanics, National Technical University "Dnipro Polytechnic", 19, Yavornytskoho Ave., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 342-61-98, e-mail: velo1947@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1351-6674

³ Department of powder metallurgy, welding and technology of materials, Belarussian National Technical University, 24, Ya. Kolasa Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: usherenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3227-5637

Abstract. Purpose. To establish a mechanism of ultra-deep penetration of substances and to establish the relationship between the parameters of microparticles of micronic sizes and the deep penetration into reinforced fibers. Basic factors that determine a competitiveness between the producers of construction materials is a row of such indexes, as creation of new effective technologies of production and materials with the new complex of physical and chemical and mechanical properties, cost of energy cutting on the production of new materials and other. One of economically expedient and competitive directions there is development of new technology of creation of composition materials that can be realized in the conditions of high-energy and dynamic influence on matrix material. An effective physical "instrument" that changes physical parameters in the volume of solid is a process of super-deep penetration of microparticles in metals. **Methodology.** The copper, brass, aluminium alloy AK12 were used as samples for matrix material research and subjected it to dynamic processing in ultra-deep penetration mode. The schiffs before and after treatment were examined using electron microscopy, microanalysis, X-ray and phase analysis, mass spectrometry and other physical methods. **Findings.** In alloys of multi-colored non-ferrous metals in ultra-deep penetration mode, the voluminous doping of parts has been implemented both through the use of microparticles of different compositions and by synthesized new chemical elements and their isotopes. The use of ultra-deep penetration allowed the creation of highly-experienced alloys of non-ferrous metals with a concentration of doping elements from 0,35 mas. % to 26 mas. %. **Originality.** It has been established that during the bombardment of non-ferrous metals microparticles of different compositions there is a microsecond reduction in the strength of the metal target and local nuclear reactions in the microparticle area. **Practical value.** The understanding the mechanisms of ultra-deep penetration of microparticles and reactions of their interaction will allow to create new structural materials with unique properties for the industry. First set that under time micro and nanosecond co-operating of microparticles with metallic targets there are a saltatory decline of viscosity and local nuclear reactions and it will allow at further development of mechanisms of super-deep penetration will allow to create new construction materials and new energy sources.

Keywords: super-deep penetration; structure; non-ferrous metals; microparticles; strength

Вступ

Основні фактори, що визначають конкурентоспроможність між виробниками конструкційних матеріалів, – це низка таких показників, як створення нових ефективних технологій виробництва та матеріалів із новим комплексом фізико-хімічних і механічних властивостей, зниження витрат енергії на виробництво нових матеріалів тощо.

Один з економічно доцільних і конкурентоздатних напрямків – розроблення нової технології створення композиційних матеріалів, яка може бути реалізована в умовах високоенергетичного та динамічного впливу на

матричний матеріал [1]. Ефективний фізичний «інструмент», що змінює фізичні параметри в об'ємі твердого тіла, – це процес надглибокого проникнення (НГП) мікрочастинки у метали [2]. Цей інструмент дозволяє виконати такі завдання:

- ввести мікрочастинки-ударники в об'єм металу на глибину в сотні – тисячі калібрів ударників або синтезувати у твердому тілі нові хімічні елементи, у тому числі різні ізотопи цих хімічних елементів;

- перенести або сконцентрувати легуючі хімічні елементи в локальні довгомірні зони всередині металевої матриці;

- створити в об'ємі довгомірних зон із матеріалу, що вводиться, і матричного матеріалу хімічні сполуки або стійкі метастабільні утворення;

– перетворити довгомірні леговані зони на армовані волокна та сформувати композиційні матеріали.

Глибина проникання легуючого матеріалу за НПП і синтез легуючих елементів у матричному матеріалі, армованому волокнами композиційних матеріалів, головним чином залежить від анізотропії фізичних властивостей в об'ємі [1; 3].

Як матричний матеріал часто використовують алюміній та його сплави, тому що істотні зміни механічних і фізико-хімічних властивостей цієї групи конструкційних матеріалів відбуваються за низьких концентрацій легуючих елементів [4; 5]. Алюмінієві сплави відіграють значну роль у машинобудуванні [5], наприклад, багато елементів конструкцій аерокосмічних апаратів виготовляються зі сплавів алюмінію, включаючи систему алюміній – кремній.

Наявність згустків космічного пилу, що рухаються з високою швидкістю на навколосемній орбіті, вимагає вивчення специфічних змін мікроструктури цих матеріалів за впливу твердих мікрочастинок, що імітують космічний пил. Увага до змін в алюмінієвих сплавах, особливо в умовах тривалих космічних польотів, зумовлена тим, що дефектність структури сплавів визначає рівень фізико-механічних властивостей і суттєво впливає на стійкість функціонування космічного апарата в цілому. Нові фази, що утворюються в сплаві, помітно впливають на його властивості – це хімічні сполуки або інтерметаліди, що утворюються і по-різному підвищують міцність, корозійну стійкість та інші важливі характеристики сплаву. Однак останнім часом знайдено менше десяти таких фаз. Створення таких фаз можливе лише за умови розчинності відповідних елементів в алюмінії [4]. Малі кількості утворених фаз за їх концентрації в частках менше відсотка якісно змінюють комплекс фізико-хімічних властивостей. В цих умовах наномодифікування за рівного або близького хімічного складу суттєво змінює рівень фізико-хімічних властивостей і має добрі перспективи.

Умови, за яких проявляються нові фізичні ефекти, характеризуються впливом будь-якої обробки на «попередньо дестабілізовану мікроструктуру твердого тіла» [6], тобто на мікроструктуру із запасом додаткової внутрішньої енергії. Мікроструктурні зміни, фазові перетворення, синтез елементів і багато інших явищ можна об'єднати однією ідеєю, вперше сформульованою в [6] і підтвердженою експериментально декількома новими ефектами не тільки в [6], а і в працях [1; 7–10]. Так, дія опромінення на попередньо стиснений графіт тиском близько 8 Гпа (область стабільності алмазу) зумовлена переходів графіту в аморфну фазу [7]. У зв'язку із цим зроблено закономірне припущення, що за рахунок подібного фізичного ефекту вдасться створити мікро- і наноматеріали з новими характеристиками або спростити вже наявні технологічні процеси.

Відомо, процес НПП характеризується комбінацією, принаймні діями двох параметрів: інтенсивним електромагнітним випромінюванням і ударно-хвильовим стиском (імпульсним тиском) у діапазоні до 10 Гпа. Мікрочастинки пилу зі швидкістю до 3 000 м/с при зіткненні з матричним матеріалом (мішенню) проникають в об'єм матеріалу на глибини в 100...10 000 середньої величини їх калібрів. В умовах надглибокого проникання пилові частинки пронизують перешкоди, формуючи в них довгомірні (десятьки міліметрів) каналні утворення з діаметром у діапазоні 0,1...2 мкм.

Мета

Мета дослідження полягала у вивченні механізму НПП речовин та встановленні залежності між параметрами мікрочастинок мікронних розмірів та глибиною надглибокого проникнення в армовані волокна, визначення умов їх активації та легування.

Матеріали

Для досліджень зразків як матричний матеріал використовували мідь, латунь, алюмінієвий сплав АК12 і піддавали його динамічній обробці в режимі надглибокого проникнення. Шліфи цих матеріалів до і після обробки досліджували за допомогою електронної мікроскопії, мікроаналізу, рентгеноструктурного та фазового аналізу, маспектрометрії та інших фізичних методів.

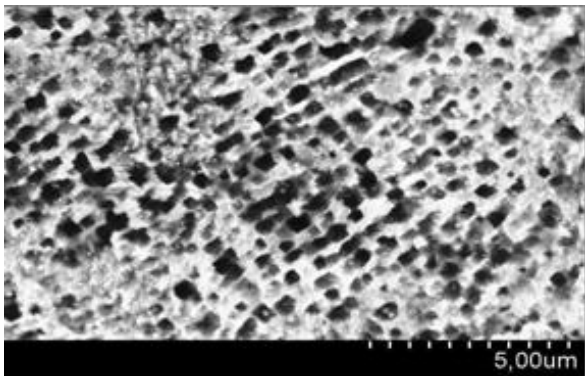
Методика і результати

Як вихідний об'єкт використовували хімічно чисту мідь. Досліджували ступінь хімічної активації як поверхні, так і в об'ємі мідної матриці, прошитої мікрочастинками карбиду кремнію. Вихідні мікрочастинки мали форму, близьку до куба або паралелепіпеда [9]. В результаті за надглибокого проникнення спостерігалися відповідні до форми часток геометричні фігури каналної структури.

У хімічно активних локальних об'ємах мідного зразка (каналних елементів структури) процес травлення прискорювався майже в 100 разів. Активація мікроструктури зумовлена головним чином за рахунок генерації дефектів різного типу та їх походження. За інших рівних умов, використання перешкоди на основі латуні збільшує глибину проникання мікрочастинок утричі (з 60 мм за використання міді до 180 мм у разі використання латуні). Структура вихідної латуні (рис. 1) показує її неоднорідність. Після обробки латунних перешкод згустками мікрочастинок карбиду кремнію, які мали кубічну або близьку до кубічної форму, за одних і тих же режимів надглибокого проникання, як і мідь, спостерігали аналогічні каналні отвори в мішені (рис. 2).



*Рис. 1. Вихідна латунь до динамічної обробки /
Fig. 1. Basic brass is to dynamic treatment*



*Рис. 2. Поперечний переріз мідної перешкоди після
прошивки поверхні / Fig. 2. Cross-section of copper
obstacle is after drilling of surface*

У цьому випадку відбувається синтез і гальмування додаткових легуючих речовин у латуні. Для даного режиму синтезованими легуючими елементами є лантан і церій.

Як об'єкт дослідження використовували сплав Al + 12 % Si. Цей матеріал після введення мікрочастинок свинцю і карбиду кремнію був підданий електрохімічній обробці. Частинки кремнію використані як активатори корозії, а частинки свинцю – як інгібітори та маркери. У режимі НГП частка мікрочастинок, що вводилися не перевищувала мас. частки 0,1 %. Така концентрація достатня для того, щоб значно змінити корозійну стійкість обробленого матеріалу [9]. За результатами досліджень електрохімічних властивостей матеріалів, отриманих у ливарному сплаві Al + 12 % Si, отримано два нові композиційні матеріали. Електрохімічні властивості нових матеріалів суттєво відрізняються один від одного та від вихідного сплаву.

У процесі травлення (0...1 800 хв) встановлено, що найбільшу стійкість має вихідний матеріал. Однак на етапі травлення протягом 980...1 860 хвилин, коли зони впливу, синтезовані при введенні свинцю, утворюють захисну оболонку, стійкість цього матеріалу приблизно на 18 % перевищує стійкість матричного матеріалу і майже на 45 % стійкість матеріалу, сформованого у разі введення SiC.

Частка зон впливу (армованого волокна) не перевищує 11 %. Відповідно, питома корозія цих зон за введення свинцю як мінімум удесятеро нижча питомої корозії вихідного матеріалу. Синтезований матеріал практично не піддається корозії. Питома корозія зон впливу в ливарному сплаві Al + 12 % Si за введення SiC в 5...6 рази вища, ніж у вихідній металевій матриці.

Прошивка алюмінієвої матриці окремими частками спричинює до сильних викривлення у зоні проникання. Встановлено, що розмір каналної зони в поперечному перерізі значно менший вихідного розміру ударника для мікрочастинок із розмірами, меншими 100 мкм [1].

Типова помилка під час вивчення каналних зон – їх сприйняття як порожнин. Це пов'язано з тим, що матеріал каналної зони, як правило, має при приготуванні шліфів травленням суттєво відмінну від матричного матеріалу структуру. Тому, за одного і того ж режиму обробки поверхні шліфа розчинами кислоти або лугу на місці каналної зони виникають порожнини. Спрощено каналну зону можна розглядати як композиційний матеріал, що складається з декількох коаксіально розташованих зон. Тому, якщо поперечний переріз центральної зони прийняти за одиницю, то поперечний переріз зони з дефектною мікроструктурою становитиме 4...10 одиниць. Уздовж даної осі в цій зоні можна спостерігати як аморфну, так і нанокристалічну структуру. В об'ємі цієї ділянки можна також реєструвати результат взаємодії матричного матеріалу.

Дослідження матеріалів, підданих імпульсному впливу згустків пилових частинок, показали істотну перебудову алюмінію і його сплавів на субмікро- і мікрорівнях. Під час вивчення каналної зони, сформованої за НГП, в об'ємі масивної заготовки також виявили «аморфні», нано- і мікроструктурні ділянки [10]. За НГП реалізується комплекс фізичних умов, що забезпечують високий тиск і потоки високоенергетичних іонів. У результаті дослідження глибини проникання мікрочастинками встановлено, що алюмінієва перешкода товщиною 0,1 м зупиняє потік мікрочастинок (фракція 10...100 мкм). Використання ж як матеріалів захисних перешкод сплавів алюмінію з кремнієм та цинком потребує для досягнення тієї ж мети товщин 0,16...0,18 м.

Відомо, що статична і динамічна міцність алюмінієвих сплавів помітно вища технічного алюмінію. Очевидно, що відома залежність глибини пробивання (проникання) для ударника (згустка дискретних часток) від вихідної статичної та динамічної міцності матеріалу перешкоди не дійсна для макрооб'єктів.

У разі зміни складу порошкової суміші, що вводиться, межа міцності і відносне подовження, яке використовували як характеристику пластичності, суттєво змінювалися. Зміна межі міцності сплаву Al + 12 % Si в рамках проведених експериментів спостерігалася в діапазоні від -7,6 % до +33 %. Відносне підвищення пластичності сплаву після НГП

збільшилося в 5...10 разів. Таке підвищення пластичності ливарного сплаву після обробки в режимі НГП являє собою чергову аномалію [10].

Пластичність алюмінієво-кремнієвих сплавів залежить від кількості і властивостей кремнієвих голок. Довжина цілої ділянки голки $\approx 10...12$ мкм. За НГП (тиск 5...10 ГПа) у структурі сплаву Al + 12 % Si спостерігали зміну спрямованості вісей дендритів і дроблення фазових складових: первинних кристалів кремнію і голок кремнистої евтектики. Середній розмір голок становив ~ 30 мкм. Довжина цілої ділянки голки зменшувалася до 2,5...7 мкм. Очевидно, що зменшення довжини цілої ділянки голки в 1,4...5 раз недостатньо, щоб забезпечити підвищення пластичності сплаву Al + 12 % Si від 5 до 10 разів.

Основна причина підвищення пластичності Al + 12 % Si – поперечне дроблення голок. За такої структури голок пластичність буде визначатися не армованим, а матричним матеріалом.

Уведення в сплав композицій на основі свинцю не викликає зміни твердості за глибиною, але змінює хімічний склад і властивості цього матеріалу [10]. У вихідному литому сплаві сумарна концентрація домішок інших елементів не перевищує 0,35 %. Після обробки при аналізі частинки площі поверхні 200×300 мкм сумарна концентрація домішок інших елементів досягає 26 %. При цьому концентрація свинцю за масою досягала 10 %, тобто 1,59 атомних %. Достовірно зафіксована незвична і нерівномірна зміна хімічного складу сплаву АК-12, однак на основі відомих припущень про особливості процесу лиття або удару не вдається пояснити причини таких змін складу в об'ємі металевого сплаву. Очевидно, для пояснення цього ефекту слід використовувати припущення про динамічний масопереніс і синтез нових хімічних елементів за надглибокого проникнення [8]. Саме нерівномірність хімічного складу в об'ємі обробленого сплаву пояснює специфічний характер структури нового композиційного матеріалу, що виявляється за електрохімічного впливу. В таблиці показані результати маспектрального аналізу алюмінієвих зразків до і після обробки згустками свинцевих мікрочастинок.

Поява після НГП локальних зон, легованих цинком (у вихідних матеріалах цинк був відсутній), дозволяє пояснити підвищену корозійну стійкість синтезованого матеріалу.

Таблиця

Концентрація хімічних елементів у різних точках (мас.%) / Concentration of chemical elements is in different points (mas.%)/

№ з/п	Al	Si	Ca	K	Pb
1	61,41	12,44	7,50	3,64	10,54
2	94,64	1,41	0,05	0,06	1,19

№ з/п	Al	Si	Ca	K	Pb
3	69,87	13,43	4,54	3,22	5,49
4	79,49	0,33	0,24	0,07	0,60
5	75,72	2,26	0,27	0,00	1,66
6	1,94	14,48	0,49	3,14	2,35
7	51,30	3,92	0,63	0,00	5,36
8	86,9	12,75	0,00	0,00	0,03
1	2,24	0,88	0,50	0,80	0,00
2	2,17	0,10	0,35	0,01	0,00
3	2,08	0,24	0,00	1,11	0,00
4	0,00	7,65	0,05	1,84	0,00
5	0,00	9,82	7,48	0,06	2,71
6	0,25	76,86	0,25	0,06	0,15
7	0,00	9,93	4,62	0,14	24,08
8	0,01	0,13	0,06	0,00	0,05

Наукова новизна і практична цінність

Розуміння механізмів надглибокого проникання мікрочастинок та реакцій їх взаємодії дозволить за частки секунди створювати для промисловості нові конструкційні матеріали з унікальними властивостями.

Висновки

Динамічне прошивання полікристалічного алюмінієвого сплаву дозволяє за доли секунди сформувати композиційний матеріал. На основі отриманих експериментальних матеріалів можна зробити такі основні висновки:

– за обробки кольорових металів у режимі НГП значно збільшується хімічна активність обробленого металу та прискорюється процес його травлення (на прикладі міді процес прискорюється майже в 100 разів);

– у сплавах міді та алюмінію існує значний градієнт густини в об'ємі. Це і є однією із причин того, що глибина проникання легуючих часток у цих сплавах суттєво (в 2...3 рази) більша, ніж у чистих металах;

– у сплавах різногустинних кольорових металів (мідь і алюміній) у режимі НГП реалізується об'ємне легування деталей як за рахунок уведення струменя мікрочастинок (SiC), так і за рахунок синтезу нових хімічних елементів Zn, ізотопів калію, лантану та церію;

– зміна фізико-хімічних властивостей волоконного армованого матеріалу відбувається за рахунок наномодифікації матеріалу каналних зон: дроблення елементів структури, синтезу додаткових елементів і створення високолегованого метастабільного складу в каналних зонах, наприклад, збільшення концентрації легуючих елементів в алюмінієвому сплаві від мас. частки 0,35 % до мас. частки 26 %.

Отримані результати дозволять установити в подальших дослідженнях механізм надглибокого проникнення в мішені кольорових металів і на їх основі створити нові конструкційні матеріали та нові джерела енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ушеренко С. М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов : монография / С. М. Ушеренко. – Минск : Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством. – 1998. – 210 с.
2. Usherenko S. Superdeep Penetration as the New Physical Tool for Creation of Composite Materials / S. Usherenko, O. Figovsky // Multi-functional Materials and Structures / Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, Proceeding., International Conference on Multifunctional Materials and Structures (July 28–31, 2008). – Hong Kong, P.R. China. – 2008. – Pp. 395–402.
3. Ушеренко С. М. Процесс сверхглубокого проникания. Глава 19 / С. М. Ушеренко, Ю. С. Ушеренко, Е. И. Марукович // Перспективные технологии : коллективная монография под ред. акад. НАН РБ В. В. Клубовича. – Витебск : УО «ВГТУ». – 2011. – 599 с. – С. 442–481.
4. Андрушевич А. А. Особенности структурообразования алюминиевых сплавов под воздействием ступок космической пыли / А. А. Андрушевич, С. М. Ушеренко, А. С. Калиниченко, А. И. Белоус // Материалы I Белорусского космического конгресса. – Минск : ОИПИ НАН Белоруссии. – 2003. – С. 41–44.
5. Марукович Е. И. Изменение свойств алюминиевых сплавов при динамической обработке / Е. И. Марукович, Ю. С. Ушеренко, А. А. Андрушевич // Высокоэнергетическая обработка материалов // Отв. ред. В. В. Соболев. – Днепропетровск : Арт-Пресс, – 2009. – С. 113–126.
6. Соболев В. В. Методы комплексной обработки давлением и их применение для реализации физико-химических превращений в углеродсодержащих материалах : автореф. дис. на соиск. науч. степ. д-ра техн. наук / Соболев В. В. – Краматорск. – 1990. – 32 с.
7. 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 et al. // Physical Review Letters, 96, 195701 (17 May 2006).
8. Ушеренко С. М. Наномодификация армирующих волокон алюминия и его сплавов. Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы : получение, свойства, применение / С. М. Ушеренко, Ю. С. Ушеренко // VI Ставеровские чтения: тр. науч.-техн. конф. с междунар. участием (9–2 сентября 2012, г. Бийск). – Красноярск : Сибирский федеральный университет. – 2012. – С. 98–102.
9. Марукович Е. И. Особенности структурных изменений в меди при динамическом легировании / Е. И. Марукович, Ю. С. Ушеренко // Литье и металлургия. – 2012. – № 4 (80). – С. 120–125.
10. Ушеренко С. М. Формирование новых материалов на основе литейного алюминиевого сплава / С. М. Ушеренко, Е. И. Марукович, Ю. С. Ушеренко, А. И. Белоус, А. Н. Петлицкий // ИФЖ. – 2011. – Т. 84, № 5. – С. 1095–1099.

REFERENCES

1. Usherenko S.M. *Sverkhglubokoie pronikayiiie microchastits v pregrady i sozdaniie kompozitsionnykh materialov* [Superdeep penetration of microparticles to the barriers and creation of composition materials]. Minsk: Research Institute of the Impulsive Processes with an Experience Production, 1998, 210 p. (in Russian).
2. Usherenko S. and Figovsky O. Superdeep Penetration as the New Physical Tool for Creation of Composite Materials. Multi-functional Materials and Structures. 2008 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, Proceeding, International Conference on Multifunctional Materials and Structures (July 28–31, 2008), Hong Kong, P.R. China, 2008, pp. 395–402.
3. Usherenko S.M., Usherenko Ju.S, and Marukovich E.I. *Protsess sverkhglubokogo pronikaniia*. [Process of super-deep penetration. Chapter 19]. *Perspektivnye tehnologii* [Perspective technologies : coll. monogr. edited by the acad. of NAS RB V.V. Klubovicha]. Vitebsk : UO “VGTU”, 2011, 599 p. (in Russian).
4. Andrushevich A.A., Usherenko S.M., Kalinichenko A.S. and Belous A.I. *Osobennosti strukturoobrazovaniia aliuminiievykh splavov pod vozdeisnviem sgustkov kosmicheskoi pyli* [Features of structure formation of aluminium alloys under act of bunch of cosmic dust]. Materials of the first Belarussian spacecongress. Minsk :OИPI NAN Belorussii, 2003, pp.41–44. (in Russian).
5. Marukovich E.I., Usherenko Ju.S. and Andrushevich A.A. *Izmeneniie svoistv aliuminiievykh splavov pri dinamicheskoi obrabotke* [Change of properties of aluminium alloys at dynamic treatment]. *Vysoko-energeticheskaiia obrabotka materialov*. [Highly-power treatment of materials]. Crit. ed. V.V. Sobolev, Dnepropetrovsk : Art-Press, 2009, pp. 113–126. (in Russian).
6. Sobolev V.V. *Metody kompleksnoi obrabotki davlieniem i ikh primeneniie dlia realizatsii fiziko-khimicheskikh prevrashchenii v uglerodosoderzhshchyykh materialakh* [Methods of complex treatment pressure and their application for realization of the physical and chemical converting into carbonaceous materials]. Extended abstract of Doctor’s thesis. Kramatorsk, 1990, 32 p. (in Russian).
7. Glasmacher U.A., Lang M., Keppler H., Langenhorst F., Neumann R., Schardt D. and other. Phase Transitions in Solids Stimulated by Simultaneous Exposure to High Pressure and Relativistic Heavy Ions. Physical Review Letters, 2006, 96, 195701.
8. Usherenko S.M. and Usherenko Ju.S. *Nanomodifikatsiia armiruiushchykh volokon aliuminiia i ego splavov. Ultradispersnyie poroshki, nanostruktury, materialy: polucheniie, svoistva, primeneniie* [Nanomodification of reinforcing filaments of aluminum and his alloys. Superdispersed powders, nanostructures, materials: receipt, properties, application]. VI Staroverovskie reading : Transactions of scientific and technical conference with international participation, on September, 9-12, 2012, Biisk-Krasnoiarisk : Sibirskii federalnyi universitet, 2012, pp. 98–102. (in Russian).
9. Marukovich E.I. and Usherenko Ju.S. *Osobennosti strukturykh izmenenii v medi pri dinamicheskoi legirovani* [Features of structural changes in a copper at the dynamic alloying]. *Litiyo i metallurgia* [Molding and metallurgy]. 2012, no. 4 (80), pp. 120–125. (in Russian).
10. Usherenko S.M., Marukovich E.I., Usherenko Yu.S., Belous A.I. and Petlitskii A.N. *Formirovaniie novykh materialov na osnovie litiinogo aliuminiievyego splava* [Forming of new materials based on cast aluminum alloy]. IFZH, 2011, vol. 84, no. 5, pp. 1095–1099. (in Russian).

Надійшла до редакції 21.05.2019.