

## ВПЛИВ МЕТОДІВ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ОСОБЛИВОСТІ ВТОМНОГО ТА КОРОЗІЙНО-ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ СПЛАВУ Д16Т

В.І. Похмурський, М.С. Хома, В.А. Винар, А. Наконечни\*

## THE INFLUENCE OF THE METHODS OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION ON THE PECULIARITIES OF FATIGUE AND CORROSION: FATIGUE FAILURE OF ALLOY D16T

V. I. Pokhmurskii, M. S. Khoma, V. A. Vynar, A. Nakonechny

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
м. Львів, вул. Наукова, 5*

*\*Інститут прецизійної механіки, Варшава вул. Духніцька 3, Польща*

**Abstract.** The influence of surface plastic deformation obtained by shot-peening and roller burnishing on the fatigue, corrosion fatigue of an aluminum alloy D16T was investigated. The investigations of fatigue and corrosion fatigue were conducted on the specimens with working part: diameter - 10 mm and length - 55 mm in air, 3% NaCl solution and distilled water with complete immersion of specimen. The base of research in air was practically conducted to  $10^7$  cycles and in corrosion environment to  $5 \cdot 10^7$  cycles.

Surface plastic deformation increases fatigue limit ( $\sigma_{-1}$ ) of alloy D16T on 30 %, and corrosion fatigue limit ( $\sigma_{-1c}$ ) on 20 % after shot-peening and 50 % after roller burnishing. Mechanism and character of alloys fracture under conditions of fatigue and corrosion fatigue are analysed.

**Вступ.** Алюміній та його сплави широко застосовуються у різних галузях промисловості, що обумовлено високими експлуатаційними та технологічними властивостями. Надійність і довговічність конструкцій в багатьох випадках визначається опором втомі окремих деталей та вузлів, який суттєво залежить від взаємодії матеріалу з корозійно-активним середовищем [1, 2]. Одним із широко розповсюджених методів підвищення витривалості металів та сплавів є поверхнево-пластичне деформування (ППД) [3], внаслідок якого поверхневий шар матеріалу зазнає значних пластичних деформацій, що супроводжується зміною його механічних властивостей (підвищення міцності, твердості, зменшення пластичності) і виникненням залишкових напружень стиску [4].

У даній роботі досліджували вплив ППД обкочуванням роликками, дробоструминною обробкою (ДСО) на втомні, корозійно-втомні характеристики алюмінієвого сплаву Д16Т та механізм і характер руйнування.

**Методика досліджень.** Дослідження втоми і корозійної втоми проводили на зразках діаметром робочої частини 10мм і довжиною 55мм, які деформували чистим згином з обертанням на машині ИМА-5КЕ [5], при частоті навантаження 50 Гц у повітрі та при повному зануренні у 3%-ний розчин NaCl.

ППД робочої частини однієї партії зразків здійснювалася трьохроликковим пристроєм на токарно-гвинторізному верстаті. Оптимальний режим обробки був підібраний на основі попередніх досліджень і становив: швидкість обертання зразка - 305 об/хв, подача - 0,1мм на 1 оберт, два проходи. Навантаження на ролик, радіусом заокруглення робочої частини 5,5мм, складало 350Н.

Дробоструминну обробку зразків проводили пневматичним методом подачі дробу. Параметри для обробки були попередньо підібрані і становили: 1 - дріб стальна грануляцією 0,43 мм і твердістю 470 HV; 2 - тиск повітря: 0,45 МПа; 3 - інтенсивність

обробки окреслена на плиті Альмена I – 0,35 мм, 4 – дистанція від сопла до оброблюваної поверхні 200 мм; 5 – час обробки 60 с.

Металографічні дослідження проводили на оптичних мікроскопах MBT-71 та Neofot-2, електронно-мікроскопічні дослідження – на електронному мікроскопі-аналізаторі «Zeiss EVO».

**Результати досліджень та їх обговорення.** Показано, що ППД суттєво підвищує опір сплаву Д16Т втомному та корозійно-втомному руйнуванню, границя втоми сплаву Д16Т (рис. 1) зростає у 1,3 рази після обкочування роликми та дробоструминної обробки, криві втоми практично співпадають, що пов'язано з дією однакових за величиною внутрішніх напружень.

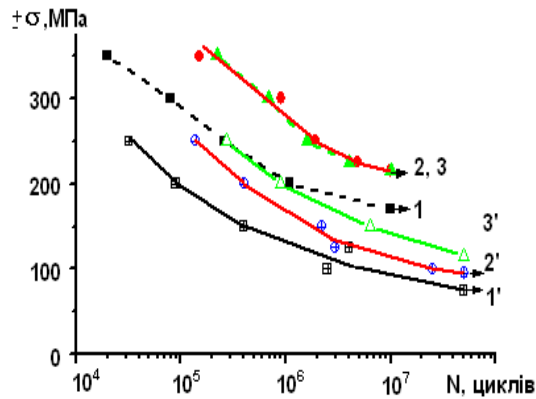


Рис. 1. Криві втоми (1-3) і корозійної втоми при випробуванні в 3%-му розчині NaCl (1'-3') зразків дюралюмінію Д16Т:

1, 1'- шліфування;  
2, 2'- дробоструминна обробка;  
3, 3'- обкочування роликми.

У корозивному середовищі вид обробки проявляється суттєвіше. Умовна границя корозійної втоми при базі досліджень  $5 \cdot 10^7$  циклів збільшилася у 1,2 рази для обробки дробом і для обкочування - в 1,5 рази. Різниця між впливом цих обробок пов'язана із більшою шорсткістю та мікроелектрохімічною гетерогенністю поверхні після дробоструминної обробки та різницею в характері її розчинення [6].

Металографічний аналіз показав, що сплав Д16Т має сильно текстуровану структуру з лінійними скупченнями інтерметалідних фаз вздовж напрямку протягування прутків (рис. 2), а це позначається на зародженні і розповсюдженні тріщин.

Встановлено, що в процесі втомного руйнування цього сплаву в поверхневих шарах утворюється велика кількість мікротріщин (під час втомного руйнування для більшості металів характерне зародження і ріст однієї тріщини [5]), і їх ріст відбувається на ділянках скупчення інтерметалідних включень, що є структурними концентраторами напружень.

Зародження тріщин відбувається, як правило, під кутом близьким  $45^\circ$  до осі зразка. В багатьох випадках вони розгалужені (рис. 2 а, б), оскільки їх рух по поверхні відбувається між включеннями. Такий характер втомного руйнування відрізняє сплав Д16Т від багатьох інших металів і сплавів, для яких ріст втомних тріщин проходить перпендикулярно до дії нормальних напружень.

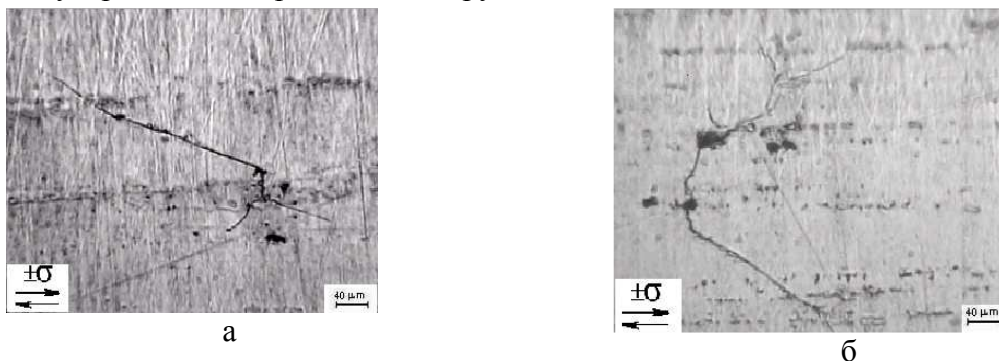


Рис. 2. Характер зародження втомних тріщин (а, б) алюмінієвого сплаву Д16Т з поверхню після шліфування.  $\pm \sigma = 1,1 \sigma_{-1}$ .

При навантаженнях вищих границі втоми на повітрі відбувається руйнування включень в напрямку, перпендикулярному до дії нормальних напружень (рис. 3а). Ці включення в багатьох випадках служать зародками тріщин, при цьому деякі із них об'єднуються між собою, приводячи до розшарування матеріалу вздовж осі зразка (рис. 3 б, в).

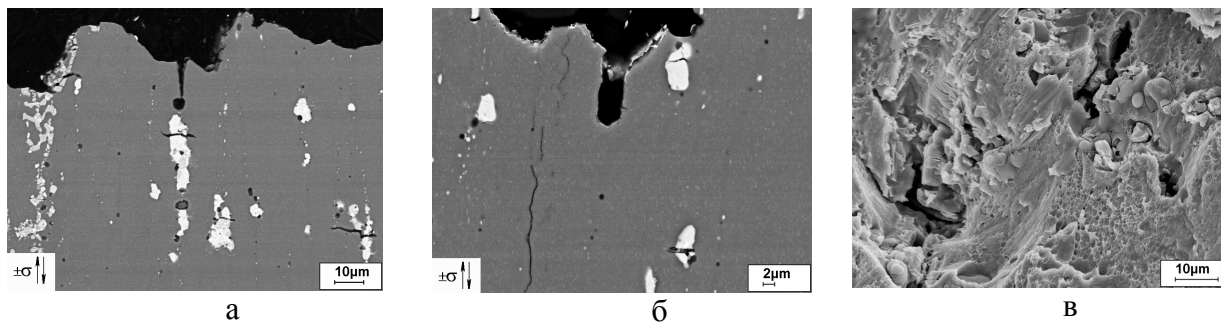


Рис. 3. Руйнування нерозчинних фаз (а) та розшарування матеріалу (б, в) в процесі втомного руйнування зразка сплаву Д16Т,  $\pm \sigma = 250$  МПа.

В подальшому в результаті дії зовнішніх напружень відбувається з'єднання послаблених ділянок і одночасно з розшаруванням проходить ріст тріщини в глибину матеріалу, її переміщення з одного розшарування до іншого по прямих або косих площинах. Така траєкторія руху тріщини приводить до сходинкоподібного характеру зламу (рис. 4). В кінцевому результаті можна спостерігати, що втомна тріщина в макророзмірі формує злам з площиною руйнування орієнтовно  $45^\circ$  до дії нормальних напружень (рис. 5). На зламах спостерігається відкладення чорного порошку (оксидів) [8] в місцях тимчасової затримки в переміщенні тріщини.

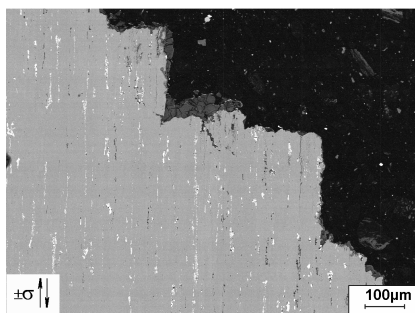


Рис. 4. Характер росту втомних тріщин в матеріалі Д16Т ( $\pm \sigma = 250$  МПа)

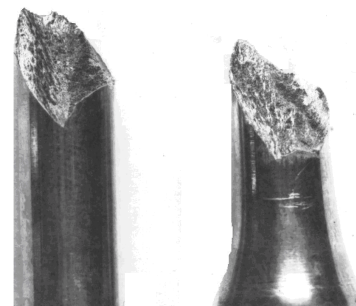


Рис. 5. Вид злама зразка зі сплаву Д16Т ( $\pm \sigma = 200$  МПа)

Під час поверхневого пластичного деформування зразків обкочуванням роликми чи дробоструминною обробкою відбувається руйнування стрічкового розподілення інтерметалідних включень в поверхневих шарах. Це приводить до зміни напрямку зародження поверхневих тріщин, який складає  $\sim 90^\circ$  до дії нормальних напружень (рис. 6), та зменшення їхньої кількості.

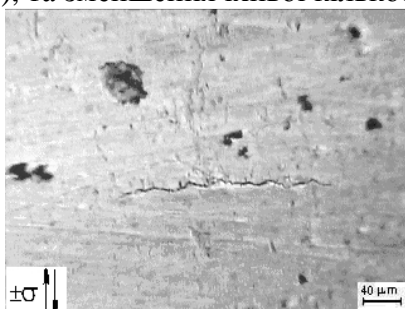


Рис. 6. Характер зародження втомних тріщин у зразках сплаву Д16Т зміцнених обкочуванням роликми ( $\pm \sigma = 1,1 \sigma_{.1}$ ).

Поверхнєве пластичне деформування, змінюючи характер зародження тріщин, не впливає на їх рух в незміщеному матеріалі. Руйнування зразків, обкочених роликками та оброблених дробом, відбувається за такою ж схемою, як і матеріалу після шліфування.

В корозивному середовищі при поєднаній дії цих двох чинників утворюється велика кількість зародків тріщин, особливо на ділянках біля включень, оскільки, в залежності від виду інтерметалідного включення, відбувається його витравлення, або розтравлення приінтерметалідних зон. Показано, що в 3%-му розчині NaCl за навантажень, рівних границі втоми на повітрі (рис. 7), кількість корозійно-втомних пошкоджень на поверхнях інтенсивно зростає, через активування та розчинення локальних ділянок металу. Для сплаву Д16Т кількість корозійно-втомних пошкоджень визначається розподілом інтерметалідних включень. На поверхні зразків, зміцнених обкочуванням роликками, у порівнянні із шліфованим матеріалом, виникає дещо більша кількість корозійно-втомних пошкоджень (рис. 7). Це пов'язано з зростанням кількості інтерметалідів на поверхні зразка, внаслідок їх подрібнення та виходу з підповерхневих шарів.

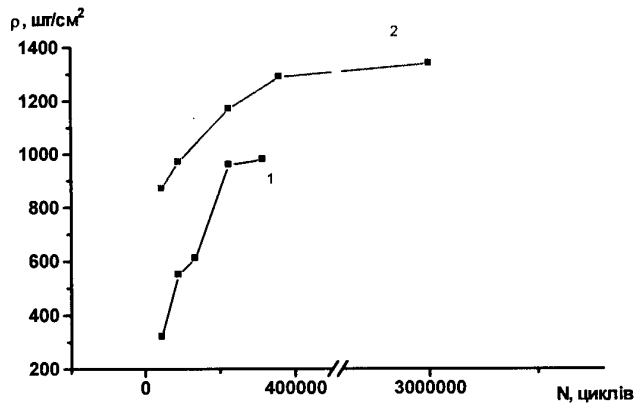


Рис. 7. Залежність густини корозійно-втомних пошкоджень від кількості циклів деформування сплаву Д16Т після:

1 – шліфування;  
2 – обкочування роликками ( $\pm \sigma = \sigma_{-1}$ ).

Практично у всіх випадках при  $\pm \sigma \leq \sigma_{-1}$ , незалежно від стану поверхні, зародками тріщин служать локальні корозійно-втомні пошкодження, які утворюються в інтерметалідній або приінтерметалідній зонах. Зразки з шліфованою поверхнею в середовищі руйнуються під кутом  $\sim 45^\circ$  до дії нормальних напружень (рис. 8а). Для зразків після ППД початкова тріщина розвивається перпендикулярно до дії змінних нормальних напружень (рис. 8 б, в), а після проходження тріщиною зміцненого шару, її подальший ріст відбувається так як і у матеріалі після шліфування, під кутом  $\sim 45^\circ$ .

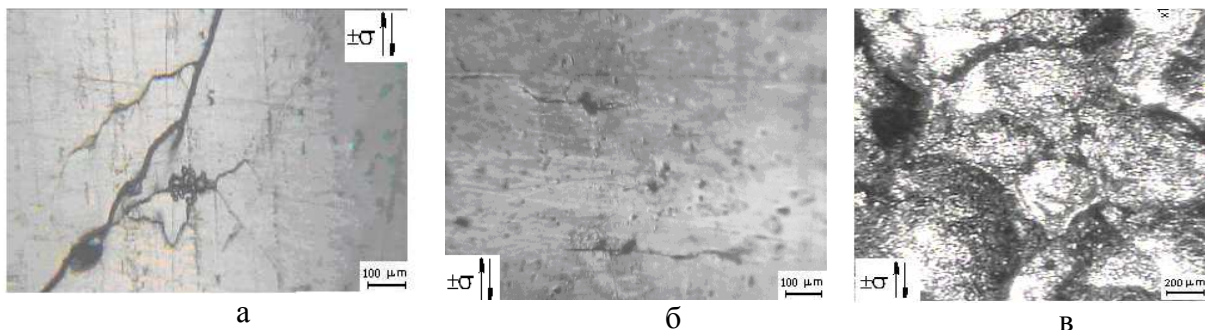


Рис. 8. Характер зародження корозійно-втомних тріщин на поверхні сплаву Д16Т після шліфування (а); обкочування роликками (б); дробоструминної обробки (в) ( $\pm \sigma = 150$  МПа).

Механічні напруження інтенсифікують розвиток міжкристалічної корозії сплаву Д16Т (рис. 9 а,б). Поверхнєва пластична обробка подрібнює зерна поверхневих шарів, а

також руйнує стрічкоподібні колонії фазових включень, що послаблює інтенсивність міжкристалітної корозії (рис. 9 в, г).

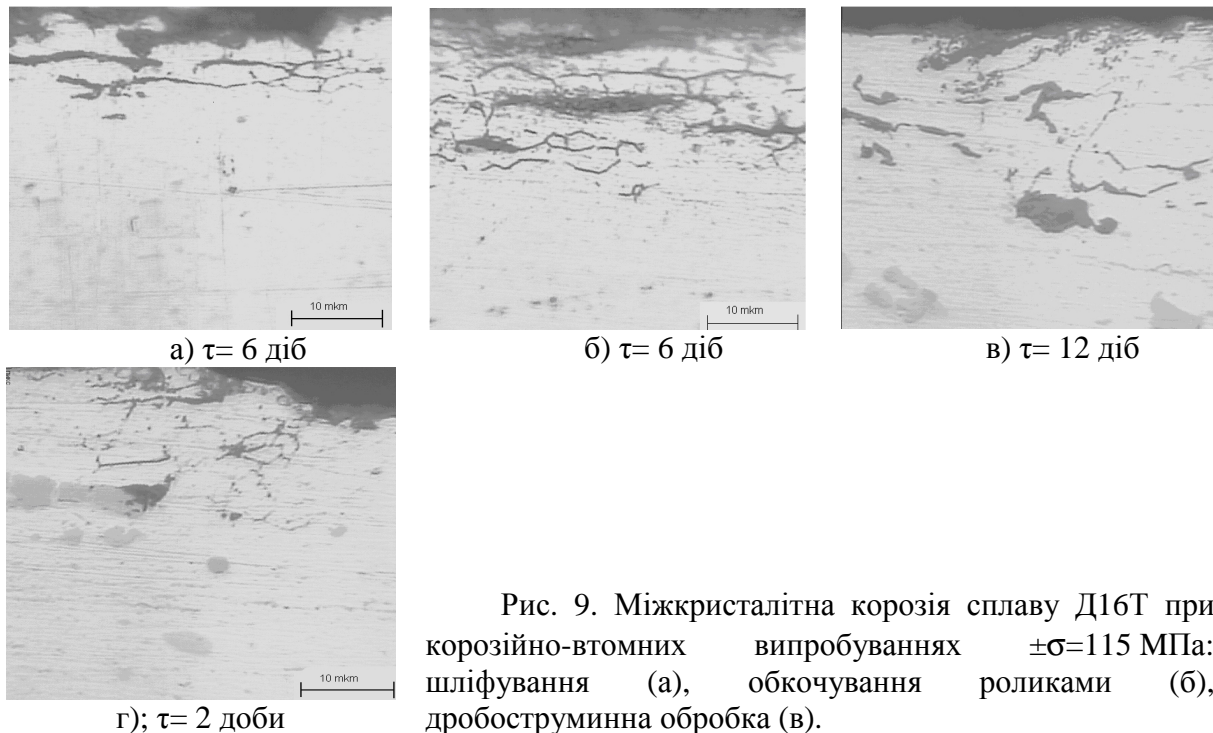


Рис. 9. Міжкристалітна корозія сплаву Д16Т при корозійно-втомних випробуваннях  $\pm\sigma=115$  МПа: шлифування (а), обкочування роликками (б), дробоструминна обробка (в).

Ріст тріщини в сплаві Д16Т в корозивному середовищі відбувається подібно до її руху у повітрі, тобто сходинкоподібно, причому середовище сприяє пришвидшеному руху тріщини, як у поздовжньому, так і в напрямку, перпендикулярному дії напружень. Рух магістральних корозійно-втомних тріщин супроводжується міжкристалічною корозією (рис. 10а), що підтверджено і фрактографічним аналізом (рис. 10 б).

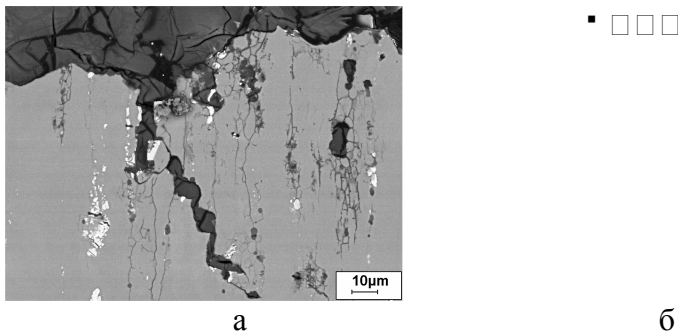


Рис. 10. Розвиток міжкристалітної корозії при рості корозійно-втомної тріщини в сплаві Д16Т ( $\pm\sigma = 250$  МПа).

### Висновки

1. Дробоструминна обробка та обкочування роликками підвищують границю втоми дюралюмінію у повітрі однаково на  $\sim 25\%$ , а в 3%-му розчині NaCl відповідно на  $\sim 20\%$  та  $\sim 50\%$ . Різниця пов'язана із вищою електрохімічною гетерогенністю і шорсткістю поверхні після обдування дробом та різним характером її розчинення.

2. Причиною неklasичного руйнування сплаву Д16Т в умовах втоми та корозійної втоми є його текстурованість, тобто стрічкоподібне розміщення включень, сформованих в процесі протягування.

3. ППД обкочуванням роликками та дробоструминною обробкою дюралюмінію змінює напрямок руху поверхневих тріщин та зменшує їх кількість, проте не впливає на їх ріст в незміцненому матеріалі.

4. Циклічна деформація інтенсифікує розвиток міжкристалітної корозії сплаву Д16Т в поверхневих шарах та в напрямку руху тріщин, однак ППД із-за модифікування поверхневих шарів знижує у них інтенсивність міжкристалітної корозії.

**Література**

1. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов: Справочное руководство. Редакционная коллегия И.В. Горынин и др. – М.: «Металлургия», 1978.-С. 234.
2. Карлашов А. В., Яров А. Н., Гильман К. М. и др. Коррозионно-усталостная прочность бурильных труб из алюминиевых сплавов. М. «Надра», 1977. - 183 с.
3. Похмурский В.И. Коррозионная усталость металлов. - М.: Metallurgia, 1985. - 208 с.
4. Хома М.С. Вплив поверхневого пластичного деформування на електрохімічні характеристики і опір корозійно-втомному руйнуванню нержавіючих сталей // Фіз.-хім. механіка руйнування. — 1994. –№1. – С. 125-127.
5. Похмурський В.І., Хома М.С. Корозійна втома корозійнотривких сталей і сплавів та їх зварних з'єднань / Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя.– Київ: Наук. думка,1998.– С. 604-619.
6. Хома М.А., Винар В.А., Наконечни А. Корозійно-електрохімічні властивості та витривалість поверхнево-змцнених алюмінієвих сплавів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип. – 2006.– Т.1. – С. 48-54.
7. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – с 200.