

УДК 620.17, 539.533, 539.32, 539.67

М. В. Лисий, к. фіз.-мат., н.; А. І. Білюк, к. фіз.-мат., н.;**Н. С. Кравчук, к. т. н.; А. А. Білюк**

ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЮНГА, МОДУЛЯ ЗСУВУ Й МЕЖИ ПРУЖНОСТІ СИСТЕМ Al-Cu ТА Al-Cu-Zn ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МІКРОТВЕРДОСТІ Й МЕХАНІЧНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

У роботі оцінено модуль нормальної пружності E (модуль Юнга), модуль зсуву G й межу пропорційності (пружності) $\sigma_{пр}$ для алюмінієвих сплавів Al-2%Cu, Al-4%Cu, Al-4%Cu-1%Zn і Al-4%Cu-6%Zn за допомогою методів мікротвердості й механічної спектроскопії, що дозволяє широко їх застосовувати для отримання стандартних, а також спеціальних механічних характеристик матеріалів.

Ключові слова: модуль пружності, модуль зсуву, межа пружності, мікротвердість, інденстор, коефіцієнт Пуассона, внутрішнє тертя.

Вступ

Модуль пружності E (модуль Юнга), модуль зсуву G й межа пропорційності (пружності) $\sigma_{пр}$ є одними із найважливіших характеристик пружних властивостей матеріалу. Їх широко застосовують для розрахунку механічних характеристик пружин, мембран, діафрагм, різних пристроїв літальних апаратів та для оцінки зносостійкості деталей, що працюють [1, 2]. Однак для одного й того ж матеріалу ці характеристики залежать від низки зовнішніх і внутрішніх чинників (термообробки, напряду волокна, структури, хімічного складу тощо). Наприклад, старіння берилієвої бронзи збільшує E більш, ніж на 20% [2]. Для сірого чавуну E може змінюватися від $0,5 \cdot 10^5$ до $1,8 \cdot 10^5$ МПа (у 3,6 рази) залежно від кількості й характеру графіту, який виступає в ролі мікропор [1].

Наявні статичні (розтяг, згин, стиск тощо) способи визначення цих характеристик не придатні для контролю готових виробів без порушення їхньої цілісності, оскільки необхідно вирізати спеціальні зразки для досліджень, тобто пошкодити деталь. Тому для визначення характеристик E , G і $\sigma_{пр}$ матеріалу готового виробу доцільно використати методи контактного деформування (метод мікротвердості) і механічної спектроскопії (внутрішнє тертя).

Матеріали і методика досліджень

У нашій роботі досліджено модуль нормальної пружності E (модуль Юнга) і межу пропорційності (пружності) $\sigma_{пр}$ за допомогою методу мікротвердості та рівнянь Герца і Маєра [3, 4]. Мікротвердість вимірювали приладом ПМТ-3. Модуль зсуву G (ефективний модуль зсуву f^2) досліджували за допомогою методу механічної спектроскопії на низькочастотному приладі (~ 1 с⁻¹) типу оберненого крутильного маятника [5, 6]. Для дослідження вибрали сплави Al-2%Cu і Al-4%Cu, Al-4%Cu-1%Zn, Al-4%Cu-6%Zn, які твердіють дисперсійно. Ці сплави широко використовують у машинобудуванні.

Результати досліджень

Оцінювали значення модуля Юнга E за формулою Герца [4]:

$$d^3 = 6PR \left(\frac{1-\mu_i^2}{E_i} + \frac{1-\mu^2}{E} \right), \quad (1)$$

де P – навантаження на індентор (індентор – алмазна піраміда з кутом при вершині між гранями 136°), d – діагональ відбитка на досліджуваній деталі за певного навантаження P , μ_i – коефіцієнт Пуассона індентора ($\mu_i = 0,07$ [4]), E_i – модуль Юнга індентора ($E_i = 1140$ ГПа [4]), E – модуль Юнга досліджуваного матеріалу, μ – коефіцієнт Пуассона досліджуваного матеріалу, R – радіус індентора при основі ($R = 0,7$ мм [4]).

Із рівності (1) знаходимо модуль Юнга E досліджуваного матеріалу

$$E = \frac{1-\mu^2}{\frac{d^3}{6PR} \frac{1-\mu_i^2}{E_i}} \quad (2)$$

Отже, за відомих μ , μ_i , E_i , і R для визначення модуля Юнга E досліджуваного матеріалу необхідно виміряти величину навантаження P , яке діє на індентор, і відповідне йому значення діагоналі відбитка d . Однак оцінка E за одного навантаження не завжди буде надійною, оскільки закон пропорційності деформації й напруження дійсний лише в першому наближенні. Тому E визначають як середнє значення із серії дослідів, виконаних у деякому діапазоні навантажень. Отже, формулу (2) можна переписати у вигляді:

$$E = \frac{1-\mu^2}{\frac{1}{6Rn} \sum_{i=1}^n \frac{d_i^3}{P_i} \frac{1-\mu_i^2}{E_i}} \quad (3)$$

де n – число вимірювань.

Середнє значення $\frac{d^3}{P}$ брали з табл. 1, а середнє значення коефіцієнта Пуассона μ_{cp} досліджуваного матеріалу приймали, згідно з табл. 2, як середнє значення, отримане із крайніх значень μ для кожного матеріалу, зібраних із джерел [1, 4]. Усереднення μ проводили для сплаву Al-4%Cu, що вносить похибку $\sim 1 - 4\%$ у визначенні E досліджуваних матеріалів (див. табл. 2).

Таблиця 1

Навантаження P, H		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
Al – 4% Cu	$d \cdot 10^2, \text{мм}$	9,03	10,55	11,98	13,19	14,19	15,94	17,55	19,04
	$\frac{d^3 \cdot P \cdot 10^4}{\text{мм}^3/\text{H}}$	7,36	7,83	8,60	9,18	9,52	10,13	10,81	11,50

Таблиця 2

Коефіцієнт Пуассона сплавів алюмінію [1, 4]

Матеріал	Коефіцієнт Пуассона, μ		Гранична похибка $(1 - \mu^2), \%$
	Граничні значення	Середнє значення	
Сплави алюмінію	0,31 – 0,34	0,325	1,1

Дослідні дані оцінки E методом мікротвердості представленні в табл. 3.

Визначення модуля Юнга статичним [7] і контактним (метод мікротвердості) методами

Матеріал	Статичний метод $E_{ст}$, МПа	Контактний метод $E_{м}$, МПа	$E_{ст}/E_{м}$
Al-2%Cu	78100	77000	1,01
Al-4%Cu	79200	78000	1,02
Al-4%Cu- 1%Zn	79500	78400	1,01
Al-4%Cu- 6%Zn	79550	78500	1,01

В основу методики визначення межі пропорційності (пружності) $\sigma_{пр}$ за результатами методу мікротвердості покладені різні показники степеня в залежностях між діагонально відбитку d і навантаженням P в пружній і пластичних областях рівнянь Герца і Маєра [3,4], які описують рівняння

$$P = \frac{1}{6R\left(\frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_i^2}{E_i}\right)} d^3, \quad P = ad^n, \quad (4)$$

де a і n – константи пластичності, причому n має значення, близьке до двох.

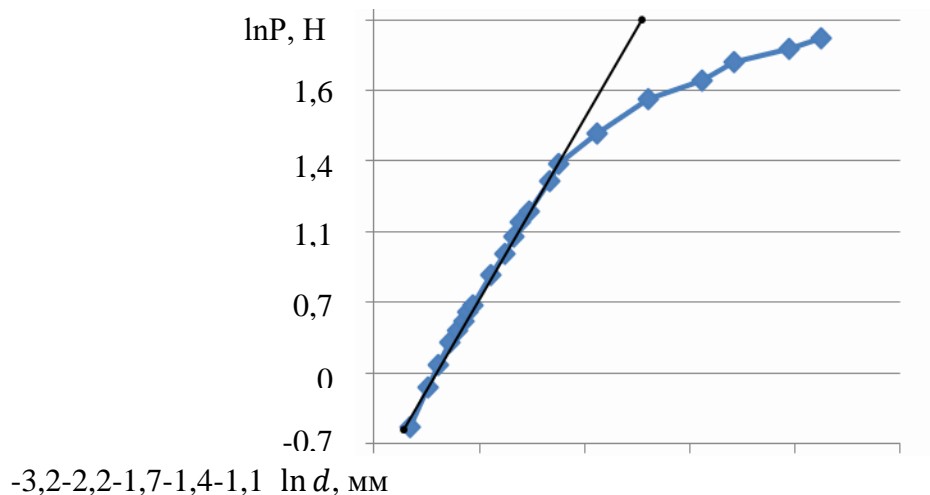


Рис. 1. Експериментальна діаграма мікротвердості Al-4%Cu в логарифмічних координатах

Оскільки в рівнянні Герца показник степеня дорівнює трьом, а в рівнянні Маєра близько двох, то під час переходу від пружної області до пластичної спостерігатиметься точка перегину внаслідок різних показників степеней у рівняннях Герца і Маєра, якщо ці залежності показати графічно в логарифмічних координатах. Тоді навантаження, яке відповідає точці перегину, відповідатиме межі між пружною і пластичною областями. Найявність точки перегину добре підтверджена експериментом (рис. 1). За цими діаграмами були визначені P і d , які відповідають першим точкам перегину, а за рівняннями [7] були розраховані границі пружності $\sigma_{пр}$ матеріалів (див. табл. 4):

$$\sigma_{пр} = 0,636 \cdot \frac{P}{d^2}. \quad (5)$$

Таблиця 4

Межі пропорційності $\sigma_{пр}$ для алюмінієвих сплавів

Матеріал	Термообробка (гарг.+відпуск) К	H_{μ} , МПа	Метод мікротвердості, $\sigma_{пр}$, МПа	Метод розтягу $\sigma_{пр1}$, МПа [1, 7]
Al-2%Cu	783+423	823	92	96 – 99
Al-4%Cu	783+423	930	105	110 – 112

Формування та стабілізація в алюмінії і його сплавах дислокаційної субструктури [8, 9] насамперед переслідує мету підвищення їхніх фізико-механічних властивостей. Використання цих матеріалів у машинобудуванні потребує забезпечення стабільних покращених механічних властивостей у широкому температурному інтервалі.

Розрахунок модуля зсуву G проводили за формулою [5]:

$$G = 4\rho l^2 \frac{R}{n^2} K_T f^2, \tag{6}$$

де n – номер гармоніки; R – розрахунковий коефіцієнт для зразків із прямокутним і круглим поперечним перерізами, визначений у роботі [10] ($R=1$); K_T – розрахунковий коефіцієнт, який урахує температурні умови досліджень і геометричні співвідношення [10]; ρ – густина матеріалу, l – довжина зразка.

У таблицях 5, 6 наведено результати досліджень ефективних модулів зсуву $G \sim f^2$ для алюмінієвих сплавів і залежність f^2 від температури для відпаленого сплаву Al-4%Cu. На залежності $f^2 = f(T)$ спостерігаємо зменшення f^2 після 573 К. Дослідження показали [6, 8, 9], що модуль зсуву зазнає суттєвих змін за температур формування і стабілізації зміцнювальної субструктури.

Таблиця 5

Ефективний модуль зсуву f^2 для алюмінієвих сплавів

Матеріал	Al-2%Cu	Al-4%Cu	Al-4%Cu-1%Zn	Al-4%Cu-6%Zn
f^2, c^2	0,371	0,375	0,381	0,384

Таблиця 6

Залежність ефективного модуля зсуву f^2 сплаву Al-4%Cu від температури [6]

T, К	273	293	373	473	573	673	773
Al-4%Cu	0.405	0,375	0,364	0,356	0,345	0,347	0,338

Аналіз результатів досліджень ефективного модуля зсуву f^2 , наведених у табл. 5, 6 та в роботах [6, 8, 9], дозволяє скорегувати термічну дію на матеріал так, щоб одержати підвищення механічних характеристик із збереженням на достатньо високому рівні демпфувальних властивостей, підвищити однорідність структури і зменшити деформацію деталей.

Висновки

1. Механічні характеристики алюмінієвих сплавів, виміряні методом мікротвердості, добре узгоджуються із результатами визначення механічних характеристик статичним методом, а похибки вимірювань цим методом в межах інтервалу 1 – 4%.

2. Результати дослідження показали, що залежність діагоналі відбитку d від навантаження P в логарифмічних координатах має точку перегину внаслідок різних степеней у рівняннях Герца і Маєра. Тому навантаження, яке відповідає точці перегину, відповідатиме межі між пружною і пластичною областями.

3. Ефективний модуль зсуву f^2 , виміряний методом механічної спектроскопії, добре узгоджується із визначенням цієї характеристики статичним методом, оскільки похибки вимірювань за цими методами в межах інтервалу 2 – 5%. Крім цього, дослідження ефективного модуля зсуву f^2 методом механічної спектроскопії дозволяє скорегувати термічну дію на матеріал так, щоб одержати підвищення механічних характеристик із збереженням на достатньо високому рівні демпфувальних властивостей, підвищити однорідність структури і зменшити деформацію деталей.

Отже, дослідження свідчать про можливість широкого застосування методів мікротвердості й механічної спектроскопії для отримання не тільки стандартних, але й спеціальних механічних характеристик. Це дозволяє виміряти механічні властивості деталей безпосередньо без їхнього пошкодження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Францевич И. Н. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов / И. Н. Францевич, Ф. Ф. Воронов, С. А. Бакута. – К. : Наукова думка, 1982. – 286 с.
2. Пастухова Ж. П. Пружинные сплавы цветных металлов / Ж. П. Пастухова, А. Г. Рахштадт. – М. : Металлургия, 1984. – 284 с.
3. Майер К. Физико-химическая кристаллография / К. Майер. – М. : Металлургия, 1972. – 21 с.
4. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 248 с.
5. Механическая спектроскопия металлических материалов / [Блантер М. С., Головин И. С., Головин С. А. и др.]. – М. : МИА, 1994. – 256 с.
6. Закономірності зміни механічних характеристик систем Al-Cu, Al-Zn під час еволюції субструктури / П. М. Зузяк, А. І. Білюк, В. Й. Ходек [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – № 3. – С. 119 – 121.
7. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М. : Машиностроение, 1979. – 196 с.
8. Білюк А. І. Вплив термоцикування під навантаженням на структурні зміни дисперсійно-твердіючих алюмінієвих сплавів / А. І. Білюк // Металлофізика і новейші технології. – 1997. – Т. 19. – № 6. – С. 78 – 80.
9. Karbivskyi O. F. Impact of thermocycling on aluminum alloy polygonal structure / O. F. Karbivskyi, A. I. Biliuk, M. V. Lysyi, V. I. Savuliak // Technomus. – 2017, Romania. – P. 117 – 122.
10. Новик А. Релаксационные явления в кристаллах / А. Новик, Б. Берри. – М. : Атомиздат, 1975. – 472 с.

Лисий Михайло Вікторович – к. фіз.-мат. н., доцент кафедри загальної фізики.

Вінницький національний технічний університет.

Білюк Анатолій Іванович – к. фіз.-мат. н., доцент кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії.

Кравчук Наталія Сергіївна – к. т. н., доцент кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії.

Білюк Анатолій Анатолійович – магістр кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії.

Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського.