

Особливості визначення характеристик пружності мікроламінітів за результатами вимірювання швидкості поширення пружних хвиль

Ю. Г. Безимянний*, Є. О. Козирацький, А. М. Колесников,
К. А. Комаров, В. А. Назаренко, О. В. Талько

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України
03142, Київ, Україна, вул. Кржижановського, 3
*E-mail: bezimyni@gmail.com

Для практичного використання нових матеріалів необхідно знати їх характеристики пружності. Експериментальне визначення характеристик пружності ультразвуковими методами потребує наявності функціонального зв'язку між ними та швидкостями поширення вимірюваних пружних хвиль. У кожному композиті зі складною структурою цей зв'язок має свої відмінності, які необхідно дослідити. В результаті аналізу особливостей мікроламінату методом фізичного моделювання для заданої структури композита проведено оцінку його властивостей пружності за значеннями цих характеристик для окремих вихідних компонентів й їх об'ємної концентрації. Методом акустичного моделювання встановлено функціональний зв'язок між характеристиками пружності мікроламінату та швидкостями поширення у ньому пружних хвиль. Експериментально досліджено особливості формування акустичних полів у мікроламініті на основі шарів Fe—Si. Поставлено та проведено оригінальний акустичний експеримент з оцінки характеристик пружності за результатами вимірювання швидкостей поширення нульової моди нормальної симетричної пружної хвилі. Дані експериментальних та теоретичних оцінок характеристик пружності зіставлені. Показано, що теоретичні оцінки дають завищені результати на 6—17% і не враховують, що після прокатки матеріал набуває текстури, для якої властива відмінність характеристик пружності у різних напрямках на 14%.

Ключові слова: мікроламініти, композиційний матеріал, анізотропне середовище, характеристики пружності, ультразвукові методи, швидкість поширення пружної хвилі.

Металеві мікроламініти — багат шарові металічні композити, в яких армуючими компонентами є тонкі перехідні зони між шарами з двох і більше різних металів чи сплавів, що являють собою матрицю композита [1]. Вони мають два особливих признаки: велику кількість шарів (до сотень-тисяч у одному міліметрі) та малу товщину перехідних зон (0,1—10 мкм). Така структура з комбінацією різних матеріалів дає можливість закладати в мікроламініти унікальні властивості: радіаційну стійкість, високі питомі механічні властивості, жароміцність, особливі магнітні властивості, і використовувати в авіаційній, ракетно-космічній техніці, автомобілебудівництві, радіоелектроніці, у лопатках парових турбін,

© Ю. Г. Безимянний, Є. О. Козирацький, А. М. Колесников, К. А. Комаров,
В. А. Назаренко, О. В. Талько, 2019

ріжучих інструментах, бронезахисних структурах, електропровідних виробках для низькотемпературних надпровідників та ін. [2].

Характеристики пружності матеріалу є одними з базових, які необхідно знати для забезпечення його надійної експлуатації [3]. Для традиційних матеріалів ці характеристики можна знайти у довіднику, але нові матеріали потребують їхнього визначення.

У композиційних матеріалів властивості пружності є його ефективними характеристиками [4]. Вони формуються не тільки властивостями вихідних компонентів, їхнім взаємним розташуванням, але й властивостями перехідних границь між ними [5]. Для нетрадиційних матеріалів розрахункові методи визначення цих характеристик не завжди можна використати [4], а застосування стандартних методів вимірювань [6], частіше за все, призводить до некоректних результатів [7].

Для експериментального визначення характеристик пружності матеріалів широко використовують ультразвукові методи [3]. Адекватне відображення цих характеристик потребує наявності функціонального зв'язку між ними та швидкостями поширення вимірюваних пружних хвиль [8]. Вид цього зв'язку залежить від властивостей матеріалу та акустичного поля, яке сформоване в об'єкті контролю [8, 9].

Стандартні ультразвукові методи визначення характеристик пружності базуються на відомих методиках, призначених для литих матеріалів [6]. Будова мікроламінітів і, відповідно, зв'язок між їх характеристиками пружності та швидкостями поширення вимірюваних пружних хвиль мають свої особливості. Тому закономірності формування акустичних полів в таких матеріалах та коректне визначення їх характеристик пружності за допомогою ультразвукових неруйнівних методів потребують окремого дослідження.

Мета роботи — дослідити закономірності формування характеристик пружності та акустичних полів в мікроламінатах, виявити функціональний зв'язок між цими характеристиками та швидкостями поширення пружних хвиль та експериментально перевірити адекватність теоретичних оцінок.

Для досягнення поставленої мети нами застосовано методологію адаптації ультразвукових методів до об'єкту дослідження [8], яка у даному випадку полягала в послідовному розв'язуванні задач: аналізі особливостей структури мікроламінату; моделюванні його властивостей пружності; постановки та проведенні експерименту з оцінки характеристик пружності за результатами вимірювання швидкостей поширення пружних хвиль; зіставленні експериментальних та теоретичних оцінок характеристик пружності.

Аналіз особливостей структури мікроламінату та моделювання його властивостей пружності

Мікроламінат являє собою регулярну одновимірну (за напрямом, перпендикулярним шарам) структуру (рис. 1) із сильною анізотропією, в якій на макрорівні формуються певні ефективні властивості відповідного конструкційного матеріалу [4]. Вони залежать від концентрації, фізичних і механічних властивостей, геометрії, ступеня зв'язності фаз, наявності дефектів й інших факторів [5, 8].



Рис. 1. Структура мікроламінату.

Ефективні характеристики матеріалу, які описують тензором, не вищим другого рангу, розраховують за правилом адитивності відповідних характеристик вихідних компонентів [4]. Так, для ефективної густини ρ_e , яка є скалярною величиною, за наявності в ламінації m шарів товщиною h_1 з матеріалу, який має густину ρ_1 , та n шарів товщиною h_2 — з матеріалу, який має густину ρ_2 , отримаємо

$$S_1 = \frac{mh_1}{mh_1 + nh_2}, S_2 = \frac{nh_2}{mh_1 + nh_2}, \rho_1 = s_1\rho_1 + s_2\rho_2, \quad (1)$$

Характеристики пружності описують тензором четвертого рангу, тому відносно них матеріал є анізотропним. Анізотропія в процесі створення композита закладається геометрією шарів, характером їх чергування та властивістю їх фаз. Для визначення властивостей пружності композита за значеннями окремих компонентів та їх об'ємної концентрації проводять адекватне моделювання композита [4].

Перехідні зони між шарами формуються в процесі виготовлення композита. Їх властивості зумовлені особливостями технології, яку використовують в процесі створення матеріалу. Тому цей фактор досить важко врахувати теоретично.

Оцінимо властивості пружності композита за значеннями цих характеристик для окремих вихідних компонентів й їх об'ємної концентрації, використовуючи адекватне моделювання для заданої структури композита, а також встановимо функціональний зв'язок між отриманими характеристиками та швидкостями поширення пружних хвиль.

Середовище, яке складається з шарів двох різних (однорідних й ізотропних) речовин, у ході їхнього нескінченного чергування веде себе як однорідне, але анізотропне по відношенню до хвиль, довжина λ яких у цих матеріалах значно більша за товщини шарів. По відношенню до своїх пружних властивостей таке середовище аналогічно кристалу з гексагональною симетрією. Його пружний стан повністю характеризують 5 пружних сталих [10].

Для елемента кристала з гексагональною симетрією (рис. 2) функціональний зв'язок пружних сталих C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} , C_{44} та швидкостей поширення поздовжніх V^l і поперечних V^t , $V_{(001)}^{(001)}$, $V_{(001)}^{(001)}$ пружних хвиль має вигляд [11]

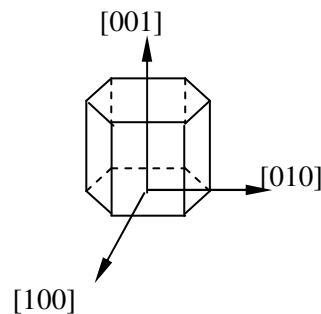


Рис. 2. Елемент кристала з гексагональною симетрією.

$$\begin{aligned} \rho \cdot (V_{[001]}^l)^2 &= C_{33}; \quad \rho \cdot (V_{(001)}^{[001]})^2 = \rho \cdot (V_{[001]}^t)^2 = C_{44}; \\ \rho \cdot (V_{(001)}^t)^2 &= C_{11}; \quad \rho \cdot (V_{(001)}^{(001)})^2 = \frac{C_{11} - C_{12}}{2}; \\ \rho \cdot (V_{[101]}^l)^2 &= \rho \cdot (V_{[011]}^l)^2 = \\ &= \frac{C_{11} + C_{33} + 2 \cdot C_{44}}{4} - [[(C_{11} - C_{33})/2]^2 + (C_{13} + C_{44})^2]^{1/2}/2, \end{aligned} \quad (2)$$

де нижній індекс V вказує на напрям чи площину поширення хвилі, а верхній — на площину чи напрям поляризації поперечної хвилі.

Якщо вважати, що шари середовища, яке розглядаємо, паралельні площині (001), то для нього можна встановити функціональний зв'язок між швидкостями поширення пружних хвиль та характеристиками пружності шарів [10]. Для швидкості пружної хвилі типу поздовжньої, яка поширюється в площині (001), цей зв'язок має вигляд

$$(V_{(001)}^l)^2 = \frac{1 + 4 s_1 s_2 \frac{(G_1 - G_2) \left[\frac{2 v_1 G_1}{(1 - 2 v_1)} + G_1 - \left(\frac{2 v_2 G_2}{(1 - 2 v_2)} + G_2 \right) \right]}{\left(\frac{2 v_1 G_1}{(1 - 2 v_1)} + 2 G_1 \right) \left(\frac{2 v_2 G_2}{(1 - 2 v_2)} + 2 G_2 \right)}}{\rho_c \left[\frac{s_1}{\left(\frac{2 v_1 G_1}{(1 - 2 v_1)} + 2 G_1 \right)} + \frac{s_2}{\left(\frac{2 v_2 G_2}{(1 - 2 v_2)} + 2 G_2 \right)} \right]}. \quad (3)$$

де s_i — відносна кількість речовини; G_i — модуль зсуву; v_i — коефіцієнт Пуассона; ρ_c — середня густина середовища ($\rho_c = \rho_e$); $i = 1, 2$ — номер речовини.

Для інших пружних сталей можна отримати функціональний зв'язок зі швидкостями поширення інших пружних хвиль, аналогічний (3).

Постановка вимірювального експерименту та його результати

Для вимірювання характеристик пружності було виготовлено зразок мікроламінату розмірами 28,55 x 27,12 x 0,15 мм на основі шарів Fe—Cu. Зразок отриманий прокаткою (10 проходів за кімнатної температури) заготовки у вигляді багат шарового ламінату товщиною 1,41 мм. Заготовку отримали прокаткою (1 прохід за температури 850 °С в обоймі, завареної в аргоні) складених по чергово семи шарів Fe та шести — Cu. Шари Fe мали товщину 380, а Cu — 85 мкм. Товщина шарів Fe після прокатки складала 17—25, а Cu — 2—5 мкм. Структуру поперечного перетину зразка показано на рис. 3.

Мета акустичного експерименту — отримати реальні значення жорсткості матеріалу та співставити їх з результатами моделювання (3) та даними з довідників. Для цього зразок прозвучували з торців (площина (001) на рис. 2) імпульсним методом за напрямом прокатки та перпендикулярно.

Постановку акустичного експерименту проводили на базі апаратного комплексу для прецизійних акустичних вимірювань [12]. Для забезпечення коректних ультразвукових вимірювань вид і параметри зондувального імпульсу, умови створення акустичного контакту, вид пружної хвилі у досліджуваному зразку та обробку приймального сигналу адаптували за

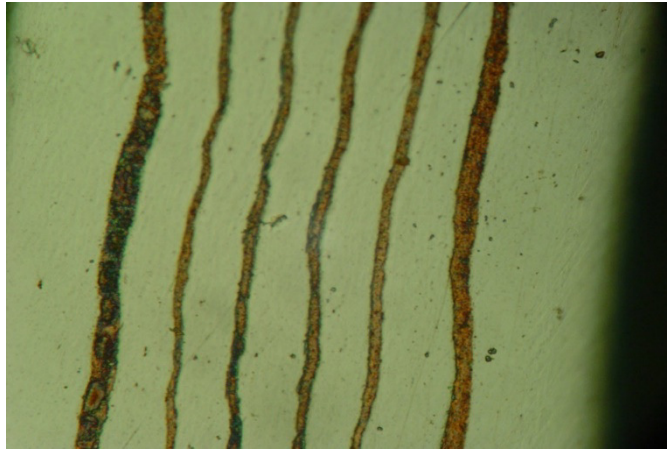


Рис. 3. Структура шліфа Fe—Cu мікроламінату.

результатами акустичного моделювання та аналізу реального акустичного поля до особливостей досліджуваного об'єкта.

Очищення акустичного поля від ревербераційних перешкод можливо за умов використання в процесі зондування радіоімпульсу. Оптимізація частоти заповнення імпульсу полягала у виборі її найбільшого значення, яке забезпечує реалізацію функціонального зв'язку (2), а саме $\lambda \gg h_i$. Цим умовам задовольняє частота 5 МГц. Оптимізація довжини імпульсу полягала у виборі його найменшого можливого значення [13], що для цієї частоти відповідає 2 нс. У результаті в зразку отримано адаптоване до його особливостей акустичне поле (рис. 4) нульової моди нормальної симетричної пружної хвилі V_{ps} [14], сформоване трьома сигналами, перший з яких проходить зразок наскрізь, а два наступних отримані відбиттям від торців.

Швидкість поширення V_{ps} вимірювали за методикою [14] із похибкою, яка не перевищує $\pm 0,75\%$. Густина зразка визначали методом гідростатичного зважування. Жорсткість матеріалу розраховували за формулою

$$c = \rho(V_{ps})^2. \quad (4)$$

Для співставлення з широко використовуваними характеристиками пружності ізотропного тіла жорсткість анізотропного композита умовно

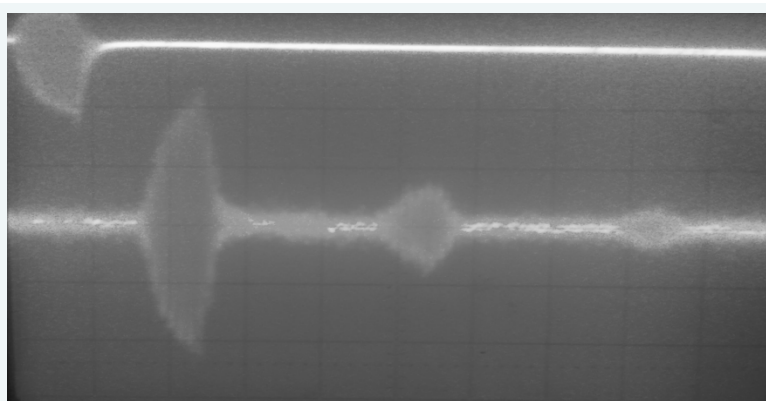


Рис. 4. Акустичне поле у зразку після адаптації.

Результати вимірювань, розрахунків та довідникові дані

Група зіставлення	Густина $\cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Швидкість, м/с	Жорсткість (пружна стала), ГПа	Модуль Юнга, ГПа
Модель	7,98	5615	251,6	—
Зразок (вздовж)	7,93	5120 ± 40	207,9 ± 4	189,4
Зразок (впоперек)		5470 ± 40	237,3 ± 4	216,2
Fe	7,8*	5850*	262,4	(195—205)*
Cu	8,9*	4700*	196,6	(110—130)*

*Дані [15].

перерахована в модуль Юнга E ізотропного матеріалу за відомою [6] функціональною залежністю

$$E = c[1 - (v_e)^2], \quad (5)$$

де v_e — ефективне значення коефіцієнта Пуассона, розраховане за формулою (1), де замість ρ підставлене v ($v_{Fe} = 0,28^*$; $v_{Cu} = 0,38^*$).

Оскільки характеристики пружності матеріалів у довідниках мають дуже великий розбіг [3], для визначеності всі фізико-механічні властивості Fe та Cu взято з довідника [15]. Розрахунки за результатами моделювання, вимірювань та даних з довідника наведені в таблиці.

З таблиці слідує, що експериментально отримана жорсткість c менше відповідної пружної сталі C_{11} на 6—17%. Це можна пояснити впливом перехідних зон, наявністю дефектів тощо. Жорсткість за напрямом прокатки на 14% менше, ніж в перпендикулярному. Це викликано наявністю текстури в композиті, наслідком якої є зменшення його симетрії, очевидно, до рівня ромбічної. І пружна стала, і жорсткість композита знаходяться в межах жорсткості матеріалів шарів, що є очікуваним. Співставлення результатів розрахунку характеристик пружності, отриманих за формулою (5), зі значеннями з довідника може скласти враження, що властивості композита перевищують характеристики пружності матеріалу шару з більшим модулем, хоча для нашого випадку насправді це не так. Це можна пояснити некоректністю використання традиційних для ізотропного матеріалу підходів з визначення характеристик пружності анізотропного композита, неузгодженістю даних у довіднику, наданих для акустичних та пружних характеристик матеріалу тощо.

Висновки

Теоретичні оцінки характеристик пружності мікроламінату дають дещо завищений результат порівняно з отриманими експериментальними значеннями. Акцентовано увагу на тому, що застосування функціональної залежності між швидкістю поширення пружної хвилі та характеристикою пружності ізотропного матеріалу у випадку анізотропії може призвести до некоректних результатів.

Розвитком цієї роботи можуть бути аналогічні дослідження для інших пружних сталей мікроламінату.

Список літератури

1. *Композиционные материалы: (Справ.)* / Под ред. Д. М. Карпиноса. Киев : Наук. думка, 1985. 592 с.

2. Неклюдов И.М., Белоус В.А., Воеводин В.Н., Диденко С.Ю., Ильченко Н.И., Диденко Ю.С., Ильченко Ю.Н. Перспективы производства и использования металлических микроламинатов, получаемых вакуумной прокаткой. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 2010. Т. 96, № 5. С. 89–94.
3. Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. *Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: (Справ.)*. Киев : Наук. думка, 1982. 266 с.
4. Скороход В.В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах. *Порошковая металлургия*. 1995. № 1/2. С. 53–71.
5. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. *Композиционные материалы: (Справ.)* / Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М. : Машиностроение, 1990. 512 с.
6. *Неразрушающий контроль: (Справ.)*. В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. М. : Машиностроение, 2006. 864 с.
7. Безмянный Ю.Г., Куцевский А.Е. Опыт совершенствования стандартов на методы определения свойств металлических порошков и спеченных изделий. *Порошковая металлургия*. 2003. № 1/2. С. 106–113.
8. Безмянный Ю.Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2007. № 4. С. 53–65.
9. Безмянный Ю.Г. Особенности использования акустических методов при контроле качества слоистых материалов. *Порошковая металлургия*. 1999. № 5/6. С. 24–29.
10. Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах*. М. : АН СССР, 1957. 504 с.
11. Дьелесан Э., Руайе Д. *Упругие волны в твёрдых телах. Применение для обработки сигналов*. М. : Наука, 1982. 424 с.
12. Безмянный Ю.Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов. *Порошковая металлургия*. 2001. № 5/6. С. 106–113.
13. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М. : Сов. радио, 1971. 672 с.
14. Ермолов И.Н. *Теория и практика ультразвукового контроля*. М. : Машиностроение, 1981. 240 с.
15. *Физические величины: (Справ.)* / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М. : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Особенности определения характеристик упругости микроламинатов по результатам измерения скорости распространения упругих волн

Ю. Г. Безмянный, Е. А. Козирацкий, А. Н. Колесников, К. А. Комаров,
В. А. Назаренко, О. В. Талько

Для практического использования новых материалов необходимо знать их характеристики упругости. Экспериментальное определение характеристик упругости ультразвуковыми методами требует наличия функциональной связи между ними и скоростями распространения измеряемых упругих волн. В каждом композите со сложной структурой эта связь имеет свои отличия, которые необходимо исследовать. В результате анализа особенностей структуры микроламината методом физического моделирования для заданной структуры композита проведена оценка его свойств упругости по значениям этих характеристик для отдельных исходных компонентов и их объемной

концентрации. Методом акустического моделирования установлена функциональная связь между характеристиками упругости микроламината и скоростями распространения в нем упругих волн. Экспериментально исследованы особенности формирования акустических полей в микроламинате на основе слоев Fe—Cu. Поставлен и проведен оригинальный акустический эксперимент по оценке характеристик упругости по результатам измерения скоростей распространения нулевой моды нормальной симметричной упругой волны. Результаты экспериментальных и теоретических оценок характеристик упругости сопоставлены. Показано, что теоретические оценки дают завышенные значения на 6—17% и не учитывают, что после прокатки материал приобретает текстуру, для которой характерно отличие характеристик упругости в разных направлениях на 14%.

Ключевые слова: микроламинаты, композиционный материал, анизотропная среда, характеристики упругости, ультразвуковые методы, скорость распространения упругой волны.

Features of determination of microlaminate elasticity characteristics by results of speed elastic waves measurement

Yu. G. Bezimyanniy, E. A. Kozirackiy, A. M. Kolesnykov,
K. A. Komarov, V. A. Nazarenko, O. V. Talko

For the practical use of new materials, it is necessary to know their elastic characteristics. The experimental determination of elasticity characteristics by ultrasonic methods requires a functional connection between them and the propagation velocities of the measured elastic waves. In each composite with a complex structure, this connection has its own differences, which must be investigated. As a result of the analysis of the structural features of microlaminate by physical modeling for a given composite structure, its elasticity properties are estimated from the values of these characteristics for individual initial components and their volume concentration. Through acoustic modeling, a functional relationship is established between the elasticity characteristics of the microlaminate and the propagation velocities of elastic waves in it. The features of the formation of acoustic fields in a microlaminate based on Fe—Cu layers were experimentally investigated. An original acoustic experiment was carried out to evaluate the characteristics of elasticity by measuring the propagation velocities of the zero mode of a normal symmetric elastic wave. The results of experimental and theoretical estimates of elasticity characteristics are compared. It is shown that theoretical estimates give 6—17% higher results and do not take into account that, as a result of rolling, the material acquires a texture that is characterized by a 14% difference in elasticity characteristics in different directions.

Keywords: microlaminates, composite material, anisotropic medium, elasticity characteristics, ultrasonic methods, elastic wave speed.