

С.Л. Рево, Ф.В. Лозовий, К.О. Іваненко, М.М. Дашевський

## Міцність та амплітудні залежності внутрішнього тертя наношаруватого композиційного матеріалу алюміній-вуглець

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
просп. Глушкова, 2, корп.1, 03680, Київ, Україна*

Розглянуто характеристики міцності при розтягуванні нових нанокомпозиційних матеріалів (НКМ) алюміній – вуглець. Методом внутрішнього тертя оцінено вплив товщини шарів НКМ, типу вуглецевого компонента (термічно розширений графіт, вуглецеві багатостінні нанотрубки) та його концентрації на рухливість дефектів кристалічної структури та міцність зразків НКМ.

**Ключові слова:** шаруваті наноматеріали, внутрішнє тертя, міцність при розтягуванні.

*Стаття поступила до редакції 07.09.2007; прийнята до друку 15.06.2008.*

В шаруватих нанокомпозиційних матеріалах (НКМ) реалізовані атомні, кластерні та нанорозмірні механізми структуроутворення, неадитивне підвищення їх експлуатаційних характеристик, відносно компонент НКМ, визначає актуальність проблеми встановлення закономірностей впливу структурних особливостей зазначених систем на їх практично важливі властивості [1].

При виготовленні шаруватих НКМ використовують різноманітні методи: це і пошарове вакуумне препарування, і глибока деформація гетерогенних заготовок з пакетів фольг різнорідних, практично нерозчинних між собою металів, що чергуються, сумішей порошоків або псевдосплавів, це і набризкування диспергованих розплавів тощо.

Останнім часом, у зв'язку з розвиненням нанотехнологій, які дозволяють одержувати нанопорошки, нанотрубки і скомпактовані на їх основі суцільні наноматеріали, доцільно використати нанокомпоненти для створення нових шаруватих НКМ з високими характеристиками. Перспективність подібного підходу вже була зафіксована, наприклад, при створенні композиційних матеріалів (КМ), в тому числі і з алюмінієм [2].

Метою цієї роботи було встановлення закономірностей впливу складу та структури шаруватих НКМ з вуглецевими компонентами на їх характеристики міцності.

В якості компонент КМ було обрано алюміній, марки А999 та вуглець в модифікаціях термічно-розширеного графіту (ТРГ) та багатостінних вуглецевих нанотрбок (ВНТ). Насипна густина ТРГ складала (2,5...3) кг/м<sup>3</sup>, довжина черв'якоподібних частинок (1...4 мм), площа його питомої поверхні – 50 м<sup>2</sup>/г. ВНТ були одержані за методикою, що

описана в роботах [3,4].

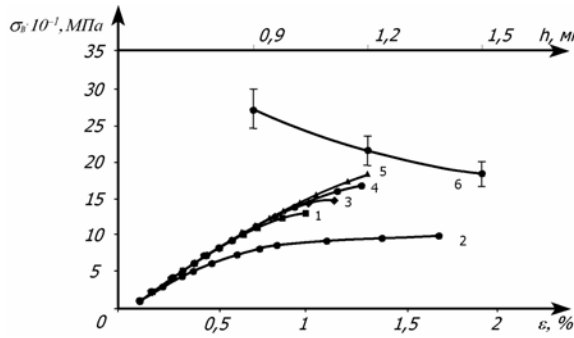
Зразки НКМ були одержані зварюванням пакету фольг з алюмінію, прошарками яких були ТРГ, ВНТ чи їх суміш у співвідношенні 1:1. Ступінь обтискання пакету при першому проході крізь валки складала (30...50) %. Подальшу прокатку звареного пакету здійснювали без нагрівання з метою досягнення заданої середньої товщини шару ( $h$ ) і деформаційного зміцнення НКМ.

Концентрація вуглецевої компоненти ( $c$ ) в НКМ складала (1,6...4,5) об. %.

Амплітудні залежності внутрішнього тертя (АЗВТ) вимірювали методом „Оберненого крутильного маятника” з удосконаленою електрооптичною системою реєстрації загасаючих коливань, та комп'ютерною обробкою одержаної інформації. Відносна похибка у визначенні параметрів внутрішнього тертя (ВТ) не перевищувала 3%.

Залежності напруження при розтягуванні ( $\sigma$ ) зразків від ступеню відносної деформації ( $\epsilon$ ) визначали за допомогою керованого ЕОМ модифікованого пристрою ПМР-1.

На основі аналізу отриманих залежностей  $\sigma = f(\epsilon)$  (рис. 1), можна констатувати, що різні наповнювачі по різному впливають як на характер залежностей, так і на границю міцності зразків при розтягуванні ( $\sigma_B$ ). Як відомо за даними різних авторів  $\sigma_B$  для алюмінію, в залежності від його стану (наклеп, відпал), та складу (наявності домішок), може змінюватись в значних межах. Так для алюмінію чистотою 99,996 %  $\sigma_B = 49$  МПа, для литого алюмінію вона змінюється в межах:  $\sigma_B = 90...100$  МПа; для прокатаного при кімнатній температурі –  $\sigma_B = 176...245$  МПа; для прокатаного



**Рис. 1.** Залежності границі міцності при розтягуванні від відносної деформації (1-5) та від товщини шару НКМ (6). 1 – Al, прокатаний з відносним обтисканням на 75 %; 2 – Al відпалений на протязі 30 хв. при T = 300 °C; НКМ Al-ТРГ (3), НКМ Al-ВНТ (4), НКМ Al-(ВНТ+ТРГ) (5) з h = 1,6 мкм.

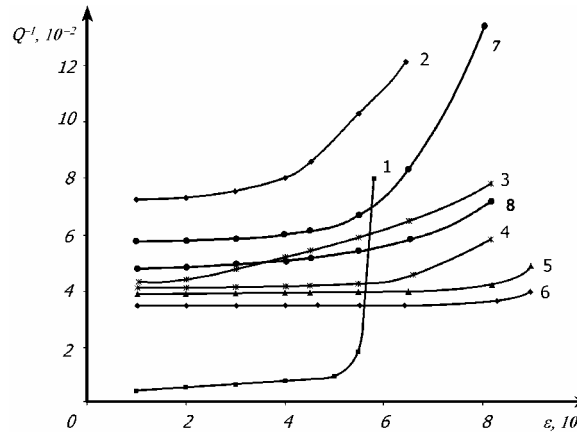
алюмінію, чистотою 99,996%  $\sigma_B = 113$  МПа [5]. Для фольги алюмінію, що була використана в наших дослідженнях,  $\sigma_B$  після холодного вальцювання з відносною деформацією  $\varepsilon_S = 75\%$  не перевищувала  $(140 \pm 10)$  МПа (кр.1, рис. 1). Для відпаленої при T = 300 °C на протязі 30 хв фольги, ця характеристика знижувалась до  $(98 \pm 10)$  МПа. В обох випадках (кр.1,2, рис. 1) залежності свідчать про певну зону текучості. Для наклепаних холодним вальцюванням зразків НКМ Al-ТРГ, при вмісті ТРГ  $c = 2,5$  об. % величина  $\sigma_B$  дуже мало перевищує відповідної величини для наклепаної фольги з алюмінію (кр.3 та 1 рис. 1). Несуттєво підвищується  $\sigma_B$  у випадку використання в якості вуглецевої компоненти НКМ – ВНТ, з аналогічною концентрацією (кр. 4 рис. 1). В той же час, для НКМ Al-(ТРГ+ВНТ), спостерігали збільшення величини  $\sigma_B$  у порівнянні з іншими дослідженими матеріалами (кр. 5, 6. рис. 1). Для цієї композиції  $c = 2,5$  об.% при середній розрахунковій  $h = 1,6$  мкм  $\sigma_B = (190 \pm 15)$  МПа, а при  $h = 0,9$  мкм  $\sigma_B = (270 \pm 20)$  МПа, що в  $\sim 2,2$  рази більше, ніж для наклепаної фольги алюмінію, що була використана для виготовлення НКМ.

Аналіз літературних даних по дослідженню наночаруватих структур [1] дозволяє стверджувати, що у більшості випадків шаруватість забезпечує більш жорстке закріплення дислокацій і підвищення їх гранично досягаємої густини  $N_d$ . При цьому, фізико-механічні характеристики таких композицій покращуються. Зокрема, величина  $\sigma_B$  для зразків металевих шаруватих НКМ при зменшенні середньої товщини шару до нанодіапазону 100...10 нм може зростати в 2...3 рази у порівнянні з адитивною  $\sigma_B$  [1]. В нашому випадку не було досягнуто нанорозмірного діапазону по h, але нанорозмірність вуглецевого компонента сприяла блокуванню дислокацій та підвищенню їх густини. Це в свою чергу визначало характеристики міцності НКМ. Методом АЗВТ був проведений більш детальний аналіз.

Як видно з наданих на рис. 2 амплітудних залежностей ВТ для зразків алюмінію та НКМ, фон

внутрішнього тертя  $Q_\phi^{-1}$  для КМ більший за  $Q_\phi^{-1}$  для чистого алюмінію (кр.1 та кр.2-6). Характерним є те, що для невеличких концентрацій ТРГ (кр.2) він суттєво (до  $7,2 \cdot 10^{-2}$ ) зростає, а при подальшому збільшенні концентрації зменшується, але не досягає тих мінімальних значень, що відповідають  $Q_\phi^{-1}$  для алюмінію (рис. 2). Поведінка критичної деформації ( $\varepsilon_k$ ), що характеризує початок мікропластичної деформації (область значного посилення АЗВТ), для різних концентрацій ТРГ також неоднозначна: при невеличких концентраціях ( $c < 1,6$  об.%) вона практично не змінюється, а після підвищення концентрації  $c > 1,6$  об. % суттєво зростає (кр.2-5 рис. 1).

Якщо оцінювати напруження зриву дислокацій в



**Рис. 2.** Амплітудні залежності внутрішнього тертя для Al (1), для НКМ Al-(ТРГ+ВНТ) з середньою товщиною шару h=0,9 мкм і концентрацією вуглецевого компонента c, об. %: 1,25 (2); 1,6 (3); 2,5 (4, 7, 8); 3,4 (5); 4,5 (6); для НКМ Al-(ВНТ+ТРГ) з h, мкм: 1,5 (7); 0,9 (8).

шарах НКМ за співвідношенням:

$\tau = G_{Al} * \varepsilon_k$ , де  $G_{Al}$  – модуль зсуву для алюмінію, який згідно проведених вимірювань дорівнює  $25 \cdot 10^3$  МПа, то для алюмінію і для НКМ при c, об. %: 1,25; 1,6; 2,5; 3,4; 4,5 вони виявились, відповідно, такими:  $\tau$ , МПа: 11,2; 12,5; 11,2; 18,7 та 19 (кр. 1-5 рис. 2). Тобто, напруження зриву дислокацій в шарах НКМ при збільшенні концентрації ТРГ в зазначених межах зростає практично в двічі у порівнянні з  $\tau$  для фольги Al.

Якщо для інтерпретації наданих на рис. 2 результатів використати поняття теорії перколяції [6], то можна стверджувати, що до певних концентрацій ТРГ в шарах КМ існують тільки окремі кластери, які до  $c \approx 1,2$  об.% вносять суттєвий вклад в розсіяння пружної енергії, за рахунок чого  $Q_\phi^{-1}$  зростає. Крім того не виключено утворення в НКМ і карбідів алюмінію, які також здатні сприяти підвищенню фону ВТ. При  $c > 1,2$  об.% з окремих кластерів у вуглецевих шарах утворюються суцільні, неперервні кластери, що блокують переміщення дислокацій з шару в шар і впливають на зменшення

$Q_{\phi}^{-1}$ . Жорсткі вуглецеві нанотрубки на відміну від ТРГ, більш схильні до утворення просторових структур, але, в той же час, здатні в процесі виготовлення НКМ (пресування, відпалів, вальцювання) „прорізати” шари алюмінію, сприяти фрагментації їх на лусочки. Це може обумовлювати суттєві зміни АЗВТ, зокрема, підвищення  $Q_{\phi}^{-1}$ . Але зменшення величини  $h$  все ж таки в більшому ступені впливає на характер АЗВТ, зменшення величини  $Q_{\phi}^{-1}$ . (кр. 7,8, рис. 2). Крім того процеси мікропластичної деформації для НКМ АІ-(ТРГ+ВНТ) з меншими  $h$  починаються при більших  $\varepsilon_k$ , а сама амплітудна залежність ВТ слабша.

## Висновки

Створення шаруватих нанокомпозиційних матеріалів з використанням алюмінію та вуглецевих

компонент у вигляді суміші термічно розширеного графіту і вуглецевих нанотрубок дозволяє, за рахунок підвищення густини та зменшення рухливості дислокацій, покращувати характеристики міцності у порівнянні з алюмінієм.

Порогові значення концентраційних залежностей параметрів амплітудних залежностей внутрішнього тертя для шаруватих НКМ алюміній-вуглець вказують на можливість утворення в шарах вуглецевої компоненти неперервних кластерів, які блокують рухливість дислокацій та сприяють підвищенню їх густини в композиції та її характеристик міцності.

Суміш термічно розширеного графіту та вуглецевих нанотрубок в більшому ступені ніж ТРГ схильна до кластероутворення, забезпечення закріплення дислокацій та підвищення міцності композиційного матеріалу.

- [1] А.П.Шпак, В.П.Майборода, Ю.А.Куницький, С.Л. Рево *Нанослоистые композиционные материалы и покрытия*. Академперіодика, К. 164 с. (2004).
- [2] П. Харрис *Углеродные нанотрубки и родственные структуры*. Новые материалы XXI века. Техносфера, М. 336 с. (2003).
- [3] Пат. 69292А України, МКИ С 01 В 311/00. *Спосіб одержання вуглецевих нанотрубок*: В.В.Янченко, Ю.І.Семенов, О.В.Мележик (Україна); ТОВ „ТМ Спецмаш”.- №20031212314; Заявл. 24.12.2003; Опубл. 16.08.2004, НКІ 311/00. 3 с.
- [4] А.В.Мележик, Ю.І.Семенов, В.В.Янченко *Синтез тонких углеродных нанотрубок на осажденных металлооксидных катализаторах // Журнал прикладной химии*, **78**(6), сс. 938-944 (2005).
- [5] Л.В.Тихонов, В.А.Кононенко, Г.І.Прокопенко, В.А.Рафаловский. *Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник*. Механические свойства металлов и сплавов. Наук. думка, Киев, 568 с. (1986).
- [6] H.Scher, R.Zallen *Critical density in percolation processes // J. Chem. Phys.*, **53**(9). pp. 3759-3761 (1970).

S.L. Revo, F.V. Lozovoj, K.A. Ivanenko, N.N. Dashevskij

## Strength and Peak Dependences of Interior Friction Nanolayer a Composition Material Aluminium-Carbon

*The Kiev national university of name T. Shevchenko,  
Glushkov's avenue, 2/1, 03680, Kiev, Ukraine*

Are viewed strength performances at a tension new of nanocomposite materials (NCM) aluminium-carbon. The method of interior friction had been estimated influence of thickness of balls NCM, type of a carbon builder (thermally dilated graphite, carbon multiwall nanotube) and its concentrations on mobility of flaws of crystalline structure and strength of samples NCM.