

Н.П. Праведна

## Анізотропія механічних властивостей алюмінієвого сплаву Д16 при повторних квазістатичних і вібраційних навантаженнях згином після гарту і вальцювання

*Південноукраїнський державний педагогічний університет ім. К.Д. Ушинського,  
вул. Старопортофранківська, 26, м. Одеса, 65020, Україна, e-mail: 300579@mail.ru*

Сплав піддавали годинному відпалу при 500<sup>0</sup>С, загартовували у воді, вальцювали при кімнатній температурі на 70 % по товщині листа. Вивчали текстуру і механічні властивості сплаву під час статичних, повторних квазістатичних та вібраційних навантажень на вигин. Встановлено наявність площадки текучості при випробуваннях на вигин на відміну від випробувань на розтягування. Знайдено анізотропію модуля пружності, межі текучості і межі витривалості у площині вальцювання.

**Ключові слова:** супердюралюмін, гартування, вальцювання, квазістатичні навантаження, вібраційні навантаження, текстура, анізотропія, площадка текучості, модуль пружності, межа витривалості.

*Стаття поступила до редакції 09.11.2010; прийнята до друку 15.09.2011.*

### Вступ

Роль алюмінієвих сплавів як конструкційних матеріалів сучасної техніки постійно зростає практично у всіх галузях промисловості [1, 2]. Для поліпшення фізико-механічних властивостей сплавів на основі алюмінію використовуються гарт, пластична деформація, термічна і термомеханічна обробка. При цьому деформація, виконана в процесі природного старіння, у багато яких сплавів викликає зниження межі міцності в порівнянні з межею міцності, одержуваною при старінні сплавів після деформації. Тому рекомендується проводити деформацію сплавів типу дюралюмін у свіжозагартованому стані [2].

На практиці різноманітні металеві матеріали й конструкції піддаються не тільки статичним, але й динамічним вібраційним навантаженням. Як показали численні дослідження, статичну короткочасну дію можна розглядати як окремий випадок циклічної дії [3]. Звичайно статичні випробування проводять на розтягування чи стиснення. Особливістю діаграми розтягування-стиснення алюмінієвих сплавів є те, що на ній немає майданчика текучості, яка є на діаграмі маловуглецевих сталей [4]. Тому для алюмінієвих сплавів визначають умовну межу текучості – напруження, після зняття якого елемент буде мати залишкову деформацію 0,2 % [4]. Алюмінієвий сплав Д16, досліджуваний в даній роботі, відноситься до сплавів, що зміцнюються термомеханічною обробкою.

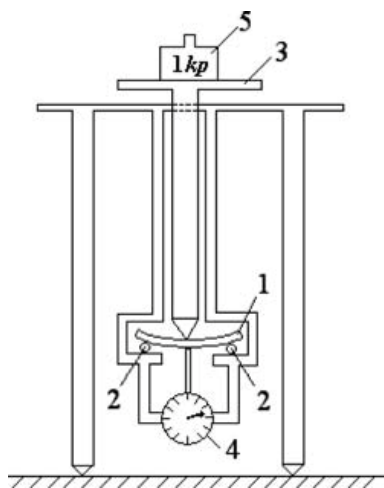
Для таких сплавів широко застосовується зміцнення холодною деформацією (нагартування). Сильне нагартування використовується для виробів простої форми (листи, плити, іноді поковки) [2, 4]. Сплав Д16 призначений для силових елементів конструкцій літаків, кузовів автомобілів, труб і т.д., для деталей, що працюють при температурах до 230<sup>0</sup>С [2, 4]. Значна частина вищезгаданих деталей та елементів конструкцій піддається вібраційним навантаженням на згин. Тому вивчення поведінки сплаву при випробуваннях на згин є актуальним.

Схема напружено-деформованого стану при випробуваннях на згин суттєво відрізняється від стану при випробуваннях на розтягування-стиснення. Тому діаграми випробувань на згин можуть суттєво відрізнятися від діаграм випробувань на розтягування-стиснення, як при повторних статичних, так і при вібраційних навантаженнях. У зв'язку з вищевикладеним, метою даної статті є вивчення впливу холодного вальцювання Д16 на його механічні властивості під час повторних статичних та динамічних циклічних навантаженнях.

### І. Методика експерименту

Смуги сплаву Д16 (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 в муфельній печі при 500<sup>0</sup>С загартовували у воді кімнатної температури, а потім вальцювали при кімнатній температурі на лабораторному прокатному

стані з діаметром валів 180 мм малими обжиманнями (3 – 5 %) до 70 % деформації по товщині. Після цього листи відпалювали при температурі 100<sup>0</sup>С на протязі 1 години для стабілізації механічних властивостей [5]. Далі з листів вирізували по 3 партії прямокутних зразків розміром 10×100 мм через кожні 15<sup>0</sup> від



**Рис. 1.** Схема установки для квазістатичних випробувань на згин.

напряму вальцювання (НВ) до поперечного напряму (ПН) для квазістатичних випробувань на згин. Для зменшення впливу розмірів зразків на погрішності вимірювань всі зразки обробляли в пакеті.

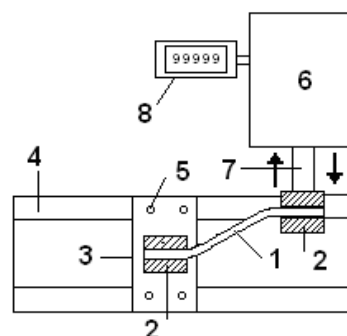
Квазістатичні випробування на згин проводили на установці, розробленій в Інституті проблем міцності НАН України [6] (рис. 1). Зразок 1 встановлювався на нерухомі циліндрові опори (ролики) так, щоб його подовжня вісь була строго перпендикулярна опорним роликам 2. Після встановлення зразка опускався упор 3 з вантажною площиною, а потім встановлювалися на нуль свідчення індикатора деформації 4 годинного типу з ціною поділки 0,01 мм. Зразок поступово навантажувалася мірними вантажами 5. Після установки кожного вантажу робилася витримка 5 – 7 с, а потім визначалося прогинання зразка. Крок навантаження склав 1 Н, що відповідало напруженню 6,125 МПа для вищевказаних розмірів зразків. Вимірювання складалося з двох циклів навантаження і розвантаження згином для кожного зразка. При цьому фіксували прогинання по середині зразків і вагу, яка викликала 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  $\sigma$  в зовнішніх волокнах смуг по співвідношенню [6]:

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

а також відносну деформацію  $\epsilon$  по формулі [6]:

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

і будували відповідну залежність. Відносна похибка у визначенні напружень та деформацій не



**Рис. 2.** Схема установки для втомних випробувань плоских зразків.

перевищувала 1,5 %.

Схема установки для втомних випробувань представлена на рис. 2. Для втомних випробувань з листів вирізали стандартні прямокутні зразки типу IV [7] у подовжньому (НВ), діагональному (під кутом 45<sup>0</sup> до НВ) і поперечному (ПН) напрямках листів. Зразок 1 закріплюється в затисках 2 типу лещат. Лівий затиск нерухомо закріплений в утримувачі 3 на супорті 4 гвинтами 5. Утримувач 3 може переміщатися по направляючих типу «ластівчин хвіст» супорта 4, з тим, щоб можна було встановлювати зразки різної довжини. Електродвигун на 220 В з редуктором 6 передає штовхачу 7 з правим затиском зразка зворотно-поступальний рух, як це показано стрілками. Таким чином, зразок 1 циклічно згинається з частотою 1 Гц. Число циклів підраховується лічильником циклів 8. Для реєстрації числа циклів до руйнування зразка використовували автоматизовану систему [8] на основі рахункового пристрою типу Н2-7ЕА3 [9], що володіє високою стійкістю до перешкод і пам'яттю. Порівняння межі витривалості алюмінію за допомогою вищезазначеної автоматизованої системи підрахунку числа циклів з даними інших авторів показала достатньо близькі результати, що свідчить про достатню точність реєстрації числа циклів [8].

База випробувань – 10<sup>7</sup> циклів. Параметри циклічних випробувань вибрані на підставі аналізу проблеми низькочастотного втомного руйнування [7]. Амплітуда згину зразка від нульового положення рівноваги при цьому складала 6,5 мм. Для визначення прикладеного напруження при згині проводили попередні дослідження залежності згинаючого напруження від довжини зразка між точкою закріплення і точкою дії згинаючої сили і від товщини зразка. Згинаючу силу виміряли за допомогою динамометра. 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 при певній товщині зразка, між краями затисків встановлювали відстань, визначену при попередніх вищевказаних дослідженнях. Таким чином, прикладене напруження змінювали шляхом зміни відстані між краями затисків для кожної товщини зразків. Помилка розрахунків не

перевищувала 2 %.

Кристалографічну текстуру вивчали рентгенівським методом з побудовою прямих і обернених полюсних фігур [10]. Зйомку кривих полюсної густини проводили на дифрактометрі ДРОН-3 м в  $K_{\alpha}$ - випромінюванні молібдену.

## II. Результати експерименту та їх обговорення

Аналіз полюсних фігур дозволив дійти висновку, що після деформації в досліджуваному сплаві утворилася текстура вальцювання ГЦК – металів і сплавів типу міді, яка може бути описана як сукупність ідеальних орієнтувань, коли паралельно площині листа розташовані кристалографічні площини з індексами Міллера  $\{110\}$  та  $\{112\}$  і одночасно кристалографічні напрями  $\langle 112 \rangle$  та  $\langle 111 \rangle$ , що лежать у вищезазначених площинах, співпадають з напрямом вальцювання, тобто  $\{110\} \langle 112 \rangle + \{112\} \langle 111 \rangle$  з об'ємним змістом приблизно 60 і 40 % відповідно, що підтверджується даними і інших авторів [10, 11].

Типові діаграми напруження – деформація при випробуваннях з на квазістатичний згин зразків сплаву Д16, вирізаних у НВ, НВ + 450 ті ПН, показані на рис. 3, 4 та 5. відповідно. На представлених діаграмах спостерігаються характерні ділянки: ОА – пружної деформації; АВ – деформаційного зміцнення; ВС – статичної повзучості;  $O_1A_1$  – пружної деформації при повторному згині. Як згадувалося вище, на діаграмах розтягування-стиснення алюмінієвих сплавів відсутній майданчик текучості [4]. На представлених рис. 3 – 5 майданчик текучості виявляється досить чітко і відповідає ділянці ВС – статичної повзучості при випробуваннях на згин, що суттєво відрізняє поведінку досліджуваного сплаву від його поведінки при розтягуванні-стисненні. З порівняння діаграм першого (суцільна лінія) та повторного циклу статичних випробувань на згин (штрихова лінія) можна дійти висновку, що в умовах навантаження-розвантаження згином досліджуваній 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 показали, що спостерігається анізотропія характеристик пружності і текучості. Так, статичний модуль Юнга в подовжньому напрямі (НВ)  $E_{НВ} = 70,3$  ГПа, у діагональному (НВ + 450) –  $E_{45} = 67,3$  ГПа, а в поперечному (ПН) –  $E_{ПН} = 71,2$  ГПа. Межа текучості у НВ –  $\sigma_{НВ} = 367$  МПа, НВ + 450 –  $\sigma_{45} = 360$  МПа, а у ПН –  $\sigma_{ПН} = 382$  МПа. Отримані чисельні результати по межі текучості відповідають технічним вимогам стандарту для нагартованого сплаву Д16 [12, 13]. Наші оцінки показали, що коефіцієнт анізотропії  $\eta$

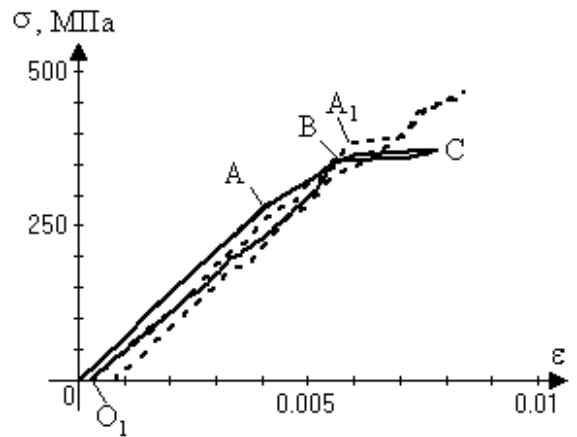


Рис. 3. Діаграма згину зразка сплаву Д16, вирізаного у подовжньому напрямі листа.

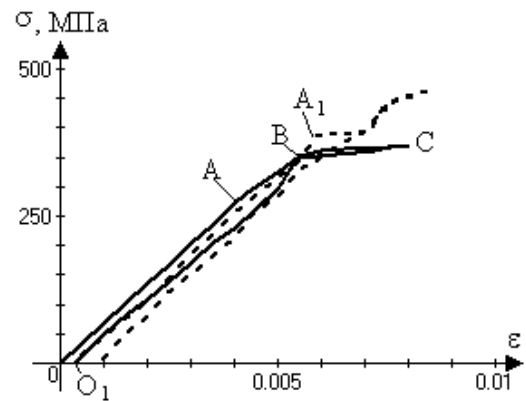


Рис. 4. Діаграма згину зразка сплаву Д16, вирізаного у діагональному напрямі листа.

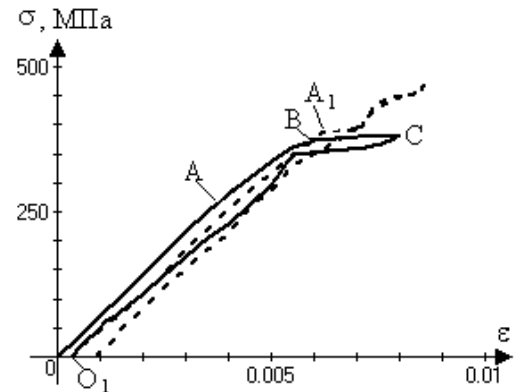


Рис. 5. Діаграма згину зразка сплаву Д16, вирізаного у поперечному напрямі листа.

$$\eta = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\min}} \cdot 100\%$$

(де  $F$  – відповідна властивість) вищезазначених властивостей склав приблизно 6%. Максимальне значення межа текучості та модуль Юнга мають у ПН, а мінімальне – у діагональному напрямі. Аналогічний характер анізотропії вищезгаданих властивостей, обумовлений кристалографічною текстурою, раніше спостерігався у листах холоднодеформованого вальцюванням

алюмінію [14].

Типові результати наших випробувань на втому при згині представлені на рис. 6 для подовжнього зразка, вирізаного у НВ листа. На рис. 6 по осі ординат відкладене згинаюче напруження  $\sigma$  (МПа), а по осі абсцис – логарифм числа циклів до руйнування. Тут точки - дані експерименту,

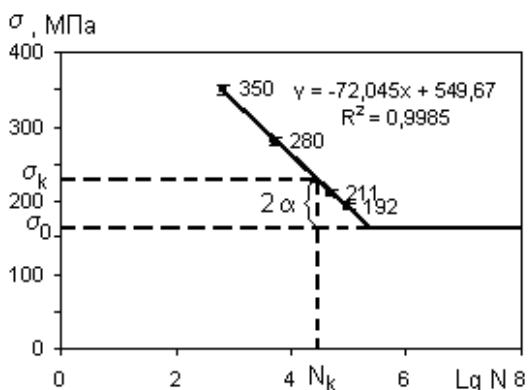


Рис. 6. Крива втоми для зразка сплаву Д16, вирізаного у подовжньому напрямі листа.

вертикальними відрізками показана відносна помилка, лінія (її рівняння також показано) - результат лінійного кореляційного аналізу. На рис. 6. приведено також значення коефіцієнта R кореляції між величинами, отриманими з рівняння прямої, і експериментальними значеннями. За представленими даними, користуючись розрахунково-експериментальним методом Іванової [7, с. 128], ми оцінили межу витривалості. Згідно [7, с. 128], енергія, що затрачується на процес руйнування, залишається постійною при будь-яких напруженнях циклу, що перевищують межу витривалості, і дорівнює прихованій теплоті плавлення металу. Для визначення межі витривалості цим методом випробовують на втому не менш трьох зразків і по отриманих результатах будують в координатах  $\sigma - \lg N$  відрізок лівої частини кривої втоми (рис. 6), на якому знаходять точку з абсцисою, відповідною числу циклів  $N_k$  і ординатою, відповідною напруженню  $\sigma_k$ . Величину  $N_k$  визначають як критичне число циклів, досягнення якого при напруженні  $\sigma_k$  приводить до виникнення необоротних спотворень кристалічної ґратки і субмікроскопічних тріщин. Для алюмінію і його сплавів приймають  $N_k = 3,0 \cdot 10^4$  циклів [7, с. 128]. Межу витривалості обчислювали по формулі [7, с. 128]:

$$\sigma_0 = \sigma_k - 2\alpha \quad (1)$$

де  $\alpha$  – циклічна константа руйнування. Чисельне значення  $\alpha = 35$  МПа для алюмінію, міді і сплавів на їх основі [7, с. 128]. Виходячи з наших

експериментальних даних, ми отримали значення межі витривалості  $\sigma_0 = 157$  МПа. (За даними [15] межа витривалості алюмінієвого сплаву Д16 (після гарту і природного старіння) складає 160 МПа. Аналогічні дані приводяться для алюмінієвих сплавів близького хімічного складу імпортного виробництва [16]). Зроблені нами 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 спостерігається анізотропія межі витривалості, характер анізотропії якої відповідає вищеописаному характеру анізотропії межі текучості і модуля пружності. Виявлені закономірності можуть бути пояснені, якщо прийняти до уваги, що природа анізотропії втими визначається тими ж чинниками, що впливають на анізотропію опору пластичної деформації та руйнуванню, найбільш істотними з яких є кристалографічна та механічна текстура [14]. Порівнюючи отриманні нами межі витривалості  $\sigma_0$  і текучості  $\sigma_T$  для різних напрямів листів можна дійти висновку, що між ними існує приблизне співвідношення  $\sigma_0 \approx 0,4\sigma_T$ . В літературі [7] приводиться співвідношення між межею витривалості для симетричного циклу  $\sigma-1$  і межею текучості  $\sigma_T$  у вигляді  $\sigma-1 = (0,55 \dots 0,86)\sigma_T$ , але при цьому не конкретизується матеріал.

## Висновки

1. Встановлено, що в листах сплаву Д16 на основі алюмінію після гарту, холодного вальцювання на 70 % по товщині і годинного відпалу при 100 °С для стабілізації властивостей формуються кристалографічна текстура типу  $\{110\} \langle 112 \rangle + \{112\} \langle 111 \rangle$  з об'ємним змістом приблизно 60 і 40 % відповідно.
2. Знайдено, що на діаграмах напруження – деформація згином спостерігається майданчик текучості на відміну від діаграми випробувань на розтягування-стискання.
3. Визначено модулі пружності та межа текучості для різних напрямів листів сплаву з діаграм напруження – деформація згином. Встановлено анізотропію з коефіцієнтом 6 % модуля пружності і межі текучості у площині вальцювання сплаву.
4. Визначено умовну межу витривалості сплаву при отнулевому циклі навантаження на основі втомних випробувань на згин у різних напрямках листів сплаву. Знайдено анізотропію межі витривалості сплаву у площині вальцювання.

**Праведна Н.П.** - фахівець науково-дослідного сектору Південноукраїнського національного університету імені К.Д.Ушинського.

[1] В.Г. Давыдов. О некоторых актуальных проблемах разработки алюминиевых сплавов и технологий для авиакосмического применения // *Известия вузов. Цветная металлургия*, (4), сс. 32–36 (2001).

- [2] Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. МИСИС, М. 416 с. (2001).
- [3] Л.Б. Потапова, В.П. Ярцев. *Механика материалов при сложном напряженном состоянии*. Машиностроение-1, М. 244 с. (2005).
- [4] *Металлы и сплавы. Справочник*. Коллектив авторов. Под ред. Ю.П. Солнцева. НПО "Профессионал", НПО "Мир и Семья", Санкт-Петербург. 1090 с. (2003).
- [5] Smith and F. William, *Structure and Properties of Engineering Alloys*. Mc Graw-Hill Inc., New York. 672 p. (1993), [www.engr.ku.edu/~rhale/ae510/aluminum/sld007.htm](http://www.engr.ku.edu/~rhale/ae510/aluminum/sld007.htm).
- [6] А.Ф. Войтенко, Ю.Д. Скрипник, Н.Г. Соловьева, Г.Н. Надеждина. Влияние уровня напряжений на статический модуль Юнга ряда конструкционных материалов // *Проблемы прочности*, (11), сс. 83–87 (1982).
- [7] В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. *Сопrotивление усталости металлов и сплавов: Справочник*. Наукова думка, Киев. 1238 с. (1987).
- [8] В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк, А.Н. Титенков, Н.Н. Цибанев. Автоматизированная система регистрации циклов при вибрационных испытаниях образца // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, (2), сс. 60–63 (2008).
- [9] [www.5v.ru/h2-7ea3](http://www.5v.ru/h2-7ea3)
- [10] М.М. Бородкина, Э.Н. Спектор. *Рентгенографический анализ текстур в металлах и сплавах*. Металлургия, М., 272 с. (1982)
- [11] П.И. Полухин, С.С. Горелик, В.К. Воронцов. *Физические основы пластической деформации*. Металлургия, М., 584 с. (1982).
- [12] [www.metal3000.ru](http://www.metal3000.ru)
- [13] В.С. Биронт. *Материаловедение: Учебное пособие*. ГОУ ВПО "ГУЦМиЗ", Красноярск, 312 с. (2003), [http://gold.krasu.ru/faculti/dis\\_obraz/mitom/1\\_m\\_kn1.htm#\\_Алюминий\\_и\\_его%20сплавы](http://gold.krasu.ru/faculti/dis_obraz/mitom/1_m_kn1.htm#_Алюминий_и_его%20сплавы).
- [14] П.Г. Микляев, Я.Б. Фридман. *Анизотропия механических свойств металлов*. Металлургия, М., 244 с. (1986).
- [15] [www.svarchik.ru/vibracion.htm](http://www.svarchik.ru/vibracion.htm)
- [16] *Manufacturing Engineering and Technology*, 3 rd Ed., Addison-Wesley, Longman Boston, MA, U.S.A., 1271 p. (1995), [www.engr.ku.edu/~rhale/ae510/aluminum/sld039.htm](http://www.engr.ku.edu/~rhale/ae510/aluminum/sld039.htm).