

УДК 620.179.1

С.Р. ИГНАТОВИЧ, В.Н. ШМАРОВ, С.С. ЮЦКЕВИЧ

Национальный авиационный университет, Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА Д16АТ ПРИ УСТАЛОСТИ

Обоснован механизм формирования деформационного рельефа (ДР) на поверхности при усталости за счет выхода свободных дислокаций. Разработана оригинальная методика количественной оценки ДР с использованием интерференционного профилометра. Исследовалась поверхность плакирующего слоя в зоне концентрации напряжений на плоских образцах из конструкционного сплава Д16АТ при циклическом нагружении. Экспериментально подтверждено явление изменения с числом циклов нагружения шероховатости поверхности на полированных и неполированных образцах. Показано, что формирование ДР приводит к увеличению площади поверхности при циклической наработке. Интенсивность этого процесса определяется уровнем действующего напряжения в цикле.

Ключевые слова: деформационный рельеф, дислокации, поверхность, циклическое нагружение, площадь поверхности, шероховатость.

Введение

Задачи диагностики и контроля несущей способности конструкций, оценки их остаточного ресурса не могут иметь адекватных решений без учета явлений повреждаемости тонкого поверхностного слоя материалов (необратимого пластического деформирования, растрескивания), проявляющихся при воздействии циклических напряжений на микроструктурном размерном уровне. Особенностью процесса усталости металлов, связанные с формированием и эволюцией дислокационной структуры, разрыхлением и разрушением, интенсифицируются в поверхностном слое [1, 2]. Поэтому поверхность является носителем информации – свидетелем повреждаемости и исчерпания несущей способности конструкции в целом. Оценка состояния поверхностного слоя может рассматриваться как способ диагностирования усталостной поврежденности конструкции. При этом среди известных показателей изменения его физико-механических характеристик, которые регистрируются различными физическими методами [2, 3], особый интерес представляет эволюция деформационного рельефа (ДР).

Процессы локального пластического деформирования поверхности металлических материалов при циклическом нагружении характерны для усталостной повреждаемости на стадии до зарождения трещин [3, 4]. Выход дислокаций на поверхность с образованием ступенек и полос сдвига, экструзии и интрузии являются определяющими факторами формирования ДР. Это явление используется при создании специальных сенсоров усталостной по-

врежденности [5], а также при непосредственном контроле состояния авиационных конструкций, изготовленных из листовых алюминиевых сплавов плакируемых технически чистым алюминием [6].

Работы, которые проводятся в Национальном авиационном университете (НАУ), направлены на исследования количественных показателей ДР конструкционных сплавов на основе алюминия. Получены результаты для критерия поврежденности (отношение площади поверхности, покрытой следами микропластической деформации к величине исследуемой площади) [7 – 9], в том числе и с использованием подходов фрактальной геометрии [10]. Такой подход можно трактовать как двухмерный – 2D ДР.

Развитие данного подхода состоит в исследовании количественных показателей ДР в направлении, нормальном к поверхности. Результаты таких исследований изложены в настоящей работе.

1. Формулирование проблемы

Одним из параметров, часто используемых для количественной характеристики рельефа (шероховатости) поверхности, является величина R_a – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля шероховатостей (по оси y) от средней линии. Если профиль определяется на длине S (вдоль оси x), то

$$R_a = \frac{1}{S} \int_0^S |y(x)| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (1)$$

где y_i – расстояние точки профиля от средней линии, n – число точек профиля, в которых измерено y_i .

Изменение рельефа поверхности за счет пластической деформации (при условии постоянства исходной шероховатости) может быть связано с выходом дислокаций на поверхность. Проиллюстрируем это на примере простой схемы (рис. 1).

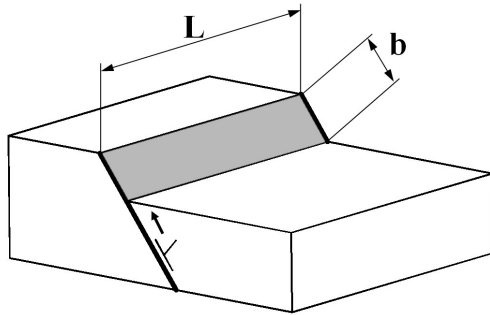


Рис. 1. Схема деформирования поверхности кристалла из-за выхода краевой дислокации

При элементарном акте пластического деформирования из-за выхода дислокации на поверхность образуется ступенька сдвига величиной, равной значению модуля вектора Бюргерса b . Образование ступеньки сдвига приводит к элементарному изменению рельефа поверхности, а также к увеличению ее площади на величину

$$\delta A = bL,$$

где L – длина дислокации (рис. 1). При этом энергия, идущая на образование новой поверхности, должна быть соизмерима с энергией аннигиляции дислокации при ее выходе на поверхность. Покажем это.

Собственная энергия индивидуальной дислокации длиной L определяется как [11]:

$$W_d(L) = \frac{DLb^2}{2} \eta(R/r_0), \quad (2)$$

где D – параметр упругости ($D = G/2\pi k$); G – модуль сдвига; $k = 1$ – для винтовой и $k = 1 - \nu$ – для краевой дислокации; ν – коэффициент Пуассона; $\eta(R/r_0)$ – составляющая собственной энергии дислокации от дальнедействующих напряжений на расстоянии R и от энергии ядра дислокации r_0 (обычно $\eta(R/r_0) \cong 3 \dots 8$ [11]).

Энергетическое условие образования ступеньки при выходе дислокации на поверхность запишется в виде

$$W_d(L) \rightarrow \gamma bL, \quad (3)$$

где γ – удельная поверхностная энергия.

Используя формулу (2), а также оценку $\gamma = Ga/8$ [11], где a – межатомное расстояние ($a \approx b$), получим с точностью до численного множителя выполнение условия (3).

Таким образом, формирование ДР должно сопровождаться увеличением площади поверхности. Энергетическая подпитка этого процесса обеспечивается количеством подвижных дислокаций, которые выходят на поверхность в процессе циклического деформирования материала.

В данной статье на основании специально проведенных экспериментов подтверждается явление увеличения площади поверхности технически чистого алюминия при формировании ДР в процессе циклического нагружения.

2. Решение проблемы

Для изготовления обшивки самолетов широко используются сплавы на основе алюминия. В Украине и России это Д-16 и В-95, в других странах – их аналоги: 2024 Т3, 7075 Т6 и др.

Общим технологическим мероприятием для этих конструкционных листовых материалов является нанесение тонкого (порядка 4 % толщины) плакирующего слоя.

В частности для листового сплава Д-16 это технически чистый алюминий марки АД1 (А5), предел текучести которого (30 МПа) на порядок меньше предела текучести сплава Д-16 (280 МПа). При одинаковом значении модуля упругости этих материалов упругое циклическое деформирование Д-16 будет сопровождаться интенсивным знакопеременным пластическим деформированием плакирующего слоя с формированием ДР.

2.1. Методика испытаний образцов

Объектом исследования являлись плоские образцы, изготовленные из листового сплава Д16АТ. В центральной части образца высверливалось отверстие диаметром 4 мм, моделирующее отверстие под заклепку в конструкции обшивки [9]. Участок поверхности образца, примыкающий к отверстию, полировался алмазной пастой зернистостью 3-4 мкм.

Циклическое нагружение образцов производилось на сервогидравлической установке BiSS Bi00-202V в условиях отнулевого цикла при заданных значениях максимального напряжения в цикле. Частота нагружения составляла 12 Гц.

В архитектуру испытательной машины заложен принцип цифрового управления, который обеспечивает поддержание обратной связи с оператором и адаптивный контроль по нагрузке в каждый момент времени.

2.2. Методика исследования деформационного рельефа

Зона контроля ДР на поверхности образца состояла из прямоугольной площадки с размерами 225×170 мкм, расположенной вдоль центральной оси отверстия.

Для предотвращения влияния навалов, которые образуются при сверлении отверстия, зона контроля располагалась на расстоянии 100 мкм от края отверстия (рис. 2).

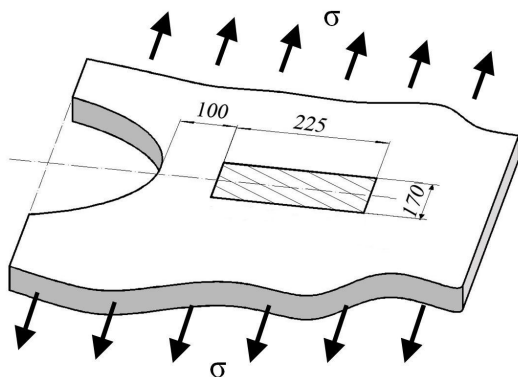


Рис. 2. Схема расположения зоны контроля

Согласно распределению нормальных напряжений у центрального отверстия в пластине, концентрация номинальных напряжений по длине выбранной площадки составляет $2,5 \dots 2,8$.

Исследование рельефа поверхности контролируемой зоны осуществлялось с использованием интерференционного нанопрофилометра, разработанного в НАУ [12,13]. При этом регистрировался начальный рельеф до нагружения образца, а затем производился периодический контроль ДР после наработки определенного числа циклов.

В процессе циклического нагружения определялось изменение площади поверхности контролируемой площадки. Площадь рассчитывалась по массиву данных (320×240 точек), полученных при сканировании поверхности профилометром. В каждой точке определялось значение высоты рельефа поверхности u_j (рис. 3).

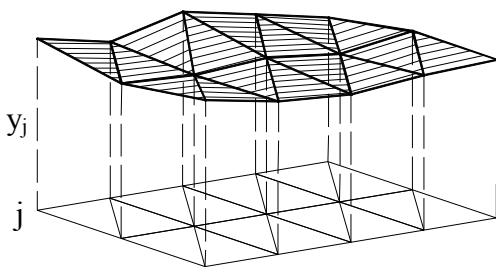


Рис. 3. Схема измерения площади поверхности

По значениям соседних u_j рассчитывались площади элементарных фигур – треугольников, на которые разбивается площадь зоны контроля. Площадь поверхности определяется суммированием площадей треугольников.

2.3. Результаты исследований

По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что в процессе циклического деформирования образцов происходит изменения деформационного рельефа поверхности лакирующего слоя. Независимо от исходной шероховатости поверхности показатель R_a возрастает с наработкой на начальной стадии циклического нагружения.

С числом циклов скорость изменения деформационного рельефа уменьшается с последующей стабилизацией значений вплоть до образования трещины (рис. 4).

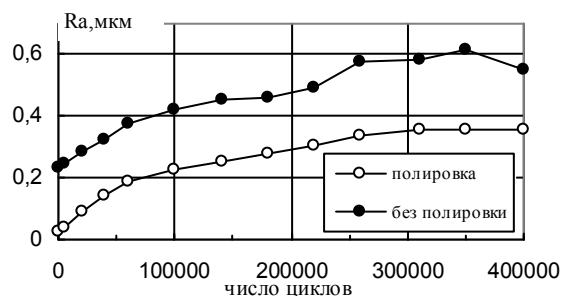


Рис. 4. Изменение рельефа поверхности от числа циклов нагружения при $\sigma_{\max} = 120$ МПа.

Аналогично изменяется и площадь исследуемых участков поверхности (рис. 5).

В качестве критерия изменения площади поверхности в процессе циклического нагружения использовалось отношение площади при текущем значении наработки (A) к величине исходной площади до начала нагружения (A_0).

Результаты испытаний, проведенные на нескольких образцах, показывают, что интенсивность увеличения площади поверхности зависит от значения максимального напряжения в цикле (рис. 5).

Заключение

При циклическом нагружении конструкционного алюминиевого сплава Д16АТ лакирующий слой подвергается интенсивному знакопеременному упругопластическому деформированию. Массовый выход дислокаций на поверхность приводит к формированию деформационного рельефа и, как следствие, к увеличению площади поверхности.

Это обстоятельство, принимая во внимание неизменность объема лакирующего слоя, должно приводить к деструкции поверхности и к инициированию процессов разрушения основного материала.

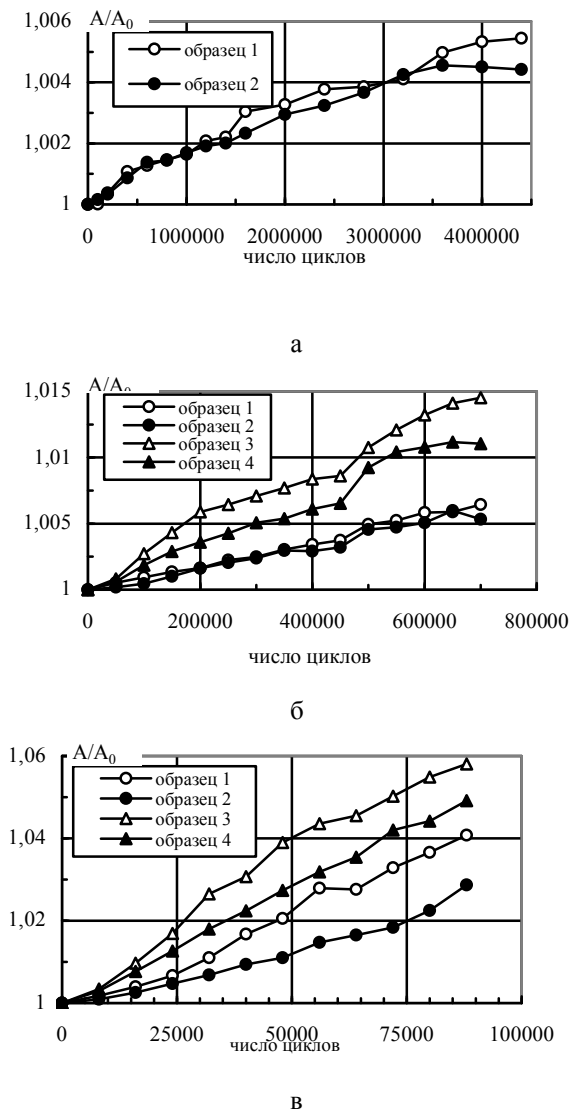


Рис. 5. Изменение площади поверхности от числа циклов нагружения при различных σ_{\max} : 60 МПа (а); 80 МПа (б); 130 МПа (в).

Литература

1. Горлицкий В.М. Структура и усталостное разрушение металлов: монография / В.М. Горлицкий, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
2. Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов: монография / Т.Ю. Яковлева. – К: Наукова думка, 2003. – 238 с.
3. Головин С.А. Микропластичность и усталость металлов: монография / С.А. Головин, А. Пушкар. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.

4. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформаций: монография / В.А.Лихачев [и др.]. – К.: Наук. думка, 1989 – 320 с.

5. Карускевич М.В. Метод и датчик автономного неразрушающего контроля поврежденности и исчерпания несущей способности деталей и конструкций / М.В. Карускевич, Е.Э. Засимчук, А.И. Радченко // Проблемы прочности. – 1990. – № 12. – С. 110-114.

6. Пат. № 29683 Україна, МПК G01N 3/32. Спосіб визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за станом деформаційного рельєфу поверхні плакуючого шару / Ігнатівич С.Р., Карускевич М.В., Карускевич О.М.; Власник НАУ. – № 200709909; заявл. 04.09.2007; опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2. – 3 с.

7. Ігнатівич С.Р. Діагностика усталості плакованих алюмінієвих сплавів / С.Р. Ігнатівич, М.В. Карускевич, О.М. Карускевич, В.М. Пантелеє, // Вестник НТТУ «КПІ»: Машиностроєння, 2002. – 43. – С. 53-55.

8. Ігнатівич С.Р. Моніторинг утоми конструкційних алюмінієвих сплавів / С.Р. Ігнатівич, М.В. Карускевич, О.М. Карускевич, С.В. Хижняк, О.С. Якушенко // Вісник НАУ. – 2004. – № 1(19). – С. 88 - 91.

9. Ігнатівич С.Р. Еволюція поврежденности сплава Д-16АТ у концентратора на стадії до зародження усталостної тріщини / С.Р. Ігнатівич, О.М. Карускевич, М.В. Карускевич // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2004 – Вип. 4 (12). – С. 29-32.

10. Карускевич М.В. Оцінка накопленого усталостного повреждення по насиченности і фрактальної розмірности деформаційного рельєфа / М.В. Карускевич, Е.Ю. Корчук, А.С. Якушенко, Т.П. Маслак // Проблемы прочности. – 2008. – № 6. – С.128-135.

11. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.

12. Ігнатівич С.Р. Методика бесконтактної реєстрації поверхнєвого рельєфа об'єктів в трьохмерном нанометричєском діапазонє / С.Р. Ігнатівич, І.М. Закиєв, В.І. Закиєв // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2005. – Вип. 4 (20). – С. 46-49.

13. Ігнатівич С.Р. Контроль якості поверхнєности деталєй с использованием бесконтактного профілометра / С.Р. Ігнатівич, І.М. Закиєв, В.І. Закиєв // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2006. – Вип. 8 (34). – С. 20-22.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой С.О. Дмитриев, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ НА ПОВЕРХНІ СПЛАВУ Д16АТ ПРИ УТОМІ

С.Р. Ігнатович, В.М. Шмаров, С.С. Юцкевич

Обґрунтований механізм формування деформаційного рельєфу (ДР) на поверхні при утомі за рахунок виходу вільних дислокацій. Розроблена оригінальна методика кількісної оцінки ДР з використанням інтерференційного профілометра. Досліджувалася поверхня плануючого шару у зоні концентрації напруження на плоских зразках з конструкційного сплаву Д16АТ при циклічному навантажуванні. Експериментально підтверджено явище зміни с числом циклів навантажування шорсткості поверхні на полірованих та неполірованих зразках. Показано, що формування ДР призводить до збільшення площі поверхні при циклічному напруженні. Інтенсивність цього процесу визначається рівнем діючого напруження в циклі.

Ключові слова: деформаційний рельєф, дислокації, поверхня, циклічне навантажування, площа поверхні, шорсткість.

PECULIARITIES OF DEFORMATION RELIEF GENERATION ON SURFACE OF ALLOY D16AT UNDER FATIGUE

S.R. Ignatovich, V.N. Shmarov, S.S. Yutskevich

The mechanism of deformation relief (DR) generation on a surface under fatigue is proved due to of free dislocations outlet. The original technique of DR quantitative estimation which based on interferential profilometer is developed. The surface of Al-plating layer in a zone of stress concentration on flat samples from constructional alloy D16AT was investigated under cyclic loading. The phenomenon of surface roughness change from number of cycles loading on the polished and not polished samples is experimentally confirmed. It is shown, that formation DR leads to increase in the surface area with number of cycles. Intensity of this process is defined by a level of maximal stress in cycle.

Key words: deformation relief, dislocations, surface, cyclic loading, surface area, roughness.

Ігнатович Сергей Ромуальдович – д-р техн. наук, проф., декан факультета летательных аппаратов, зав. кафедрой конструкции летательных аппаратов Национального авиационного университета, Киев, Украина; e-mail: ignatovich@nau.edu.ua.

Шмаров Валерий Николаевич – д-р техн. наук, проф., директор аэрокосмического института Национального авиационного университета, Киев.

Юцкевич Святослав Сергеевич – ассистент кафедры конструкции летательных аппаратов Национального авиационного университета, Киев, Украина, e-mail: S.Yutskevych@bigmir.net.