

**Лисий М.В.,\*****Білюк А. І.,\*\*****Слободяник А.Д.\***

\* Вінницький національний технічний університет,

\*\* Вінницький державний педагогічний університет,

м. Вінниця, Україна

E-mail: mykhailo-lysyi@mail.ua

**ВПЛИВ ТЕРМОЦИКЛІЧНОЇ ОБРОБКИ  
НА СУБСТРУКТУРНЕ ЗМІЦНЕННЯ  
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З  
АЛЮМІНІЄВОЮ МАТРИЦЕЮ**

УДК 539.67.669.017

Встановлено можливості забезпечення високоміцного стану композиційних матеріалів на основі алюмінію та його сплавів, армованих волокнами бору, шляхом формування в матриці субструктури та її стабілізації домішковими атомами, комплексами таких атомів і дисперсними фазами. Запропоновано оптимальні режими їх термоциклювання в напруженому стані, що зумовлюють формування в матриці композитів субструктури.

**Ключові слова:** субструктурне зміцнення, волокнисті композиційні матеріали, внутрішнє тертя, дислокації, термоциклювання.

**Вступ**

Науково - технічний прогрес пов'язаний зі створенням матеріалів із заданими властивостями, до яких насамперед належать композиційні матеріали, як такі, яким властиві необмежені функціональні властивості, значне зниження маси та одночасне підвищення надійності, збільшення терміну експлуатації в екстремальних умовах. Серед композитів особливе місце посідають упорядковано-армовані матеріали з матричною структурою. Найперспективнішими комбінованими методами зміцнення матеріалів є армування високоміцними волокнами субструктурнозміцненої матриці та комбіноване використання ефектів зміцнення шляхом виділення дисперсних фаз в армованій матриці із сформованою в ній термічно стабільною субструктурою.

На користь і доцільність формування субструктури в алюмінієвій матриці волокнистих композиційних матеріалів (ВКМ) з однонаправленими волокнами свідчить різка анізотропія їх міцнісних властивостей. Такий композиційний матеріал максимально міцний уздовж волокон. У поперечному напрямі міцність матеріалу за доброго зв'язку між волокном і матрицею визначають міцністю матриці ВКМ загалом.

**Матеріали та методика досліджень**

У роботі досліджено вплив термоциклічних обробок на структурні зміни ВКМ АМ 40–В та гібридного композиційного матеріалу на основі боралюмінію, який додатково армованого тонкими сталевими сітками трикотажною структурою. Завдяки такій структурі вдається підвищити рівень тріщиностійкості й міцність під час циклічних навантажень. Саме цьому значною мірою сприяє спеціальне конструювання макроструктури матеріалу, під час якого шляхом регулювання послідовності чергування армуючих шарів, об'ємному вмісту волокон, товщини матричних прошарків створюється структура, у якій під навантаженням реалізуються як мікропластичні деформації, так і конструкційне внутрішнє тертя (ВТ) (рис. 1).

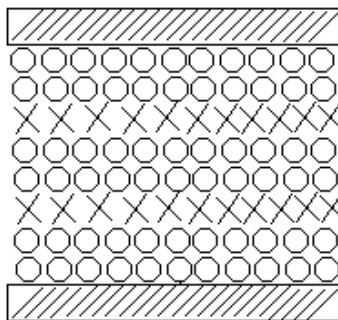


Рис. 1 – Поперечний переріз композиту (0 – волокна бору, х – сталева сітка)

В експериментах використовували механічну спектроскопію, яка ґрунтується на здатності твердих тіл розсіювати енергію механічних коливань унаслідок внутрішнього тертя. Внутрішнє тертя перед-

бачає дослідження температурних і амплітудних залежностей внутрішнього тертя (ВТ), які дозволяють розраховувати найбільш характерні параметри структурних перетворень, а відтак і висловити найімовірніші припущення про фізичну природу, механізми й кінетику процесів, що лежать в основі цих перетворень. Використовували зразки прямокутного перерізу, вирізані електроіскровим методом із листа композиційного матеріалу вздовж волокон. Дослідження температурної залежності внутрішнього тертя (ТЗВТ) проводили на оберненому крутильному маятнику за частоти коливань 1 Гц. Зазвичай мірою ВТ

вважають відносні втрати  $\left(\frac{\Delta W}{W}\right)$  енергії, розсіяної за цикл:  $Q^{-1} = \left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{\Delta W}{W}\right)$  або  $Q^{-1} = \left(\frac{\ln A/A_n}{n}\right)$ , де  $A/A_n$  – початкова і кінцева амплітуди коливань,  $n$  – кількість коливань [1].

### Результати досліджень

Методом механіко - термічної обробки неможливо сформувати субструктуру в КМ, тому пропонується формування субструктури в таких матеріалах шляхом багаторазового термоциклювання. На відміну від стандартних методів термообробки (ТО), під час ТЦО з'являються додаткові джерела впливу на структуру, властиві тільки процесу неперервної зміни температури, основними з яких є фазові перетворення, градієнти температури, термічні та міжфазні напруження.

Авторами пропонується створити в композиційному матеріалі високу густину дислокації за допомогою високотемпературної термоциклічної обробки в інтервалі температур 300 - 20 °С, 400 - 20 °С, 600 - 20 °С, 750 - 20 °С. За допомогою термічної активації в полях зовнішніх напружень пропонується перерозподілити дислокації у субграніці [2, 3].

Відомо, що в алюмінії та волокнистих композиційних матеріалах з алюмінієвою матрицею у процесі формування і стабілізації зміцнювальної субструктури на температурній залежності внутрішнього тертя проявляються три непружні ефекти [4, 3], спричинені: ефект А (220 °С) – взаємодією дислокацій у стінках із точковими дефектами, що дифундують уздовж субграніць; ефект В (260 °С) – неконсервативним рухом дислокацій у стінках; ефект С (310 °С) – взаємодією окремих дислокацій та їх скупчень усередині полігонів із дислокаціями, які утворюють малокуткові граніці.

Результати досліджень показують: термоциклювання композиту алюміній-бор, де матрицею служить сплав АМ – 40, в інтервалі 400 - 20 °С не зумовлює формування розвинутої дислокаційної субструктури, тому що наявність значної кількості домішок, їх комплексів і окремих виділень ефективно блокує утворені дислокації і перешкоджає їхньому шикунанню в дислокаційні стінки. Субструктура не отримує значного розвитку (рис. 2).

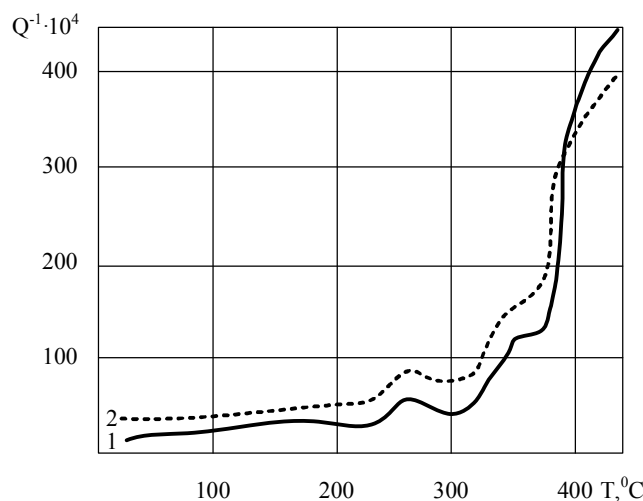


Рис. 2 – Температурна залежність внутрішнього тертя композиційного матеріалу АМ40-бор після термоциклювання в інтервалі 400 – 20°С(криві нагрівання):1 – 0 ТЦО, 2 – 30 ТЦО

Подальше розширення інтервалу термоциклювання від 600° до 20 °С створює сприятливі умови для формування зміцнюючої субструктури. Про це свідчать непружні ефекти при 200 °С, 260 °С і 300 °С (рис. 3).

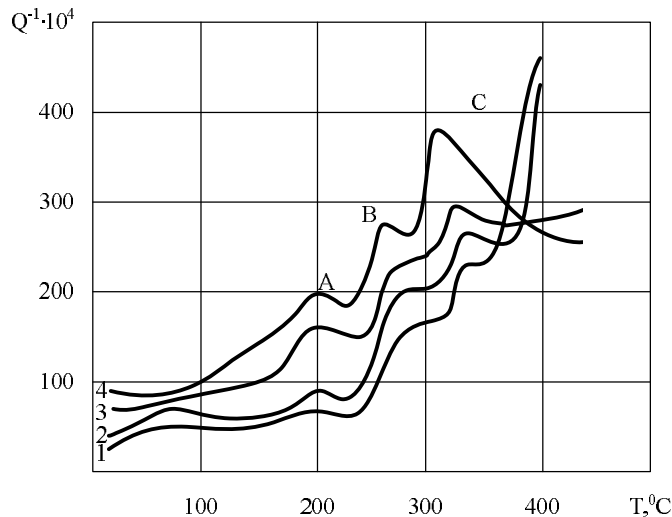


Рис. 3 – Температурна залежність внутрішнього тертя композиційного матеріалу АМ40 – бор після термоциклювання в інтервалі 600 – 20°C (криві нагрівання):  
1 – 2 ТЦО; 2 – 5 ТЦО; 3 – 20 ТЦО; 4 – 30 ТЦО

Збільшення кількості термоциклів обумовлює зростання усіх трьох ефектів. Таким чином, підвищення температури загартування до 600 °С з одного боку зумовлює розчинення наявних виділень у матриці композиту, а з іншого боку, після загартування фіксується підвищення концентрації термічних вакансій. Підвищення концентрації вакансій полегшує неконсервативний рух дислокацій та їх перерозподіл. Формується розвинута субструктура. У міру зростання кількості термоциклів до утворення розвинутої субструктури відбувається зменшення високотемпературного фону внутрішнього тертя (рис. 3). Однак подальше термоциклювання, внаслідок інтенсивної хімічної взаємодії на межі волокно – матриця, може призвести до утворення крихких перехідних зон, які складаються з інтерметалідних з'єднань.

Формування субструктури в матриці ВКМ забезпечує її зміцнення. Підтвердженням цього є результати вимірювання мікротвердості. Зміцнення матриці на початкових стадіях термоциклювання не є однаковим по всьому об'єму. Найменша мікротвердість – посередині між волокнами. Із наближенням до волокон мікротвердість зростає. Завершене формування субструктури майже вирівнює значення мікротвердості по всьому об'єму матриці.

Дослідження температурної залежності внутрішнього тертя гібридного композиційного матеріалу алюміній – бор – сталь засвідчило, що формування розвинутої субструктури під час термоциклювання в температурному інтервалі 300 °С – 20 °С відбувається через 10 - 12 термоциклів (рис. 4).

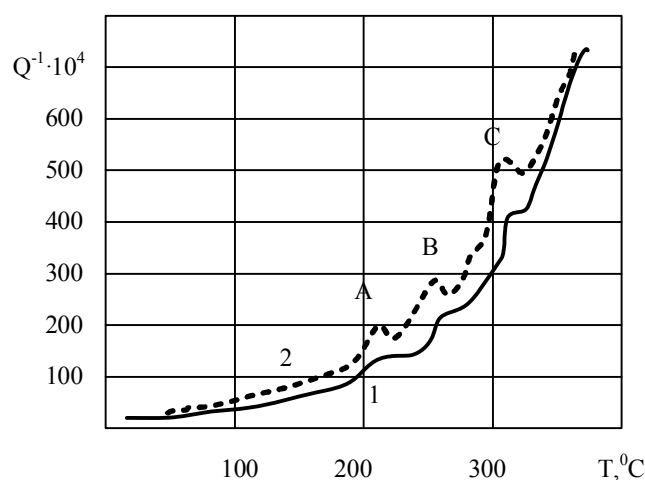


Рис. 4 – Температурна залежність внутрішнього тертя гібридного композиційного матеріалу алюміній – бор – сталь після 12 термоциклів в інтервалі температур 300<sup>0</sup>С до 20<sup>0</sup>С:  
1 – нагрівання; 2 – охолодження

При цьому субструктурні ефекти краще проявляються на кривих охолодження. На кривих нагрівання спостерігається лише перегин в районі проявлення піку, зумовленого рухом точкових дефектів уз-

довж дислокацій та дислокаційних стінок. Переповзання дислокацій та дислокаційних скупчень розташованих усередині полігонів, заблоковано. Нагрівання під час вимірювання до 450°C і витримки за цієї температури близько 5 хвилин розблоковує дислокації і під час охолодження ці ефекти проявляються досить чітко. Крива охолодження розташована вище кривої нагрівання. Подальші термоциклічні обробки мало впливають на характер внутрішнього тертя. Криві нагрівання-охолодження утворюють гістерезис, площа якого за перших термоциклів зменшується в тричі, а потім її величина зростає, досягаючи насичення після 10 термоциклів. Площа петлі гістерезису характеризує процес накопичення дефектів у композиті, дає відомість про ступінь пошкодження його під час термоциклювання, а також вказує на зміну параметра кристалічної ґратки, що зумовлено виділенням додаткової фази в матриці, яка блокує дислокації в стінках субструктури. Великий гістерезис після ТЦО свідчить про значне закріплення дислокацій атмосферами домішок.

### Висновки

Високоміцного стану композиційних матеріалів на основі алюмінію та його сплавів можна досягнути, армуючи їх волокнами бору з подальшим формуванням у матриці субструктури з її стабілізацією домішковими атомами, їх комплексами й дисперсними фазами.

Сформована субструктура в матриці ВКМ підвищує їх жароміцнісні властивості, які підтверджуються зменшенням високотемпературного фону внутрішнього тертя й підвищенням мікротвердості.

У матриці гібридних композиційних матеріалів формування субструктури відбувається за нижчих температур термоциклювання (300 °C - 20 °C). Субструктурні ефекти краще проявляються на кривих охолодження.

Криві нагрівання – охолодження утворюють гістерезис, площа якого під час перших термоциклів зменшується в тричі, а потім її величина зростає, досягаючи насичення після 10 термоциклів, що вказує на зміцнення матеріалу.

В алюмінієвій матриці потрійного композиту в окремих випадках субструктура формується вже в процесі їх виготовлення.

### Література

1. Даринский В. М. Внутреннее трение обусловленное движением дислокационных стенок / В. М. Даринский, Ю. А. Федоров // ФММ. – 1970. – Т.30. – Вып. 6. – С. 1279–1286.
2. Зузяк П. М. Контроль дислокационной структуры материала методом регрессионного анализа / П.М. Зузяк, А.И. Билюк, И.И. Федорчук // Материалы 7-й Российской научно-технической конференции "Демпфирующие материалы". – Киров. – 1994. – С.142.
3. Федюкин В. К. Термоциклическая обработка деталей и машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский // Ленинград. Машиностроение – 1989. – 255 с.
4. Лисий М. В. Субструктурне зміцнення волокнистих композиційних матеріалів / М. В. Лисий, П. М. Зузяк, Ю. О. Чернуха, В. М. Сайчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2003. – №3. – С. 279 - 285.
5. Лисий М.В. Формування зміцнюючої субструктури в композиційних матеріалах на основі алюмінію / М.В. Лисий, О.В. Мозговий, А.І. Білюк // Вісник ВПІ-ВНТУ. – 2012. – № 3. – С. 148 - 153.

Поступила в редакцію 14.02.2017

Lysiy M., Biliuk A., Slobodanyk A. **Impact of thermo-cycling treatment on sub-structural reinforcement of composition materials of aluminum matrix.**

The possibilities are revealed to ensure the high-strength state of composite materials based on aluminium and its alloys armoured with boron fibres by forming substructure in a matrix and its stabilizing with impurity atoms, complexes of such atoms, and disperse phases. Optimal modes of thermocycling in a stressed state are proposed that provide the formation of substructure

**Key words:** sub - structural reinforcement, composite materials, internal friction, dislocations, thermocycling.

### References

1. Darynskyi V. M. Internal friction, caused by the motion of dislocation walls. Darynskyi V. M., Fedorov Yu. A./ FMM. 1970. T. 30. Issue. 6. P. 1279 – 1286.
2. Zuziak P. M. Control of dislocation structure of the material, by the method of regressive analysis. Zuziak P. M., Biliuk A. I., Fedorchuk I. I. Materials of the 7-th Russian scientific – engineering conference "Damping materials". Kirov. 1994. P. 142.
3. Fediukin V. K. Thermocycling processing of pieces and machines. Fediukin V.K., Smagorinskyi M.E. Leningrad. Machine building, 1989. 255 p.
4. Lysuyi M. V. Substructural strengthening of fiber composite materials. Lysuyi M. V., Zuziak P. M., Chernukha Yu. O., Saichuk V. M. Metallophysics and modern technologies, 2003. №3. P. 279 – 285.
5. Lysuyi M. V. Formation of reinforcing substructure in composite materials on the base of aluminium. Lysuyi M. V., Mozgovyi O. V., Biliuk A. I. Bulletin of VPI-VNTU. 2012. №3. P. 148 – 153.