

УДК 539.43; 537.39

**Г. Писаренко, докт. техн. наук; А. Бабуцький, канд. техн. наук;  
А. Майло**

*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України*

## **ЗВ'ЯЗОК ЛОКАЛЬНОЇ НЕПРУЖНОСТІ ЗІ ВТОМОЮ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ D16T, ОБРОБЛЕНОГО ІМПУЛЬСАМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ**

*Результати експериментальних досліджень дозволяють встановити взаємозв'язок між характеристиками витривалості й локальною непружністю алюмінієвого сплаву D16T, обробленого імпульсами електричного струму. Доведено, що за умов циклічного навантаження зростає дисперсія кута зсуву фаз між напруженням і деформацією. Оброблення струмом призводить до зменшення дисперсії кута зсуву фаз і збільшення довговічності за умов циклічного деформування.*

**Ключові слова:** втома, непружність, пошкоджуваність, оброблення імпульсами електричного струму, джоулів розігрів.

**G. Pisarenko, A. Babutsky, A. Maylo**

## **THE RELATIONSHIP BETWEEN LOCAL INELASTICITY AND FATIGUE FOR THE D16T ALUMINUM ALLOY AFTER IMPULSE CURRENT TREATMENT**

*The results of the experimental investigations allow establishing the relationship between the characteristics of durability and local inelasticity for the D16T aluminum alloy after impulse current treatment. It is shown that under cyclic loading an increase in the phase-shift angle dispersion between the stress and strain takes place. The impulse current treatment causes a decrease in the phase-shift angle dispersion and an increase in the durability under cyclic deformation.*

**Key words:** fatigue, inelasticity, damageability, the pulses of current treatment, Joule heat.

**Вступ.** Результати досліджень ефекту імпульсів електричного струму (ІЕС) високої щільності на механічні властивості металевих матеріалів свідчать про позитивний вплив такого оброблення на втомні характеристики металевих матеріалів (див., наприклад, [1]). Слід відзначити, що прогресу у розумінні механізму дії (ІЕС) на міцність металевих матеріалів не досягнуто, незважаючи на наявність ряду моделей, що описують вплив ІЕС [2,3]. Отже, існує необхідність проведення подальших, перш за все – експериментальних досліджень.

Опір конструкційних матеріалів повторно-змінному навантаженню чутливий до структурної неоднорідності. Локальні об'єми матеріалу мають різні фізико-механічні властивості, що неоднорідно розподіляються по об'єму полікристалічного матеріалу. Такі особливості будови призводять до неоднорідного напруженого стану по об'єму навантаженого зразка конструкційного матеріалу при деформуванні.

Отже, матеріал з високою гомогенністю структури матиме вищі характеристики втоми внаслідок того, що мікроструктурний стан однорідніший за об'ємом. У такого матеріалу рівень мікронеоднорідності напруженого стану на локальному рівні буде нижчий, ніж у такого ж, але з більшою неоднорідністю структури, що є причиною розкиду втомної довговічності. Таким чином, виявлення впливу оброблення ІЕС на однорідність (гомогенність) структури матеріалу може бути кроком до розуміння механізму підвищення його границі витривалості при циклічному деформуванні.

Відомо, що недосконалість структури конструкційного матеріалу при деформуванні можна виразити через характеристику непружності [4,5]. Кількісно непружність можна визначити, наприклад, за значенням кута зсуву фаз, виміряного між напруженням і деформацією [6].

Результати досліджень цієї роботи спрямовані на встановлення взаємозв'язку між характеристиками втоми (довговічності) і локальними характеристиками непружності алюмінієвого сплаву Д16Т, після оброблення ІЕС. Характеристику локальної непружності визначали за методикою, описаною у роботі [7].

**Методика експериментальних досліджень.** При визначенні впливу ІЕС на опір втомі випробування проводили на циліндричних півхвильових ( $\lambda/2$ ) зразках із алюмінієвого сплаву Д16Т (рис. 1) з діаметром робочої частини 7,5 мм і шорсткістю поверхні  $R_a = 0,32$  мкм. Навантажували зразки за методикою [8], на магнітострикційній резонансній установці при симетричному циклі з частотою навантаження 17 кГц, у режимі поздовжніх коливань. Розподіл напружень розтягу-стискування по довжині зразка

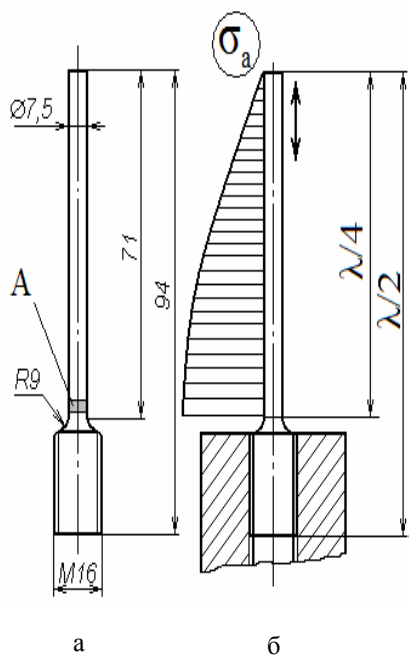


Рисунок 1 – Ескіз зразка для втомних випробувань (а) і схема його навантаження (б); А – зона вимірів локальної непружності

відповідає гармонічному закону з максимальним значенням у вузловому перерізі (рис. 1б), розміщеного біля галтелі, де руйнується зразок на базі навантаження. Унаслідок дисипації енергії у матеріалі досліджуваного зразка відбувається його розігрів, що вносить додаткову пошкоджувальність і не дозволяє у явному вигляді виділити пошкоджувальність, зумовлену циклічним деформуванням. Для зменшення термічної активації пошкоджувальності використовували примусове повітряне охолодження зразка.

Усього випробували дві групи зразків. За результатами випробувань першої групи (у стані постачання) будували базову криву втоми. Зразки другої групи спочатку навантажували циклічно, таким чином, щоб кількість циклів напрацювання відповідала інкубаційній стадії пошкодження (близько 10% довговічності), тоді обробляли ІЕС і продовжували втомні випробування.

Обробляли ІЕС генератором імпульсного струму, схема якого зображена на рис. 2а. Він складається із джерела високої

напруги, батареї, електромеханічних розрядників (замикачів) і баластного опору. Амплітуду струму, період і тривалість імпульсу реєстрували поясом Роговського, сигнали з якого опрацьовували за допомогою швидкісної аналого-цифрової плати ЕОМ

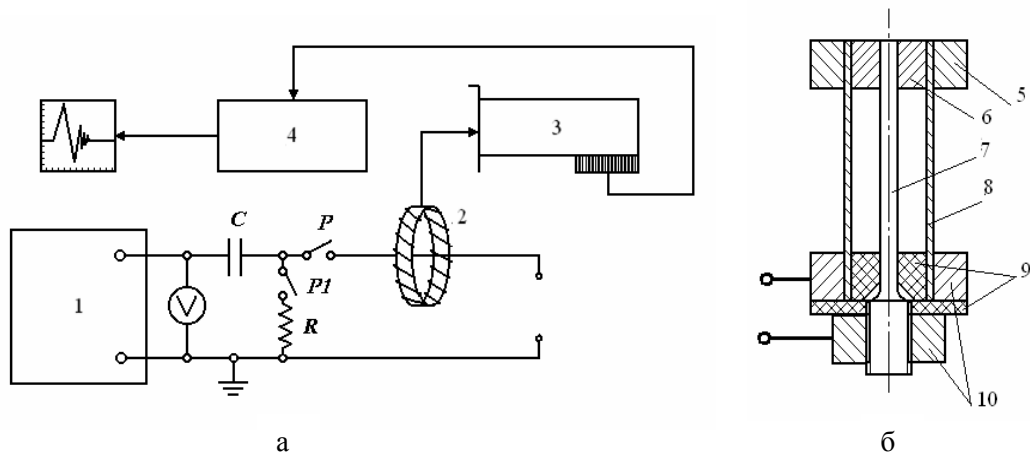


Рисунок 2 – Схема генератора ІЕС і реєстрації параметрів імпульсу струму (а), монтаж зразка при обробленні (б): С – батарея конденсаторів, R – баластний опір, P і P1 – розрядники, 1 – джерело високої напруги, 2 – пояс Роговського, 3 – аналого-цифрова плата, 4 – програма опрацювання даних, 5 – кільцевий затискач, 6 – розрізна втулка, 7 – зразок, 8 – трубчатий провідник, 9 – електроізоляційні втулки, 10 – струмопідводи (кільцеві затискачі)

Проводячи дослідження, використовували такий режим заряджання конденсаторів:  $U = 5,3$  кВ,  $C = 100$  мкФ. Такий режим дозволяє отримати при розрядженні максимальну амплітуду на рівні 50 кА. На рис. 3 зображена характеристика сили струму від часу оброблення. Через кожний зразок пропускали по три ідентичні імпульси струму.

Розрахунковий приріст температури зразків (джоулів розігрів) унаслідок оброблення одним імпульсом струму, з використанням співвідношення

$$\delta T = \frac{\rho}{c_v} \int_0^t i(t)^2 dt ,$$

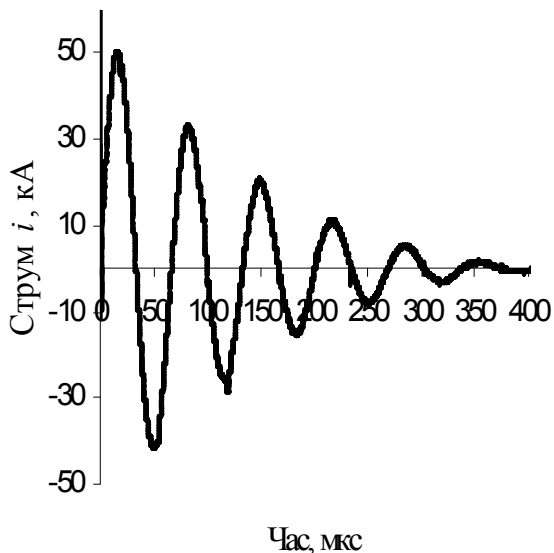


Рисунок 3 – Характеристика ІЕС ( $i(t)$ ) при розрядженні конденсаторів через зразок

де  $\rho$  – питомий опір,  $c_v$  – теплоємність,  $i(t)$  – зареєстрована щільність струму, склав близько п'яти градусів. Зазначимо, що таке інтегральне оцінювання приросту температури є дещо заниженим, бо виконане без урахування нерівномірності розподілу струму по перетину зразка (без урахування утворення скін-шару).

Для кількісного оцінювання впливу ІЕС на структурну неоднорідність матеріалу (його локальну непружність) використано метод, що базується на дослідженні внутрішнього тертя полікристалічного матеріалу [9] реалізований як методика [7].

**Результати досліджень та їхній аналіз.** Результати втомних випробувань зразків до і після пропускання ІЕС зображені на рис. 4. Їхній аналіз дозволяє

встановити, що значення втомної довговічності зразків унаслідок проміжного оброблення ІЕС збільшилося у 2,7 раза порівняно з даними для зразків у початковому стані.

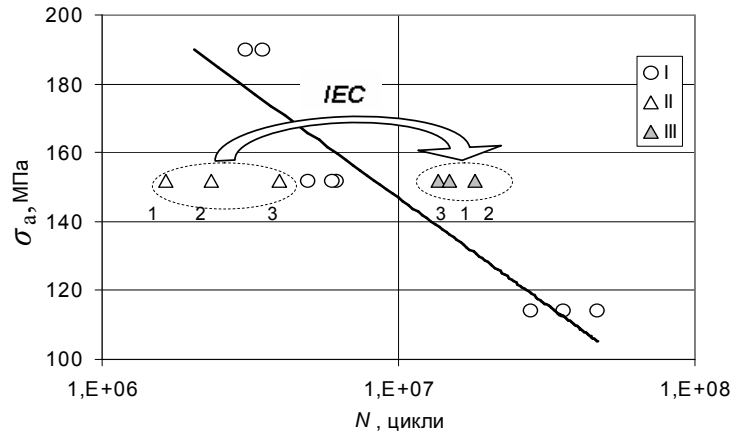


Рисунок 4 – Результати втомних випробувань зразків: I – початковий стан; II – початковий стан, напрацювання  $N = 0,1N_p$ ; III – після оброблення ІЕС (обробляли зразки після напрацювання)

У таблиці наведені результати вимірів зсуву фаз між напруженням і деформацією, з яких можна виділити дві основні тенденції: по-перше, дисперсія зсуву фаз між напруженням і деформацією зростає у процесі напрацювання матеріалу; по-друге, оброблення ІЕС після напрацювання призводить до зниження дисперсії зсуву фаз.

Таблиця – Результати вимірювань дисперсії кута зсуву фаз

| Зразок № | Дисперсія зсуву фаз, $(\varphi^0)^2$ |                       |                                   |
|----------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
|          | Початковий стан                      | Напрацювання $0,1N_p$ | Оброблення ІЕС після напрацювання |
| 1        | 22912                                | 34520                 | 17164                             |
| 2        | 29516                                | 71655                 | 12976                             |
| 3        | 18200                                | 13682                 | 8931                              |

Результати, наведені у таблиці, зображені на рис.5. Розкид дисперсії у початковому стані для даної групи зразків склав 38%; отриманий розкид відповідає мінімальному розкиду для партії зразків, що випробовували. Після напрацювання до  $N = 0,1N_p$  розкид збільшився до 80%. Оброблення зразків ІЕС після напрацювання дозволило зменшити розкид дисперсії до 47%. Отже, зниження дисперсії при обробленні ІЕС після напрацювання зразків свідчить про гомогенізацію структури матеріалу, підтвердженням чого є збільшення довговічності досліджуваних лабораторних зразків майже утричі.

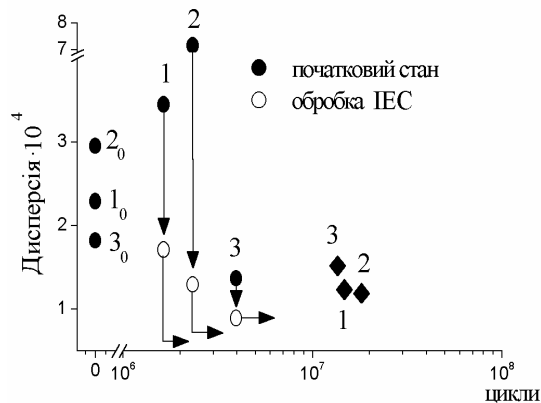


Рисунок 5 – Результати впливу оброблення ІЕС на довговічність сплаву Д16Т:  $1_0, 2_0, 3_0$  – початковий стан; 1, 2, 3 – напрацювання і оброблення ІЕС

Збільшення дисперсії зсуву фаз між напруженням і деформацією при напрацюванні може свідчити про збільшення неоднорідності матеріалу внаслідок накопичення розсіяного пошкодження. Оброблення ІЕС призводить до гомогенізації структури матеріалу, що проявляється у зниженні дисперсії кута зсуву фаз і збільшенні довговічності за умов циклічного деформування. Механізм такого ефекту може полягати у “заліковуванні” дефектів, що зумовлено дією ІЕС на матеріал і пов’язано з впливом електронів провідності на мікрodefekти матеріалу (вакансії, дислокації та їхнє скупчення). Локальне розігрівання металу у місцях концентрації ліній електричного струму на дефектах структури (пори, мікротріщини) також призводить до їхнього «заліковування» [10].

### Висновки

1. Встановлено зворотну залежність дисперсії локальної непружності зі втомною довговічністю сплаву Д16Т за дії імпульсного електричного струму.
2. Виявлені технологічні параметри імпульсного оброблення електричним струмом алюмінієвого сплаву на параметри статистичного розподілу локальної непружності.
3. Встановлено, що режим оброблення імпульсами електричного струму амплітудою 50кА збільшує залишкову довговічність алюмінієвого сплаву Д16Т майже втричі.
4. Встановлено, що зниження на 30% дисперсії локальної непружності під дією імпульсного електричного струму амплітудою 50кА підвищує залишкову довговічність на 270%.

### Література

1. Доронин Ю. Л. Исследование возможностей повышения конструкционных и эксплуатационных характеристик деталей летательных аппаратов импульсным воздействием высокоэнергетического электромагнитного поля: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук. : / Ю. Л. Доронин. – Москва, 1992. – 18 с.
2. Беклемишев Н.Н. Влияние локального неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов / Н. Н. Беклемишев, Н. И. Корягин, Г. С. Шапиро // *Металлы*. – 1984.– № 4. – С. 184–187.
3. Соснин О. В. Электростимулированная малоцикловая усталость / Соснин О. В., Громов В. Е., Козлов Э. В. – М. : Недра Комуникейшенс Лтд, 2000. – 208 с.
4. Гордиенко Л. К. Термомеханическое воздействие как эффективный способ реализации ресурсов жаропрочности / Л. К. Гордиенко // *Металл в современных энергоустановках*. – М. : Энергия, 1969. – С.3–15.
5. Иванова В.С. Природа усталости материалов / В. С. Иванова, В. Ф.Терентьев. – М. : Металлургия, 1975. – 456 с.
6. Трощенко В. Т. Усталость и неупругость металлов / Трощенко В. Т. – Київ : Наук. думка, 1971. – 268 с.
7. Писаренко Г. Г. Розподіл локальної непружності при циклічному навантажуванні металевих матеріалів / Г. Г. Писаренко, О. В. Войналович, П. М. Копчевський, А. М. Майло // *Механічна втома металів : 13-ий міжнародний колоквиум, 25-28 вересня 2006 р., Тернопіль* / відп. ред. П. В. Ясній. – Т.: М-во освіти і науки України, ТДТУ, 2006. – С. 204 – 207.
8. Матохнюк Л. Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением / Матохнюк Л. Е. – К. : Наук. думка, 1988. – 200 с.
9. Мезон У. Измерение низко- и высокоамплитудного внутреннего трения в твердых телах и их связь с движением несовершенств строения / У. Мезон; [пер. с англ. Е. К. Захарова, В. П. Калинина, Ю.А. Рахштадта]. – *Микропластичность*. – М. : «Металлургия», 1972. – С. 236 – 301.
10. Громов В. Е. Электростимулированное восстановление ресурса выносливости сварных соединений / В. Е. Громов, Д. З. Чиркадзе, Е. В. Семакин и др. // *Изв. РАН. Сер. Физическая*. – 1997. – Т. 61, №5. – С. 1019–1023.

Одержано 20.06.2009 р.