УДК 620.179.1

С.Р. ИГНАТОВИЧ, М.В. КАРУСКЕВИЧ, О.М. КАРУСКЕВИЧ

Национальный авиационный университет, Украина

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СПЛАВА Д-16АТ У КОНЦЕНТРАТОРА НА СТАДИИ ДО ЗАРОЖДЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Показано, что по состоянию деформационного рельефа, формирующегося на поверхности плакированных листов авиационных сплавов Д-16АТ, 2024 Т3, 7075 Т6 можно выполнять количественную оценку накопленного усталостного повреждения. Выполнено сравнение распределения значений предложенного параметра повреждения вблизи отверстия с теоретическим распределением напряжений. Проведен мониторинг деформационного рельефа при напряжениях, близких к эксплуатационным в обшивке фюзеляжа самолета. Установлена связь между уровнем циклических напряжений и предельным значением предложенного параметра повреждения.

обшивка самолета, усталость, деформационный рельеф, полосы скольжения, диагностика

Введение

Анализ усталостной повреждаемости, в соответствии с требованиями международных и национальных организаций гражданской авиации, является обязательной составляющей оценки прочности авиационных конструкций. Тем не менее, статистика разрушений многих конструкций, в том числе авиационных, показывает, что до сегодняшнего времени отсутствуют достаточно надежные расчетные методы оценки усталостного повреждения и определения остаточного ресурса.

Известно, что на поверхности некоторых металлов можно наблюдать формирующиеся и развивающиеся в результате действия циклически повторяющихся нагрузок полосы скольжения, образующие деформационный рельеф поверхности. К таким материалам относится алюминий, применяемый для плакирования листовых конструкционных сплавов.

Таким образом, чувствительный к механическому нагружению, плакирующий слой может являться индикатором накопленного деформационного повреждения конструкций.

1. Методика эксперимента

Для изготовления обшивки самолетов гражданской авиации в Украине и России широко используются алюминиевые сплавы Д-16 и В-95, за границей используются их аналоги – сплавы 2024 Т3 и 7075 Т6. Основные компоненты сплавов Д-16 и 2024 Т3 – алюминий, медь, магний, а сплавов В-95 и 7075 Т6 – алюминий и цинк. Для плакирования листов большинства сплавов, в том числе сплава Д-16, используют алюминий марки АД1 (А5), для плакирования листов из сплава В-95 используют алюминиевый сплав АЦ, который содержит 0,9 – 1,3% Zn. Плакирование сплавов 2024 Т3 и 7075 Т6 проводится подобно процедурам плакирования их аналогов. Толщина плакирующего слоя на каждой стороне листа зависит от его толщины и назначения. Для листов толщиной до 1,9 мм толщина плакирующего слоя составляет 4%.

Информацию про накопленное усталостное повреждение и оценку остаточного ресурса можно получить, анализируя состояние поверхности в критических точках конструкции.

Представленное исследование выполнялось на стандартных образцах для испытаний на усталость с отверстием в центральной части для локализации разрушения и моделирования особенностей роботы реальных конструкций. Наличие концентратора определяло также и зону контроля.

Толщина образцов 1,5 мм, диаметр отверстия 4 мм. Выбор геометрии образцов обусловлен широ-

© С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, О.М. Карускевич

ким применением листов толщиной 1,5 мм при изготовлении обшивки фюзеляжа многих самолетов. Отверстие диаметром 4 мм моделирует отверстие под заклепку. В самолетной конструкции заклепками выполняется соединение листов обшивки между собой, а также с элементами каркаса: стрингерами и шпангоутами. Такой концентратор напряжений является массовым – количество заклепок в конструкции современного пассажирского самолета, рассчитанного на перевозку 200 пассажиров, превышает 1,5 млн. штук.

Для выполнения испытаний использовалась стандартная гидропульсационная машина МУП-20. Нагружение производилось отнулевым синусоидальным циклом.

Для мониторинга деформационного рельефа было разработано и изготовлено специальное оборудование. При этом ставилась задача использовать унифицированные элементы, изготавливаемые серийно, имеющие стабильные характеристики и относительно невысокую цену.

Применяемая система оптического контроля состояла из металлографического микроскопа ММР-4, цифровой фотокамеры и персонального компьютера.

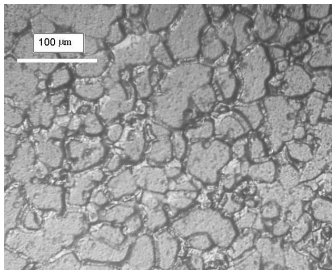
В основе предлагаемого метода количественной оценки накопленного усталостного повреждения экспериментальные данные, указывающие на тесную связь повреждения с интенсивностью деформационного рельефа, полученные авторами при исследованиях моно и поликристаллов [1 – 3], работы других исследователей [4, 5].

Фотографии поверхности циклически деформированных образцов обрабатывались с помощью вычислительной программы, позволяющей определять параметр повреждения “Д”, который представляет собой численное значение относительной площади со следами деформации.

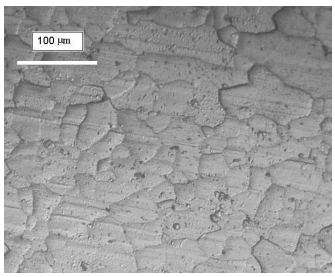
2. Результаты эксперимента

Металлографическое исследование структуры поверхности плакирующего слоя позволило определить некоторые особенности исследуемых материалов. Поверхности образцов сплавов Д-16АТ, 2024 Т3, 7075 Т6 были подготовлены механическим полированием для химического травления и выявления микроструктуры. В качестве травителя использовался водный раствор азотной, соляной и плавиковой кислот [6].

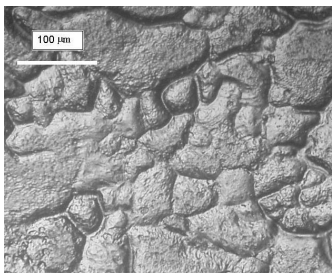
Выявленные микроструктуры показаны на рис. 1.



1



2



3

Рис. 1. Микроструктура поверхности исследованных материалов:
1 – Д-16; 2 – 7075 Т6; 3 – 2024 Т3

Размер зерна, т.е. среднее значение диаметра и среднее значение площади, определяли в соответствии с [7]. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Размер зерен на поверхности плакирующего слоя алюминиевых конструкционных сплавов Д-16АТ, 2024 Т3, 7075 Т6

Марка сплава	Д-16АТ	2024 Т3	7075 Т6
Средний диаметр зерна вдоль направления проката, мм	0,0418	0,0833	0,0427
Средний диаметр зерна поперек направления проката, мм	0,0390	0, 0667	0,0418
Средняя площадь зерна, мм ^{2}	0,00164	0,00556	0,00179

Формирование деформационного рельефа наблюдалось на поверхности плакирующего слоя всех указанных материалов.

Детально исследовалось развитие деформационного рельефа на поверхности плакированного сплава Д-16. При максимальном напряжении цикла 70 МПа первые следы деформационного рельефа наблюдались после 5000 циклов нагружения. С увеличением напряжений наработка до появления следов скольжения уменьшалась и при максимальном напряжении 125 МПа деформационный рельеф можно было наблюдать при циклической наработке 1000 циклов.

Интенсивность деформационного рельефа была максимальной в непосредственной близости к концентратору напряжений. Представляло интерес сравнение распределения повреждений с теоретическим распределением напряжений. Адекватность указанных характеристик указывала бы на обусловленность регистрируемого параметра повреждения уровнем действующих напряжений. Оценка накопленного повреждения выполнялась для образца сплава Д-16, испытанного при максимальном циклическом напряжении 150 МПа после 50000 циклов нагружения.

Оценка распределения напряжений выполнялась с учетом работы материала в упруго-пластической зоне. На участке, где напряжения не превышали $\sigma_{0,2}$ (для алюминиевого сплава Д-16 $\sigma_{0,2}$ составляет 290 МПа), распределение напряжений определялось в соответствии с формулой, предложенной в работе [8].

На участке вблизи отверстия, где напряжения превышали 290 МПа, использовались рекомендации работы [9] для учета упруго-пластического характера деформирования.

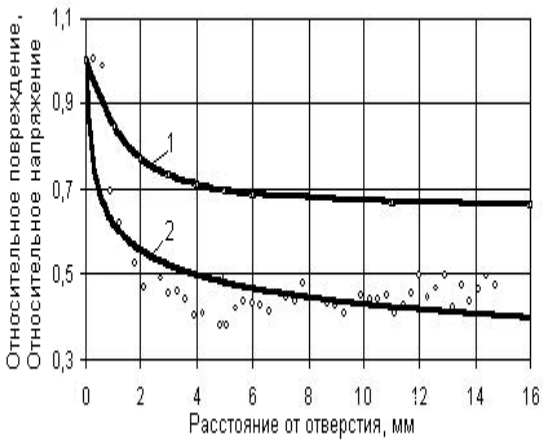


Рис. 2. Распределение повреждений и напряжений вблизи отверстия

Для установления зависимости параметра повреждения «Д», соответствующего предельному состоянию (появлению трещины) от уровня напряжений проведена серия испытаний образцов сплава Д-16, при которых нагружение прекращалось при достижении трещиной длины 0,1 мм. По результатам испытаний построен график, представленный на рис. 3. Аппроксимация экспериментальных точек полиномиальной зависимостью

$$Д = -0{,}0001\sigma^6 + 0{,}0092\sigma^5 - 0{,}2597\sigma^4 + 3{,}8457\sigma^3 - 31{,}42\sigma^2 + 134{,}34\sigma - 234{,}59$$

позволяет сделать вывод о наличии двух участков, в пределах которых уровень напряжений не оказывает существенного влияния на величину параметра повреждения. Учитывая полученные значения чисел циклов до разрушения и соответствующие уровни напряжений, можно предположить, что наличие указанных участков обусловлено

сменой механизма накопления повреждения при увеличении уровня напряжений, т.е. переходом от многоцикловой к малоцикловой усталости. При этом, в определенном диапазоне условий нагружения открывается возможность прогнозирования критического состояния.

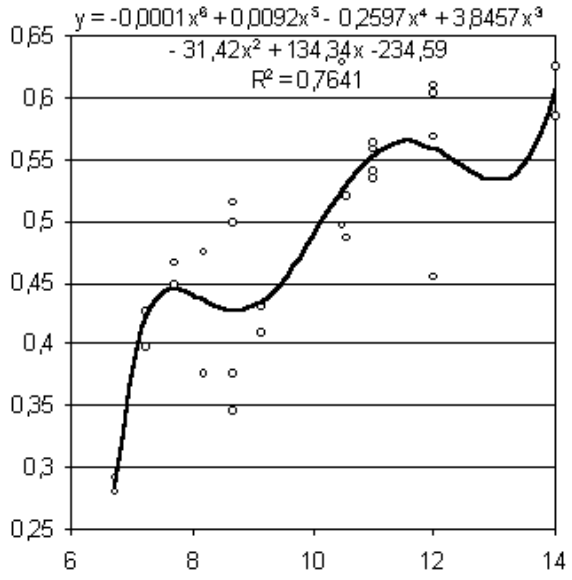


Рис. 3. Зависимость максимального значения параметра повреждения «Д» от уровня напряжений

Заключение

Проведенные эксперименты указывают на возможность диагностики усталости элементов авиационных конструкций, изготовленных из плакированных алюминием конструкционных сплавов Д-16, 7075 Т6, 2024 Т3.

Литература

1. Karuskevich M.V., Gordienko Yu., Zasimcuk E.E. Forecasting the critical state of deformed crystal by analysis of smart defect structure // Fractal characteristics and percolation critical indexes // Proceedings of the seventh conference on sensors and their applications, held in Dublin, Ireland. (10 – 13 September). – 1995 – P. 112 – 117.

2. Засимчук Е.Э., Радченко А.И., Карускевич М.В. Single-crystals as an Fatigue indicator of fatigue damage // Fract. Engng. Mater. Struct. – 1992. – Vol. 15, № 12. – P. 1281 – 1283.

3. Карускевич М.В., Радченко А.И., Засимчук Е.Э. Метод и датчик автономного неразрушающего контроля нагруженности и исчерпания несущей способности деталей и конструкций // Проблемы прочности. – 1990. – № 4. – С. 110 – 114.

4. Гурьев А.В., Савин А.Н. Роль микропластических деформаций в развитии усталостных повреждений в металлах // Механическая усталость металлов: Сб. науч. тр. – К.: Наук. думка. – 1983. – С. 122 – 129.

5. Cordero L., Ahmadieh A., Mazumdar P.K. A comulative fatigue damage formulation for persistent slip band type materials // Scripta Metallurgica. – 1988. – Vol. 22. – P. 1761 – 1764.

6. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.

7. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения велечины зерна.

8. Терегулов И.Г. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. – М.: Высш. шк., 1984. – 472 с.

9. Серенсен С.В., Шнейдерович Р.М. Прочность при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1975. – 378 с.

Поступила в редакцию 12.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Дмитриев, Национальный авиационный университет, Киев.