

УДК 669.018.45

НАНОСТРУКТУРОВАНІ МІКРОЛАМІНАТИ МІДЬ–СТАЛЬ: ОТРИМАННЯ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

*І. М. НЕКЛЮДОВ, В. М. ВОСВОДІН, С. Ю. ДІДЕНКО,
М. І. ІЛЬЧЕНКО, Ю. С. ДІДЕНКО, Ю. М. ІЛЬЧЕНКО*

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"

Описано еволюцію механічних властивостей багатошарових композитів мідь–залізо з кількістю шарів від 11 до 1620 за відпалу при 750°C. Встановлено, що властивості композитів, які складаються з понад 300–400 шарів, залежать від їх кількості та тривалості відпалу. Експериментально підтверджено можливість створення мікроламініатів з такими механічними і технологічними характеристиками, які суттєво перевищують відповідні матричних металів.

Ключові слова: *багатошарові композити, мікроламініати, структурно-розмірні параметри, механічні властивості.*

Наноструктуровані мікроламініати (МЛ) – різновид багатошарових металевих композитів (БШК), механічні та фізичні властивості яких залежать від товщини шарів матричних металів і перехідних зон між ними під час або після дії на них певних активуючих факторів, зокрема термічних, магнетного та/або електричного полів, гама-випромінювання тощо. Такі композити можуть містити кілька тисяч шарів у розрахунку на 1 mm загальної товщини композита (питома кількість шарів), а відтак, товщина деяких їх структурних компонентів може становити сотні і навіть десятки нанометрів.

Отже, головна визначальна відмінність МЛ від БШК однакового складу полягає в наявності в перших та відсутності у других залежності їх властивостей від структурно-розмірних параметрів, в першу чергу від товщини складників композита. Це стосується не тільки механічних властивостей композитів, але й проявів у них квантово-механічної електрон-електронної та електрон-фононої взаємодій (наприклад, гігантський магнеторезистивний ефект та інші спин-залежні ефекти) [1–4]. Тобто мова йде про можливість створення МЛ з такими властивостями і функціональними характеристиками (механічними, електромагнетними, теплофізичними, дисипативними тощо), які значно перевищуватимуть відповідні БШК або взагалі відсутні у матричних металів.

Однією з головних причин, які зумовлюють відмінності в механічних властивостях МЛ та БШК, є присутність у перших розвинених перехідних зон між шарами матричних металів внаслідок взаємної дифузії їх компонентів під час виготовлення та додаткової термообробки композита. Залежно від типу фазової діаграми стану контактуючих металів ці зони – суцільні шари твердорозчинних фаз, інтерметалевих сполук та/або фаз втілення (оксидів, карбідів, нітридів компонентів матричних металів тощо). Сумарна об'ємна частка зон, що продукуються під час термообробки БШК, може сягати десятків відсотків, тому їх властивості можуть суттєво впливати на відповідні характеристики МЛ. Обираючи певні температурно-часові параметри синтезу армувальних компонентів МЛ, можна отримати композит з комплексом властивостей (перш за все механічних), що значно відрізняються від таких вихідного БШК. Зрозуміло, що у композитах з різною питомою кількістю шарів об'ємні

Контактна особа: С. Ю. ДІДЕНКО, e-mail: sudid@mail.ru

частки перехідних зон, синтезованих за однакових температурно-часових параметрів, будуть різні і пропорційні цій кількості шарів. Таким чином, на ефективність трансформації вихідних БШК у МЛ впливають два взаємопов'язані чинники – питома кількість шарів у БШК та температурно-часові параметри їх термообробки.

Звідси випливає, що для кожного конкретного композита в координатах “питома кількість шарів–температура–час–властивість” існує певна межа, яка відділяє області існування БШК і МЛ, виготовлених із однакових матричних металів. Саме відшукати критичні значення структурно-розмірних параметрів вихідних БШК та температурно-часових їх термообробки – одна з головних проблем у розробленні МЛ конкретного типу. Не менш важливо створити технологію виготовлення БШК, придатного до трансформації у потрібний МЛ. Об'єм композитних зразків, достатній для досліджень БШК і МЛ, становить всього кілька сантиметрів кубічних, тому їх можна виготовити, використовуючи різноманітні методи. Здебільш тут придатне послідовне осадження шарів матеріалів різного складу з парової фази [1, 4]. Проте на практиці, щоб виготовити з МЛ певні вироби, потрібні заготовки із БШК об'ємом у сотні сантиметрів кубічних, через що кількість методів продукування великогабаритних композитних заготовок значно зменшується. Тому потрібно розробити способи отримання демонстраційних зразків БШК з об'ємом на рівні, принаймні, кількох сотень сантиметрів кубічних. Саме на вирішення цих завдань спрямовано наші експерименти.

Методики і матеріали. Використали і розвинули загальну методику виготовлення масивних виробів із МЛ, яка суттєво відрізняється від традиційних схем і поєднує методи гарячого вакуумного (метод ГВВ) [5] і звичайного холодного атмосферного вальцювання.

Схема отримання БШК з різною кількістю шарів детально описана раніше [6]. За нею виготовили БШК у вигляді смуг розміром 1...10×90...100×300...500 mm з кількістю шарів від 11 до 1620. Об'ємна частка міді у всіх композитах становила 30%. Вихідними матеріалами були смуги з міді М1 і сталі 20 (ASTM 1020).

Відмінності у термомеханічній передісторії БШК з різною кількістю шарів неминуче призводять до певних розбіжностей у їх властивостях і структурному стані. Щоб уникнути цього, на завершальному етапі виготовлення дослідних зразків всі композитні смуги завтовшки 2 mm відпалювали у вакуумі при 750°C впродовж 1 h і піддавали холодному вальцюванню зі сумарним обтисненням 50%. Стан стрічок БШК товщиною 1 mm, отриманих за цією процедурою, прийняли за вихідний і виготовили з них зразки для механічних випробувань (рис. 1). Трансформували зразки з БШК у зразки із МЛ шляхом відпалу у вакуумі при 750°C упродовж 1; 2 і 3 h.

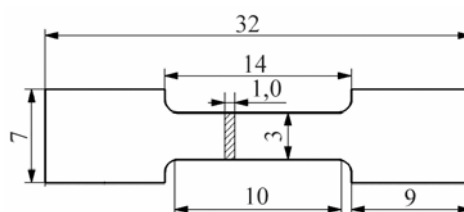


Рис. 1. Форма і розміри (в mm) зразків для механічних випробувань.

Fig. 1. The shape and size (mm) of the specimens for mechanical testing.

Результати випроб. Механічні характеристики досліджували на розривній машині типу INSTRON-5581. Оскільки товщина зразків становила 1 mm, питома та абсолютна кількість шарів у них збігалася. Механічні випробування виконували при кімнатній температурі, швидкість деформації 2 mm/min. Фіксували значення границь міцності і текучості зразків, а також їх відносне видовження. Визначили основні механічні характеристики БШК з кількістю шарів 11; 21; 62; 182; 540; 1080 і 1620. Встановили, що для БШК у вихідному стані вони незначно зростають зі збільшенням кількості шарів композитів: границя міцності змінюється від 600 до 615 МПа, границя текучості – від 440 до 460 МПа. Відносне ви-

довження всіх зразків знаходиться на рівні 2%.

Після відпалу різної тривалості границі міцності і текучості зразків суттєво зменшуються, а відносне видовження збільшується. Починаючи з 182 шарів, стає помітною їх залежність від кількості шарів композитів та тривалості відпалу (рис. 2).

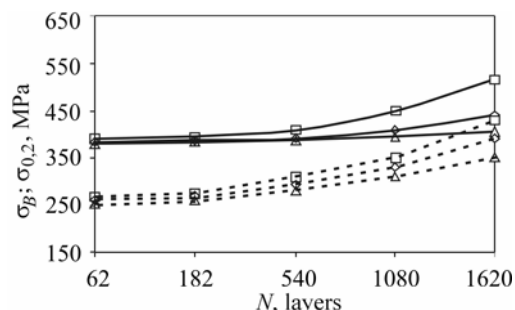


Рис. 2. Залежність границь міцності (суцільні лінії) та текучості (штрихові) композитів від кількості шарів після відпалу 1 (Δ), 2 (◇) і 3 h (□).

Fig. 2. Dependence of ultimate strength (solid line) and yield strength (dotted line) of composites after annealing for 1 (Δ), 2 (◇) and 3 h (□).

Обговорення результатів. Існують різні розрахункові методики для прогнозування механічних та інших властивостей шаруватих композитів, що ґрунтуються на експериментальних результатах про відповідні індивідуальні властивості їх компонентів [7, 8]. Згідно з найпростішою з них певну характеристику композита у першому наближенні розглядають як адитивну суму добутків відповідної індивідуальної характеристики кожного з компонентів композита та його об'ємної частки в композиті (т. зв. “правило суміші”) незалежно від кількості шарів композита.

Для апробації цієї методики випробовували зразки міді і сталі після термо-механічної обробки, яка відтворювала режими одержання композитів. Використовуючи експериментальні значення границь міцності і текучості міді і сталі та враховуючи їх об'ємні частки у композитах, за правилом суміші розрахували механічні характеристики всієї кількості шарів БШК і МЛ. Виявилось, що експериментально визначені характеристики всіх БШК у вихідному стані несуттєво перевищують розрахункові – всього на 5...7%, тобто до них можна застосовувати “правило суміші”. Для композитів у відпаленому стані ця різниця становить 8...10%, тільки за кількості шарів до 62. Перевищення експериментальних значень порівняно з розрахунковими за більшої кількості шарів зростає досить істотно – на 15% і більше. Отже, розрахункова модель, що базується на “правилі суміші” і враховує тільки властивості матричних металів, неадекватно описує механічні характеристики композитів з кількістю шарів 182 і більше.

Встановлено (рис. 2), що механічні характеристики композитів системи мідь–сталь з об'ємною часткою міді на рівні 30% у координатах “питома кількість шарів–властивість” досить чітко залежать від їх структурно-розмірного параметра, зокрема, усередненої товщини їх шарів, яка обернено пропорційна їх кількості. Це дає підставу стверджувати, що у відпаленому стані композити з умовно малою (≤ 182) кількістю шарів – це БШК, а з умовно великою (> 182) – МЛ. Інтерполюючи результати, наведені на рис. 2 для композитів з 182 і 540 шарами, встановили критичну (граничну) питому кількість шарів – 300–400, що розмежовують області існування БШК і МЛ залежно від тривалості відпалу.

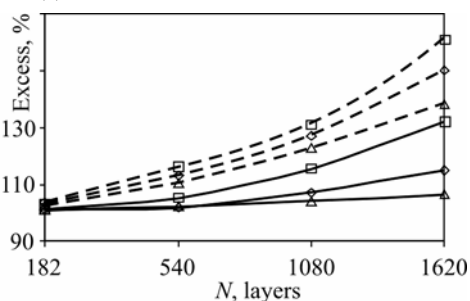
Оцінити ефективність термоактивованої трансформації БШК в МЛ можна за різницею (перевищенням) значень їх механічних характеристик. На рис. 3 наведено результати розрахунку цього перевищення для МЛ відносно відповідних характеристик БШК з 62 шарами. Важливо підкреслити, що на відміну від БШК для МЛ з однаковою кількістю шарів таке перевищення зростає зі збільшенням тривалості відпалу. Для МЛ характерне монотонне зменшення їх відносного видовження від 20 до 14%.

Порівнюючи границі міцності і текучості та відносне видовження для БШК у вихідному, тобто в нагартваному стані, з аналогічними характеристиками для МЛ, виявили, що останні за міцністю наближаються до БШК, але їх пластич-

ність, а отже, і технологічні показники значно вищі, ніж БШК. Дуже цікаво та важливо порівняти властивості МЛ та сталі ASTM 1020 у відпаленому стані, для якої границі міцності і текучості становлять 415 і 283 МПа відповідно. Отже, міцність і пластичність МЛ вищі, ніж монолітної сталі ASTM 1020. Зрозуміло, що такий самий висновок можна зробити і для міді.

Рис. 3. Перевищення границь міцності (суцільні лінії) та текучості (штрихові) композитів з великою кількістю шарів та зі 62 шарами після відпалу 1 (Δ); 2 (◇) і 3 h (□).

Fig. 3. Comparison of ultimate strength (solid line) and yield strength (dotted line) of composites with many layers and with 62 layers after annealing for 1 (Δ); 2 (◇) and 3 h (□).



ВИСНОВКИ

Продемонстровано придатність методики виготовлення багатошарових композитів, що поєднує гаряче вакуумне та холодне атмосферне вальцювання, для отримання композитних плит і стрічок з об'ємом 300...500 см³. Встановлено, що для композитів системи мідь–сталь з об'ємною часткою міді на рівні 30% термоактивоване трасформування їх у наноструктуровані мікроламінати при 750°C можливе тільки тоді, коли на кожен міліметр їх товщини припадає не менше 300–400 шарів. Експериментально підтверджено можливість створення МЛ з такими механічними і технологічними характеристиками, які значно перевищують відповідні БШК та матричних металів.

РЕЗЮМЕ. Описана еволюція механічних свойств многослойных композитов медь–железо с количеством слоев от 11 до 1620 под влиянием отжига при 750°C. Установлено, что свойства композитов с более чем 300–400 слоями зависят от их количества и продолжительности отжига. Экспериментально подтверждена возможность создания микроламинатов с такими механическими и технологическими характеристиками, которые значительно превышают соответствующие матричных металлов.

SUMMARY. The evolution of mechanical properties of multilayered composites copper–iron with a number of layers from 11 to 1620 under the influence of annealing at 750° is described. It was found that the properties of these composites with more than 300–400 layers depend of their number and the duration of annealing. The possibility of creating microlaminates with mechanical properties and technological characteristics that are significantly higher than the corresponding characteristics of the matrix metals was experimentally proved.

1. Ковтун Г. П., Веревкин А. А. Наноматериалы: технологии и материаловедение. – Харьков: Изд. ННЦ ХФТИ, 2010. – 71 с.
2. Карпов М. И. Механические свойства и особенности пластической деформации и упрочнения наноструктурных слоистых композитов. – Черноголовка: Изд. Ин-та физики твердого тела РАН, 2010. – 34 с.
3. Огнев А. В., Самардак А. С. Спинтроника: физические принципы, устройства, перспективы // Вестник Дальневосточного отделения РАН. – 2006. – № 4. – С. 67–73.
4. Zhang X., Misra A., and Wang H. Enhanced hardening in Cu/330 stainless steel multilayers by nanoscale twinning // Acta Mater. – 2004. – 52. – P. 995–1002.
5. Диденко С. Ю., Ильченко Н. И., Рыбальченко Н. Д. Вакуумная прокатка: история и перспективы развития // Сб. "Академик Виктор Евгеньевич Иванов". – Харьков: Изд. ННЦ ХФТИ, 2008. – С. 115–127.
6. Перспективы производства и использования металлических микроламинатов, получаемых вакуумной прокаткой / И. М. Неклюдов, В. Н. Воеводин, С. Ю. Диденко и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – № 5. – С. 89–94.
7. Композиционные материалы: справ. / Под ред. Д. М. Карпиноса. – К.: Наук. думка, 1985. – 592 с.
8. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов: Пер. с яп. – М.: Мир, 1982. – 232 с.

Одержано 08.03.2011