

УДК 669-176:548.4

PACS number(s): 62.20.-x, 81.70.Bt, 46.40.-f

АНИЗОТРОПІЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУПЕРДУРАЛЮМІНУ 1160

А. Брюханов, Н. Праведная

*Південноукраїнський державний педагогічний університет ім. К.Д. Ушинського
вул. Старопортофранківська, 26, 65020 Одеса, Україна
e-mail: pravedna300579@mail.ru*

Сплав піддавали годинному відпалу при 500⁰С, загартовували у воді, вальцювали за кімнатної температури на 70% за товщиною листа. Вивчали текстуру і механічні властивості сплаву під час статичних, повторних статичних та динамічних циклічних навантажень на вигин. Визначено наявність полицки плинності при випробуваннях на вигин, на відміну від випробувань на розтягування. Знайдено анізотропію модуля пружності, межі плинності і межі витривалості у площині вальцювання.

Ключові слова: супердуралюмін, гартування, вальцювання, текстура анізотропія, полицка плинності, модуль пружності, межа витривалості.

Алюмінієві сплави, завдяки легкості, високій питомій міцності, високій корозійній стійкості застосовують нині у широкому спектрі галузей промисловості і побуту від авіації і космонавтики до будівництва і туристичного обладнання [1, 2]. Сплави алюмінію, що випробовують структурні перетворення у разі термічної обробки, посідають особливе місце завдяки значному зміцненню при добрій пластичності [1]. Тому-таки сплави широко використовують у відповідальних конструкціях за температур до 230⁰С [2]. При експлуатації вироби завжди піддаються дії не лише статичних, але й динамічних знакозмінних навантажень. Численні дослідження засвідчили, що статичну короточасну дію можна розглядати як окремий випадок циклічної дії [3]. Тому вивчення поведінки напівфабрикатів, виробів і конструкцій в умовах дії змінних зовнішніх навантажень є актуальним.

Звичайно статичні випробування проводять на розтягування чи стиснення. Особливістю діаграми розтягування-стиснення алюмінієвих сплавів є те, що на ній немає полицки плинності, яка є на діаграмі маловуглецевих сталей [2]. Тому для алюмінієвих сплавів визначають умовну межу плинності – напруження, після зняття якого елемент матиме залишкову деформацію 0,2% [2]. Схема напружено-деформованого стану у випробуваннях на згин суттєво відрізняється від стану випробувань на розтягування–стиснення. Тому діаграми випробувань на згин можуть суттєво відрізнятися від діаграм випробувань на розтягування–стиснення, як при статичних, так і при динамічних циклічних навантаженнях.

З огляду на вищезазначене, метою статті є вивчення механічних властивостей сплаву супердуралюмінію 1160 під час повторних статичних та динамічних циклічних навантажень.

Смуги сплаву супердуралюмінію 1160 (Cu (3,8...4,5)% – Mg (1,2...1,6) % – Mn (0,8...0,9) % – Ti (до 1 %) решта Al) початкової товщини 2,5 мм після годинного відпалу при 500⁰С загартовували у воді кімнатної температури, а згодом вальцювали при кімнатній температурі на лабораторному прокатному стані з діаметром валів 180 мм малими обтисканнями (3–5%) до 70% деформації по товщині. Після цього листи відпалювали за температури 100⁰С протягом 1 години для стабілізації механічних властивостей [4]. Далі з листів вирізали по 3 партії прямокутних зразків розміром 10×100 мм через кожні 15⁰ від напрямку вальцювання (НВ) до поперечного напрямку (ПН) для випробувань на згин. Для зменшення впливу розмірів зразків на неточності вимірювань всі зразки обробляли в пакеті.

Статичні випробування на згин проводили на установці, розробленій в Інституті проблем міцності НАН України [5] (рис. 1).

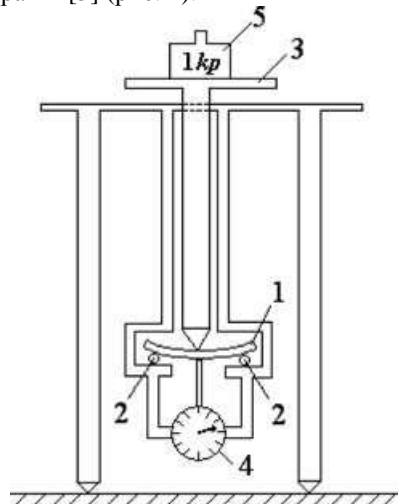


Рис. 1. Схема установки для статичних випробувань на згин

Зразок 1 визначили на нерухомі циліндрові опори (ролики) так, щоб його поздовжня вісь була строго перпендикулярна до опорних роликів 2. Після встановлення зразка опускали упор 3 з вантажною площиною, а потім встановлювалися на нуль свідчення індикатора деформації 4–годинного типу з ціною поділки 0,01 мм. Зразок поступово навантажували мірними вантажами 5. Після установки кожного вантажу витримували 5–7 с, а далі визначали прогинання зразка. Крок навантаження становив 1 Н, що відповідало напруженню 6,125 МПа для вищезазначених розмірів зразків.

Вимірювання складалося з двох циклів навантаження і розвантаження згином для кожного зразка. При цьому фіксували прогинання посередині зразків і вагу, яка зумовлювала прогинання зразка. За експериментальними даними про вагу прикладеного вантажу P і прогинання f смуг завтовшки h , шириною b і завдовжки (відстань між опорами) l розраховували напруження σ в зовнішніх волокнах смуг за співвідношенням [5]:

$$\sigma = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (1)$$

а також відносну деформацію ε за формулою [5]:

$$\varepsilon = \frac{6hf}{l^2} \quad (2)$$

і будували відповідну залежність. Відносна похибка у визначенні напружень та деформацій не перевищувала 1,5%.

Для втомних випробувань з листів вирізали стандартні прямокутні зразки типу IV [6] у поздовжньому (НВ), діагональному (під кутом 45° до НВ) і поперечному (ПН) напрямках листів. Схему установки для втомних випробувань показано на рис. 2.

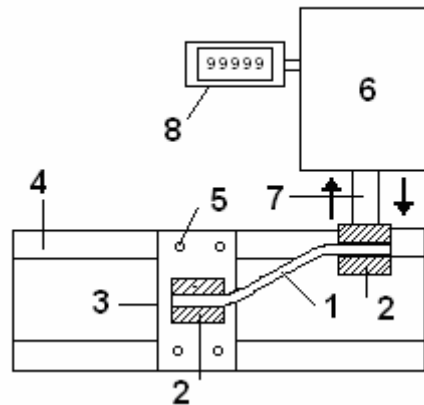


Рис. 2. Схема установки для втомних випробувань плоских зразків

Зразок 1 закріплюється в затискачах 2 типу решіт. Лівий затискач нерухомо закріплений в утримувачі 3 на супорті 4 гвинтами 5. Утримувач 3 може переміщатися по направляючих типу “ластівчиний хвіст” супорта 4, для того, щоб можна було встановлювати зразки різної довжини. Електродвигун на 220 В з редуктором 6 передає штовхачу 7 з правим затискачем зразка зворотно-поступальний рух, як це показано стрілками. Отож, зразок 1 циклічно згинається з частотою 1 Гц. Кількість циклів підраховують лічильником циклів 8. Для реєстрації кількості циклів до руйнування зразка використовували автоматизовану систему [7] на основі рахункового пристрою типу Н2-7ЕА3, що володіє високою стійкістю до перешкод і пам’яттю, а це дуже важливо при раптовому відключенні електроенергії, а також при стрибках її значень в процесі проведення випробувань. Порівняння межі витривалості алюмінію за допомогою вищезазначеної автоматизованої системи підрахунку кількості циклів з даними інших авторів показали достатньо близькі результати, що свідчить про достатню точність реєстрації кількості циклів [7].

База випробувань – 10^7 циклів. Параметри циклічних випробувань вибрані на підставі аналізу проблеми низькочастотного втомного руйнування [6]. Амплітуда згину зразка від нульового положення рівноваги при цьому становила 6,5 мм. З метою визначення прикладеного напруження при згині проводили попередні дослідження залежності згинаючого напруження від довжини зразка між точкою закріплення і точкою дії згинальної сили і від товщини зразка. Згинальну силу виміряли за допомогою

динамометра. Для таких досліджень використовували окремі зразки, які мали товщину і ширину такі самі, що і зразки для втомних випробувань. При випробуваннях, для того щоб отримати потрібне напруження згином за певної товщини зразка, між краями затискачів встановлювали відстань, визначену при попередніх вищеописаних дослідженнях. Отож, прикладене напруження змінювали шляхом зміни відстані між краями затискачів для кожної товщини зразків. Напруження розраховували за формулою для прямокутного зразка [6]:

$$\sigma = \frac{6Fl}{bh^2}, \quad (3)$$

де F – сила, що згинає зразок, Н, l – відстань між нерухомим та рухомим затисками, м, b – ширина зразка, м, h – товщина зразка, м. Помилка при цьому не перевищувала 2%.

Кристалографічну текстуру вивчали рентгенівським методом з побудовою прямих і обернених полюсних фігур [8]. Зйомку кривих полюсної густини проводили на дифрактометрі ДРОН-3 м в $K\alpha$ – випромінюванні молібдену.

Аналіз полюсних фігур дав підстави дійти висновку, що після деформації у досліджуваному сплаві утворилася текстура вальцювання ГЦК – металів і сплавів типу міді, яка може бути описана як сукупність ідеальних орієнтувань, коли паралельно до площини листа розташовані кристалографічні площини з індексами Міллера $\{110\}$ та $\{112\}$ і одночасно кристалографічні напрями $\langle 112 \rangle$ та $\langle 111 \rangle$, що розміщені у вищеперелічених площинах, збігаються з напрямом вальцювання, тобто $\{110\} \langle 112 \rangle + \{112\} \langle 111 \rangle$ з об'ємним змістом приблизно 60 і 40% відповідно, що підтверджується даними інших авторів [8, 9].

Типові діаграми напруження – деформація при випробуваннях на статичний згин зразків сплаву, вирізаных у НВ, НВ + 45⁰ та ПН, показані на рис. 3, 4 та 5, відповідно.

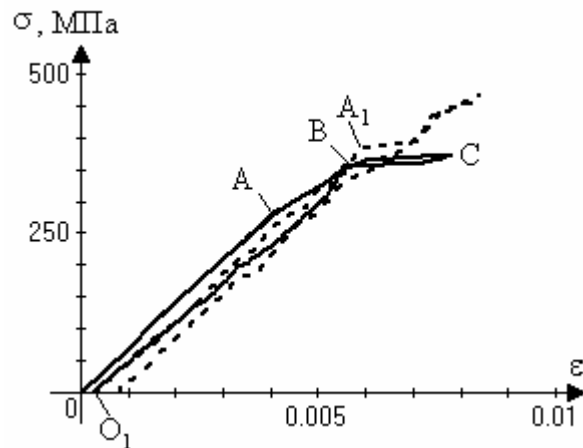


Рис. 3. Діаграма згину зразка сплаву, вирізаного у НВ-листа

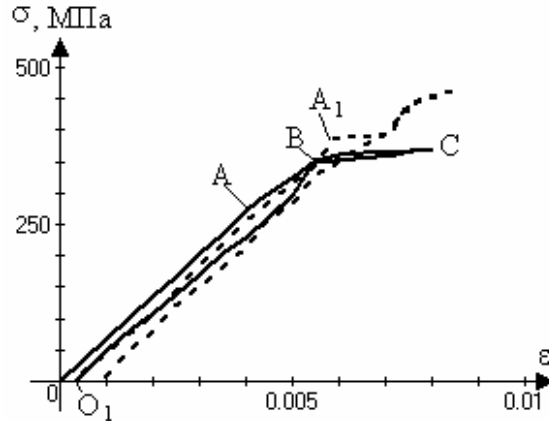


Рис. 4. Діаграма згину зразка сплаву, вирізаного у діагональному напрямі листа

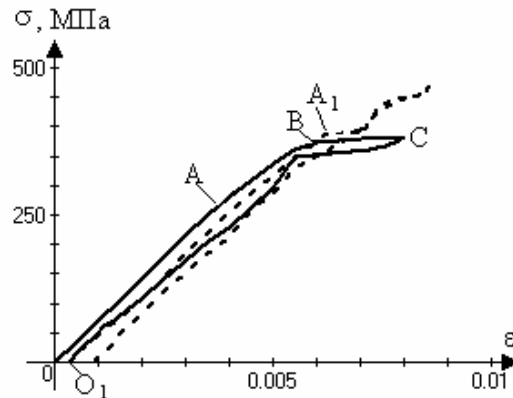


Рис. 5. Діаграма згину зразка сплаву, вирізаного у ПН-листа

На запропонованих діаграмах спостерігаються характерні ділянки: OA – пружної деформації; AB – деформаційного зміцнення; BC – статичної повзучості; O_1A_1 – пружної деформації при повторному згині. Як було зазначено, на діаграмах розтягування–стиснення алюмінієвих сплавів немає [2]. На рис. 3–5 показано полічку плинності досить чітко і відповідає ділянці BC – статичності повзучості при випробуваннях на згин, що суттєво відрізняє поведінку досліджуваного сплаву від його поведінки під час розтягування–стиснення. На підставі порівняння діаграм першого (суцільна лінія) та повторного циклу статичних випробувань на згин (штрихова лінія) можна дійти висновку, що в умовах навантаження–розвантаження згином досліджуваний алюмінієвий сплав після вищезазначеної технологічної обробки веде себе як пружно-ідеально-пластичний матеріал при остаточній деформації після першої циклу випробувань на згин $\Delta\epsilon_d \sim 3 \cdot 10^{-4}$ (рис. 3–5).

Оцінки засвідчили, що простежується анізотропія характеристик пружності і плинності. Зокрема, статичний модуль Юнга в поздовжньому напрямі (НВ) $E_{НВ} = 70,3$ ГПа, у діагональному (НВ + 45°) – $E_{45} = 67,3$ ГПа, а в поперечному (ПН) – $E_{ПН} = 71,2$ ГПа. Межа плинності у НВ – $\sigma_{НВ} = 367$ МПа, НВ + 45° – $\sigma_{45} = 360$ МПа, а у ПН – $\sigma_{ПН} = 382$ МПа. Отримані чисельні результати по межі плинності відповідають технічним вимогам стандарту для нагартованого сплаву Д16 [10]. Наші оцінки

засвідчили, що коефіцієнт анізотропії η ($\eta = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\min}} \cdot 100\%$, де F – відповідна

властивість) вищезазначених властивостей становив приблизно 6%. Максимальне значення межа плинності та модуль Юнга мають у ПН, а мінімальне – у діагональному напрямі. Аналогічний характер анізотропії вищезазначених властивостей, зумовлений кристалографічною текстурою, раніше простежувався у листах холодновальцьованого алюмінію [11].

Типові результати наших випробувань на втому у разі згину представлені на рис. 6 для поздовжнього зразка, вирізаного у НВ-листа.

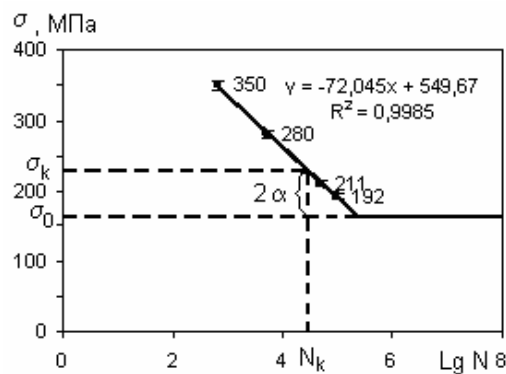


Рис. 6. Крива втому для зразка, вирізаного у НВ-листа

На рис. 6 по осі ординат відкладене згинальне напруження σ (МПа), а по осі абсцис – логарифм кількості циклів до руйнування. Тут точки – дані експерименту, вертикальними відрізками показано відносну помилку, лінію (її рівняння також показано) – результат лінійного кореляційного аналізу. На рис. 6 показано також значення коефіцієнта R кореляції між величинами, отриманими з рівняння прямої, і експериментальними значеннями. За цими даними, користуючись розрахунково-експериментальним методом Іванової [6], ми оцінили межу витривалості. Згідно з [6], енергія, що витрачається на процес руйнування, залишається постійною за будь-яких напружень циклу, що перевищують межу витривалості, і дорівнює прихованій теплоті плавлення металу. Для визначення межі витривалості цим методом випробовують на втому не менше трьох зразків і за отриманими результатами будують в координатах $\sigma - \lg N$ відрізок лівої частини кривої втому (рис. 6), на якому знаходять точку з абсцисою, відповідною до числа циклів N_k і ординатою, відповідною до напруження σ_k . Величину N_k визначають як критичне число циклів, досягнення якого у разі напруження σ_k приводить до виникнення необоротних спотворень кристалічної ґратки і субмікроскопічних тріщин. Для алюмінію і його сплавів приймають $N_k = 3,0 \cdot 10^4$ циклів [6]. Межу витривалості обчислювали за формулою [6]:

$$\sigma_0 = \sigma_k - 2\alpha,$$

де α – циклічна константа руйнування. Чисельне значення $\alpha = 35$ МПа для алюмінію, міді і сплавів на їхній основі [6]. Керуючись нашими експериментальними даними, ми отримали значення межі витривалості $\sigma_0 = 157$ МПа. (За даними [6] межа витривалості алюмінієвого сплаву Д16 (після гарту і природного старіння) становить 160 МПа. Аналогічні дані з тривалої міцності наводять для алюмінієвих сплавів близького

хімічного складу імпортного виробництва [12]). Зроблені оцінки показали, що межа витривалості для зразків, вирізаних з листів у діагональному напрямі, – 150 МПа, а для зразків, вирізаних у ПН-листів, – 170 МПа. Тобто простежується анізотропія межі витривалості, характер анізотропії якої відповідає вищеописаному характеру анізотропії межі плинності і модуля пружності. Виявлені закономірності можуть бути поясненими, якщо взяти до уваги, що природа анізотропії втомки визначається тими ж чинниками, що впливають на анізотропію опору пластичної деформації та руйнуванню, найбільш суттєвими з яких є кристалографічна та механічна текстура [11]. Порівнюючи отримані межі витривалості σ_0 і плинності σ_r для різних напрямів листів можна дійти висновку, що є приблизне співвідношення між ними $\sigma_0 \approx 0,4\sigma_r$. В літературі [6] приводиться співвідношення між межею витривалості для симетричного циклу σ_{-1} і межею плинності σ_r у вигляді $\sigma_{-1} = (0,55 \dots 0,86)\sigma_r$, але при цьому не конкретизується матеріал.

Отже, показано, що:

1. В листах сплаву супердуралюмін 1160 після гарту, холодного вальцювання на 70% по товщині й годинного відпалу при 100⁰С для стабілізації властивостей формується кристалографічна текстура типу {110} <112> + {112} <111> з об'ємним змістом вищезазначених орієнтувань приблизно 60 і 40%, відповідно.

2. На діаграмах напруження – деформація згином – простежені поличка плинності на відміну від діаграми випробувань на розтягування–стискання.

3. Визначено модулі пружності та межу плинності для різних напрямів листів сплаву з діаграм напруження – деформація згином. Визначено анізотропію модуля пружності і межі плинності у площині вальцювання сплаву. Зокрема, статичний модуль Юнга у НВ $E_{НВ} = 70,3$ ГПа, у діагональному напрямі (НВ + 45⁰) – $E_{45} = 67,3$ ГПа, а у ПН – $E_{ПН} = 71,2$ ГПа. Межа плинності у НВ – $\sigma_{НВ} = 367$ МПа, у НВ + 45⁰ – $\sigma_{45} = 360$ МПа, а у ПН – $\sigma_{ПН} = 382$ МПа.

4. Визначено умовну межу витривалості сплаву при віддольовому циклі σ_0 . Знайдено анізотропію межі витривалості сплаву в площині вальцювання. Так у НВ $\sigma_0 = 157$ МПа, у діагональному напрямі – 150, а у ПН – 170 МПа. Визначено анізотропію з коефіцієнтом 6% модуля пружності і межі плинності у площині вальцювання сплаву.

1. *Колачев Б.А.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – М. : МИСИС, 2001. – 416 с.
2. Металлы и сплавы. Справочник / В.К. Афонин, Б.С. Ермаков, Е.Л. Лебедев и др. Под ред. Ю.П. Солнцева. – СПб. : НПО “Профессионал”, НПО “Мир и Семья”, 2003. – 1090 с.
3. *Потапова Л.Б.* Механика материалов при сложном напряженном состоянии / Л.Б. Потапова, В.П. Ярцев. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 244 с.
4. *Smith W.F.* Structure and Properties of Engineering Alloys / W.F. Smith. – New York : Mc Graw-Hill Inc., 1981. – 512 p.
5. *Войтенко А.Ф.* Влияние уровня напряжений на статический модуль Юнга ряда конструкционных материалов / А.Ф. Войтенко, Ю.Д. Скрипник, Н.Г. Соловьева и др. // Проблемы прочности. – 1982. – № 11. – С. 83–87.
6. *Трощенко В.Т.* Сопротивление усталости металлов и сплавов [Справочник] / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – К. : Наукова думка, 1987. – 1238 с.
7. *Усов В.В.* Автоматизированная система регистрации циклов при вибрационных испытаниях образца / В.В. Усов В.В., Н.М. Шкатуляк., А.Н. Титенков [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – №2. – С. 60–63.

8. *Бородкина М.М.* Рентгенографический анализ текстур в металлах и сплавах / М.М. Бородкина, Э.Н. Спектор. – М. : Металлургия, 1982. – 272 с.
9. *Полухин П.И.* Физические основы пластической деформации / П.И. Полухин, С.С. Горелик, В.К. Воронцов. – М. : Металлургия, 1982. – 584 с.
10. Справочник по металлопрокату [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metal3000.ru>
11. *Микляев П.Г.* Анизотропия механических свойств металлов / П.Г. Микляев, Я.Б. Фридман. – М. : Металлургия, 1986. – 244 с.
12. *Manufacturing Engineering and Technology* / [3 rd Ed.]. – Addison-Wesley, Longman Boston, MA, U.S.A., 1995. – 1271 p.

ANISOTROPY OF MECHANICAL PROPERTIES OF SUPERDURALUMIN 1160

A. Bryukhanov, N. Pravednaya

*K.D. Ushinski South-Ukrainian State Pedagogical University
Staroportofrankovskaya Str., 26, UA-65020 Odessa, Ukraine
e-mail: pravedna300579@mail.ru*

An alloy was annealed during the 1 hour at temperature 500⁰C, was quenched in water, and was rolled at the room temperature on 70% through thickness. The crystallographic texture and mechanical properties were studied in the process of static, repeated static and dynamic cyclic loading on bend. A yield platform was observed on diagram set of stress – deformation unlike the tests on tension. Anisotropy of elasticity, yielding stress and limit of endurance on bending is found in the plane of rolling a sheet.

Key words: superduralumin, quenching, rolling, texture, anisotropy, ground of yield, elastic modulus, limit of endurance.

АНИЗОТРОПИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУПЕРДУРАЛЮМИНА 1160

А. Брюханов, Н. Праведная

*Южно-украинский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского
ул. Старoportofранковская, 26, 65020 Одесса, Украина
e-mail: pravedna300579@mail.ru*

Сплав подвергали часовому отжигу при 500⁰C, закаливали в воде, прокатывали при комнатной температуре на 70% по толщине листа. Изучали текстуру и механические свойства сплава во время статических и динамических циклических нагрузок на изгиб. Установлена площадка текучести при изгибе в отличие от испытаний на растяжение. Найдена анизотропия модуля упругости, предела текучести и предела выносливости в плоскости прокатки.

Ключевые слова: супердуралюмин, закалка, прокатка, текстура, анизотропия, площадка текучести, модуль упругости, предел выносливости.

Стаття надійшла до редколегії 29.05.2009

Прийнята до друку 07.06.2010