

СУЧАСНІ АВІАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 620.179.1(045)

М.В. Карускевич, канд.техн.наук, доц.
О.Ю. Корчук, канд.техн.наук, наук. співроб.
Д.О. Кириленко, асп.

ДЕФОРМАЦІЙНИЙ РЕЛЬЄФ У ЗОНІ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ

Подано результати спостереження стану поверхні плакованого алюмінієвого сплаву поблизу втомної тріщини. Показано, що деформаційний рельєф поблизу концентраторів напружень є показником утомного пошкодження матеріалу не лише на інкубаційній стадії втоми, але й на стадії поширення магістральної тріщини. Кількісним показником, який характеризує закономірності розвитку тріщини втоми, є параметр пошкодження D , який визначає насиченість поверхні ознаками мікропластичної деформації.

Results of observation of the clad aluminium alloy surface state near fatigue crack are presented. It is shown, that deformation relief near stress concentrator expresses fatigue damage of the material not only at the initial stage of fatigue, but at the fatigue crack propagation stage as well. The damage parameter D , that determines the intensity of the surface micro plastic deformation features can be considered as quantitative parameter of fatigue crack propagation rate.

Вступ

Напруження, які виникають в елементах авіаційних конструкцій в процесі експлуатації, здебільшого змінюються в часі, причому вони часто є випадковими функціями часу. У разі перевищення змінних у часі напружень деякого ліміту в матеріалі деталі відбувається процес поступового нагромадження руйнування, що призводить до створення тріщини втоми, її розвитку і остаточного руйнування деталі.

Проблема попередження руйнування від втоми є актуальною в усіх галузях машинобудування, особливо в авіації, де аварії від руйнування відповідних деталей спричиняють катастрофічні наслідки.

Механізм процесу руйнування від втоми пов'язаний зі структурною неоднорідністю. В окремих зернах, що несприятливо зорієнтовані, розпочинається циклічна пластична деформація, яка пов'язана з циклічними деформаціями зсуву за визначеними кристалографічними площинами. За допомогою металографічного мікроскопа можна спостерігати за розвитком слідів зсуву на різних стадіях циклічного навантаження матеріалів.

Зі збільшенням кількості циклів кількість ліній зсуву збільшується, вони поширюються і переходять на інші зерна. При цьому циклічна пластична деформація і поява ліній зсуву відбувається майже в усіх зернах металу.

Перші сліди зсуву починають утворюватися зазвичай на поверхні зразків унаслідок полегшених умов деформування зерен у цій зоні і наявності концентрації напружень від мікронерівностей поверхні.

Далі на поверхні зразка зароджується початкова макроскопічна тріщина втоми. Розвиток тріщини після цього залежить від характеру розподілу напружень.

Лабораторні методи дефектоскопії (вимірювання мікротвердості, рівня внутрішнього тертя, електропровідності, електрохімічних параметрів) хоча і дають змогу спостерігати за розвитком втоми в досить широкому діапазоні напружень, але з тих чи інших причин незручні чи незастосовні для використання в умовах експлуатації літальних апаратів.

Період роботи конструкції від моменту виникнення першої макроскопічної тріщини втоми до остаточного руйнування називають живучістю елемента конструкції. Знання живучості елемента має велике практичне значення, тому що термін між детальними профілактичними оглядами конструкції має встановлюватися залежно від живучості, оцінюваної в статистичному аспекті.

Для вивчення розвинення тріщини використовують методи і поняття механіки руйнування, зокрема поняття коефіцієнта інтенсивності напруження. Для пластини обмеженої ширини B з тріщиною довжиною $2l$, що розтягується напруженнями σ у напрямку, перпендикулярному до тріщини, коефіцієнт інтенсивності напруження K_1 виражають наближеною формулою Ірвіна:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi l} \sqrt{\frac{B}{\pi l} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{B}}.$$

Ця робота є продовженням досліджень, метою яких є встановлення закономірностей формування і розвитку структурної пошкодженості поверхні конструктивних алюмінієвих сплавів, що дозволить розробити новий метод діагностування втомного пошкодження і прогнозування залишкового ресурсу конструкції в процесі зростання тріщини втоми.

Постановка завдання – припущення про можливість кількісної оцінки деформаційного пошкодження і вичерпання ресурсу за станом поверхні металевих елементів на початковій стадії втоми металів, і на стадії поширення тріщини втоми.

Під дією циклічних напружень на поверхні деяких металів формується деформаційний рельєф, інтенсивність якого змінюється в процесі навантаження.

До металів, поверхня яких вказує на рівень нагромадженого втомного пошкодження, належить технічно чистий алюміній. Цей матеріал утворює плакувальний шар конструкційних алюмінієвих сплавів, зокрема сплаву Д-16 АТ. Наявність плакувального шару, чутливого до деформаційного пошкодження, визначає можливість діагностики втомного пошкодження за параметрами деформаційного рельєфу поверхні.

Попередніми дослідженнями було визначено кількісні параметри деформаційного рельєфу і показано можливість використання деформаційного пошкодження як показника пошкодження на початковій стадії втоми конструкції алюмінієвих сплавів з плакованим шаром [1; 2; 3].

Під час виконання моніторингу втомного пошкодження параметр пошкодження D контролювали поблизу концентратора напружень – отвору, а критичним станом вважали формування втомної тріщини довжиною 1 мм. Параметр пошкодження D визначали шляхом автоматизованої кількісної оцінки насиченості поверхні слідами мікропластичної деформації.

Методика експерименту

В основу цієї роботи покладено результати спостережень процесу формування і розвитку поверхневих структурних дефектів на стадії зростання тріщини втоми.

Досліджували деформаційний рельєф на поверхні зразків з плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТВ (рис.1).

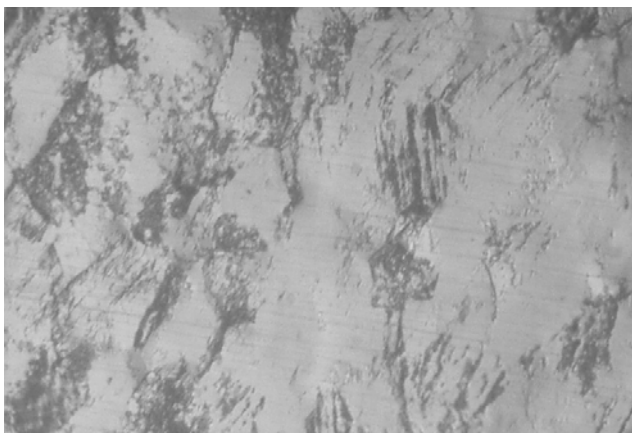


Рис. 1. Деформаційний рельєф поверхні плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТВ після 150 000 циклів навантаження за максимального напруження 100 МПа

Основним параметром деформаційного пошкодження вважався параметр D , який визначали за фотографіями деформаційного рельєфу поверхні. Фотографії поверхні циклічно деформованих зразків обробляли за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми [2], що дозволяє визначити параметр пошкодження як числове значення відносної площі поверхні зі слідами деформації. Програма працює з файлами, які зберігають зображення поверхні у форматі BMP. Використаний формат рисунка належить до растрового типу. При цьому все зображення розбивається на окремі точки (пікселі) і у файлі зберігається інформація про колір кожної точки. Колір кожної точки зображення складається з трьох складових – червоної, зеленої та блакитної. Кожна складова може мати 256 градацій (0–255). Для білого кольору значення всіх складових – 255, для чорного – 0. У випадку, якщо використовується палітра зображення "відтінок сірого", значення складових змінюються однаково від 0 до 255 і не має значення, канал якої складової використовувати. Для кольорового зображення необхідно обрати одну зі складових чи їх середнє значення.

Розрахунок частки поверхні, зайнятої пошкодженнями для чорно-білого зображення (величина складових кольору набуває значення 0 чи 255, полягає в підрахунку точок, для яких обрано складову. Для кольорових рисунків та рисунків у форматі "відтінок сірого" вводиться значення складової, нижче якої колір точки вважається чорним.

Система дозволяє розпізнавати зображення за загальним для всього рисунка чи за локальним значенням градації. Останній режим передбачається для рисунків із зонами нерівномірного освітлення.

Окрім розпізнавання зображення у чорно-білому кольорі, система може для більш глибокого та всебічного аналізу підвищувати контрастність зображення.

Розмір зразків брали $1,5 \times 80 \times 300$ мм, концентратор напружень – у вигляді отвору діаметром 4,0 мм. Зразки навантажували за допомогою гідравлічного пульсатора МУП-20. Частота навантажень становила 11 Гц. Навантаження здійснювалося синусоїдальним циклом за мінімального значення напружень, що дорівнювали нулю, і за максимального значення напружень 100 МПа.

Результати експерименту

До появи мікротріщини у зоні концентратора напружень формується монотонно зростаючий за інтенсивністю мікрорельєф поверхні зразків зі зростанням кількості циклів навантаження. Це повністю відповідає результатам попередніх досліджень. Після появи мікротріщини характер формування мікрорельєфу змінюється і визначається процесами пластичної деформації в зоні кінчика тріщини.

Моніторинг довжини тріщини виконувався безпосереднім оптичним контролем в процесі циклічного навантажування (рис. 2).

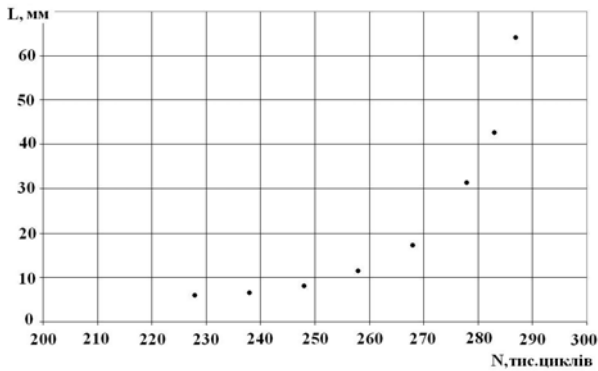


Рис. 2. Залежність довжини тріщини втоми від кількості циклів навантажування

За отриманими даними встановлено значення швидкостей зростання тріщини втоми за різних значень довжини тріщини, а також виконано обчислення значень коефіцієнта інтенсивності напружень у зоні тріщини. Візуальне обстеження полірованої поверхні вказує на монотонне зростання ширини зони пошкодження мікрорельєфу в зоні зростання тріщини втоми. Визначено кількісну залежність параметра пошкодження D від довжини тріщини втоми (рис.3).

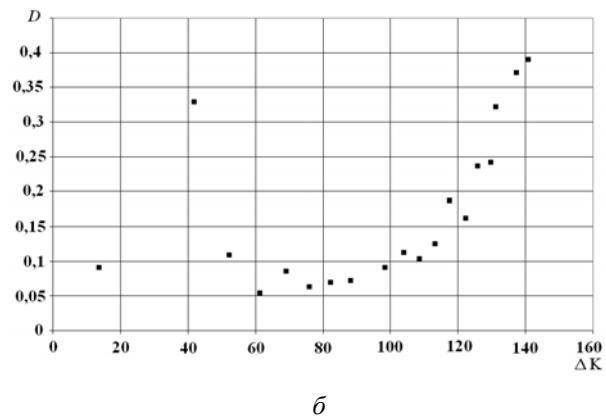
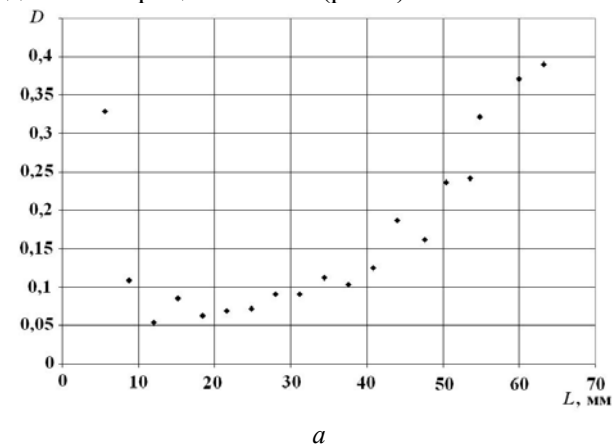


Рис. 3. Залежність параметра пошкодження D від довжини тріщини втоми (a) та інтенсивності напружень (b)

Параметр пошкодження змінюється по довжині тріщини немонотонно. Інтенсивний рельєф поблизу отвору пояснюється тривалим періодом нагромадження пошкодження на стадії формування тріщини. Розподілення пошкодження поблизу отвору відповідає отриманим раніше закономірностям [4]. Подальший розвиток тріщини супроводжується монотонним зростанням інтенсивності деформаційного рельєфу. Саме цей ефект визначає можливість прогнозування тріщини за значенням параметра пошкодження в зоні кінчика тріщини.

Для ефективного прогнозування кінетики втомної тріщини доцільно відокремити стадію монотонного зростання інтенсивності деформаційного рельєфу, що спостерігається з досягненням тріщиною певної довжини. В розглядуваному випадку монотонне зростання параметра D спостерігалось, коли довжина тріщини стала більшою за 18,4 мм.

Залежність значення швидкостей зростання тріщини втоми від параметра пошкодження D та коефіцієнта інтенсивності напружень показано на рис. 4.

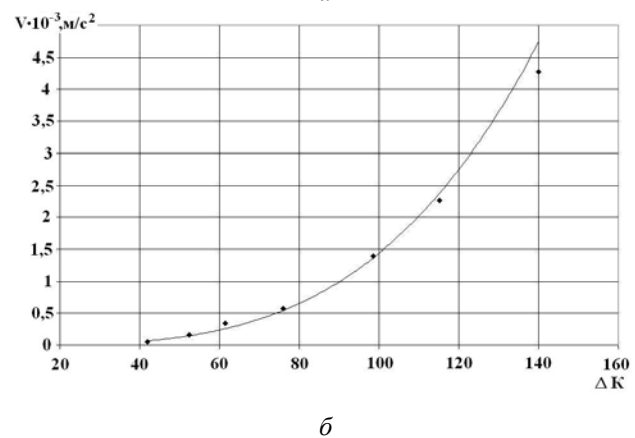
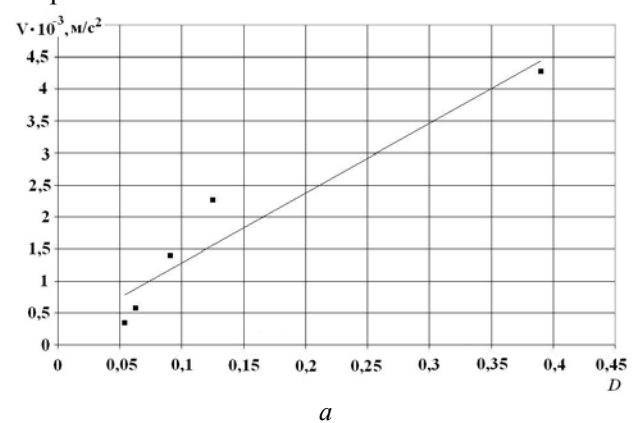


Рис. 4. Залежність швидкості зростання тріщини втоми від параметра пошкодження D (a) та коефіцієнта інтенсивності напружень (b)

Висновки

1. Деформаційний рельєф поблизу концентраторів напружень є показником утомного пошкодження матеріалу не лише на стадії до появи мікротріщини, але й на стадії поширення магістральної тріщини.
2. Кількісним показником, який характеризує закономірності зростання тріщини втоми, є параметр пошкодження D , що добре коригує з параметром коефіцієнта інтенсивності напружень.

Література

1. Карускевич О.М., Игнатович С.Р., Карускевич М.В., Пантелеєв В.М. Диагностика усталости плакирован-

ных алюминиевых сплавов // Вестн. НТТУ "КПИ". Машиностроение. – 2002. – №43. – С. 53–55.

2. Моніторинг втоми конструкційних алюмінієвих сплавів / О.М. Карускевич, С.Р. Ігнатович, М.В. Карускевич та ін. // Вісн. НАУ. – 2004. – № 1(19). – С. 88–91.

3. Karuskevich M.V. Aircraft life prediction by the parameters of foil sensors and skin surface // Вестн. двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 88–92.

4. Карускевич О.М., Игнатович С.Р., Карускевич М.В. Эволюция поврежденности сплава Д-16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины // Науч.-техн. журн. Нац. аэрокосмического ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 4(12). – С. 29–32.

Стаття надійшла до редакції 05.09.07.