

УДК 620.169.1: 620.179.118.4

doi: 10.32620/aktt.2019.8.15

С. Р. ИГНАТОВИЧ, М. В. КАРУСКЕВИЧ, С. С. ЮЦКЕВИЧ, С. В. ХИЖНЯК

Национальный авиационный университет, Киев

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ РЕЛЬЕФ И ДЕСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАК ПОКАЗАТЕЛИ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПЛАКИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

В статье приведены результаты исследования изменения состояния поверхности конструкционного сплава Д16АТ с наработкой при различных значениях напряжений. Контроль состояния поверхности материала осуществлялся интерференционным нанопрофилометром. Основной особенностью сплава Д16АТ является то, что для защиты от коррозии материал покрыт с обеих сторон тонким слоем лакировки, толщина которой составляет около 5% от общей толщины листа. При нагружении деформирование лакирующего слоя и основного материала из-за существующего различия значений предела текучести существенно отличается. Такая композиция неразрывно связанных материалов будет способствовать интенсификации пластического деформирования поверхности слоя. В ходе циклического нагружения на поверхности лакирующего слоя образуются и развиваются участки пластически деформированного материала с особым проявлением рельефа поверхности, обусловленным дислокационными механизмами (ступеньки и полосы сдвига, экструзии, интрузии и т.п.). Количественными показателями деформационного рельефа (ДР) являются площадь и периметр пластически деформированных участков, их фрактальные характеристики и пластическая деформация поверхности. Эти показатели могут выступать в качестве индикаторов усталостной поврежденности сплава, однако по ним затруднена идентификация предельного состояния – образование начальной усталостной трещины. Таким диагностическим параметром является деструкция лакирующего слоя, для определения которой используются основные показатели ДР. Деструкция (увеличение объема лакирующего слоя) физически объективна – она связана с увеличением площади поверхности при формировании и развитии ДР. Деструкцию можно считать основным фактором усталостного разрушения лакируемых алюминиевых сплавов. Показано, что при насыщенности деформационным рельефом, приблизительно, 25...30 % от общей площади нагружаемой поверхности деструкция лакирующего слоя скачкообразно возрастает, что обусловлено изменением характера пластического деформирования поверхности. Данное значение насыщенности может использоваться как диагностический показатель образования начальных усталостных трещин.

Ключевые слова: деструкция; лакирующий слой; деформационный рельеф; фрактальная размерность

Введение

Предотвращение разрушения конструкций воздушных судов (ВС) вследствие усталости обеспечивается комплексом мероприятий, предусматривающих расчетное оценивание и экспериментальное подтверждение ресурсных характеристик конструктивных элементов (КЭ), инструментальное выявление возникающих с наработкой усталостных повреждений, мониторинг их развития до предельного состояния, прогнозирование остаточного ресурса. Эти мероприятия реализуются как на этапе создания нового образца самолета, в частности при проведении натурных испытаний, так и на стадии эксплуатации.

Проведение периодического и непрерывного контроля технического состояния (ТС) ВС в эксплуатации является необходимым условием обеспече-

ния безопасности конструкции по условиям прочности. Таким образом, разработка эффективных и адекватных методов контроля ТС авиационных конструкций (АК), которые могут быть использованы при стендовых испытаниях и в эксплуатации является актуальной и приоритетной проблемой [1].

Работы, которые проводятся в Национальном авиационном университете, направлены на разработку методологии оценки накопленного усталостного повреждения по параметрам пластического деформирования поверхности. Такой подход может быть реализован путем анализа состояния образцов-свидетелей (сенсоров усталости), которые закрепляются на критических элементах конструкции и воспринимают эксплуатационный спектр нагрузок. В соответствии с историей нагружения КЭ изменяется состояние поверхности сенсоров и формируется информация о накопленном элементом кон-

струкции усталостном повреждении [1-3].

Изменение состояния поверхности сенсоров проявляется в формировании и эволюции деформационного рельефа (ДР). Определяющими факторами ДР при циклическом нагружении металлических материалов является локальное пластическое деформирование поверхности, обусловленное дислокационными механизмами (ступеньки и полосы сдвига, экструзии, интрузии и т.п.). Исследования показали, что количественные показатели ДР могут являться эффективными диагностическими параметрами при мониторинге выработки усталостного ресурса [4, 5].

В то же время остается открытым вопрос об идентификации предельного состояния материала по количественным показателям ДР. Данные показатели изменяются в процессе циклической нагрузки, как правило, монотонно, что усложняет прогнозирование предельной поврежденности, соответствующей образованию усталостной трещины. Перспективное решение этой проблемы следует из анализа деструкции плакирующего слоя при циклическом нагружении [6].

Целью данной работы является обоснование предельного состояния плакированных конструкционных алюминиевых сплавов с использованием фрактальных показателей ДР.

1. Постановка задачи

Листовые алюминиевые сплавы, которые применяются в авиационных конструкциях, для защиты от коррозии обычно покрываются с обеих сторон тонким слоем плакировки (толщина слоя составляет, приблизительно, 5 % от толщины листа).

В процессе циклического нагружения деформирование плакирующего слоя и основного материала существенно отличается из-за отличия механических свойств. Например, предел текучести покрытия из алюминия ($\sigma_Y^c = 30$ МПа) на порядок меньше предела текучести алюминиевого сплава Д16 ($\sigma_Y^a = 290$ МПа). Такая композиция неразрывно связанных материалов будет способствовать интенсификации пластического деформирования поверхностного слоя. Например, упругое деформирование образца с плакирующим слоем по отнулевому циклу с максимальным напряжением σ_{max} ($\sigma_Y^c < \sigma_{max} < \sigma_Y^a$) при равенстве модулей упругости сплава и покрытия будет сопровождаться знакопеременным упругопластическим деформированием плакирующего слоя. На его поверхности образуются локальные участки пластической деформации с характерным изменением рельефа. Если суммарная

площадь таких участков равна A , и они располагаются на поверхности площадью S , то насыщенность ДР количественно характеризуется безразмерным параметром [1]

$$D = \frac{A}{S}. \quad (1)$$

Изменение рельефа неизбежно приведет к увеличению площади поверхности S на некоторую величину ΔS . Количественно увеличение площади поверхности описывается величиной пластической деформации [4]

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta S}{S}. \quad (2)$$

Приращение площади поверхности плакирующего слоя при сохранении его массы должно сопровождаться уменьшением объема за счет насыщения материала покрытия дефектами сплошности – вакансиями, порами, микротрещинами и т.п. Такое пластическое разрыхление или деструкция материала покрытия является основным фактором усталостной поврежденности так как может инициировать образование трещин в основном сплаве. Показателем деструкции является относительный параметр $\omega = \Delta V / V_0$, где ΔV – изменение объема плакирующего слоя из-за деструкции; V_0 – объем плакирующего слоя до деформирования. В работе [6] предложена модель деструкции, согласно которой

$$\omega = \frac{\delta \varepsilon_a D}{t}, \quad (3)$$

где t – толщина плакирующего слоя;

δ – отношение площади кластеров ДР к их периметру.

Проведем анализ зависимости (3) с использованием экспериментальных данных о формировании и эволюции ДР на поверхности плакируемого алюминиевого сплава.

1.1. Методика проведения экспериментальных исследований

Плоские образцы из конструкционного алюминиевого сплава Д16АТ подвергались циклическому нагружению на сервогидравлической установке BiSS Bi00-202V. Нагружение осуществлялось при отнулевом цикле ($0 \leftrightarrow \sigma_{max}$) с заданным значением максимального напряжения σ_{max} . Поверхность образцов в состоянии поставки покрыта плакирующим

слоем из технически чистого алюминия толщиной 30 мкм. В центральной части образца высверливалось отверстие диаметром 4 мм. Участок поверхности образца, примыкающий к отверстию, полировался алмазной пастой.

Периодически в процессе циклического нагружения контролировалось состояние выбранных площадок на образцах. Контроль ДР осуществлялся на площадке поверхности с размером 225×170 мкм, примыкающей к отверстию в зоне действия концентрации напряжений на каждой стороне образца. Контролируемые площадки на поверхности образцов исследовались с использованием интерференционного нанопрофилометра. При контроле поверхности регистрировались площадь и периметр участков ДР, определялась насыщенность ДР, шероховатость и пластическая деформация поверхности. Методики регистрации показателей ДР подробно изложены в работах [4-7].

Результаты исследований

Согласно формуле (3) одним из определяющих параметров меры деструкции лакирующего слоя является показатель насыщенности ДР D . Значение этого показателя вычисляется по суммарной площади ДР, методика регистрации которой оптическими методами достаточно полно апробирована [1]. От площади ДР зависит и параметр δ , входящий в формулу (3). Для определения пластической деформации поверхности ε_a необходимы дополнительные измерения с использованием интерференционного профилометра, что затрудняет практическое использование формулы (3). Рассмотрим возможность приведения зависимости (3) к одному аргументу – насыщенности ДР D .

Насыщенность D характеризует развитие ДР на плоскости, т.е. в двумерном измерении. Поведение ДР в трехмерном измерении описывается зависимостью пластической деформации поверхности ε_a от параметра насыщенности D . Согласно полученным экспериментальным данным, пластическая деформация поверхности независимо от действующих напряжений линейно увеличивается с ростом насыщенности ДР (рис. 1).

Экспериментальные точки, представленные на рис. 1, аппроксимируются линейными функциями на двух участках:

$$\varepsilon_a = 0,0473 \cdot D - 3 \cdot 10^{-4} \quad (\text{для } D < 0,25); \quad (4)$$

$$\varepsilon_a = 0,085 \cdot D - 8,5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{для } D \geq 0,25). \quad (5)$$

Для определения параметра δ воспользуемся фрактальным соотношением между периметром и площадью плоских фигур нерегулярной формы (кластеров).

В классической постановке для плоских (двухмерных) кластеров характерно устойчивое соотношение между длиной их периметра P и величиной площади A в виде $P \sim \sqrt{A^{d_{AP}}}$, где параметр d_{AP} означает фрактальную размерность периметра [7]. Обычно значения d_{AP} находятся в диапазоне от 1 до 2.

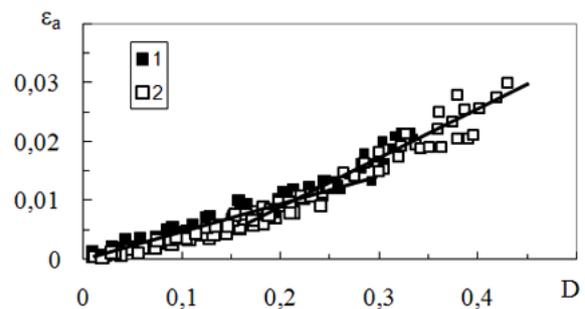


Рис. 1. Зависимость пластической деформации поверхности от параметра насыщенности ДР.

Точки получены для разных наработок при:

$$1 - \sigma_{\max} = 80 \text{ МПа}; 2 - \sigma_{\max} = 100 \text{ МПа}$$

На рис. 2 представлена зависимость периметра от площади кластеров ДР (единица измерений – пиксели), полученной по данным обработки 78 цифровых изображений ДР при различных значениях циклической наработки на двух уровнях максимального напряжения в цикле. Эта зависимость описывается степенной функцией

$$P = 5,33A^{0,744} \quad (R^2 = 0,98), \quad (6)$$

согласно которой фрактальная размерность периметра: $d_{AP} = 1,49$.

Из соотношения (6) следует

$$\delta = \frac{A}{P} = \frac{S^{0,256}}{5,33} D^{0,256}, \quad (7)$$

где $S = 7,68 \cdot 10^4$ пикселей.

Расчеты, проведенные по формуле (3) с учетом выражений (4), (5) и (7), показывают, что зависимость деструкции лакирующего слоя от насыщенности ДР не монотонна, а имеет скачок при $D = 0,3$ (рис. 3).

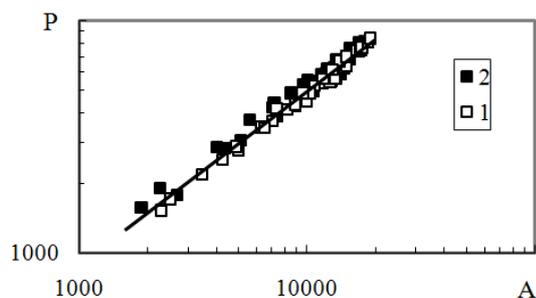


Рис. 2. Зависимость периметра кластеров ДР от их площади. Точки получены для разных наработок при: 1 – $\sigma_{\max}=80$ МПа; 2 – $\sigma_{\max}=100$ МПа

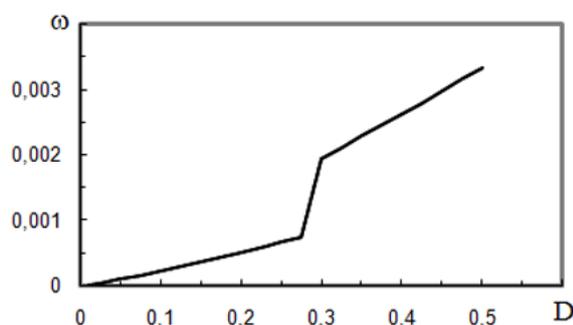


Рис. 3. Зависимость параметра деструкции плакирующего слоя от насыщенности ДР

Природа скачкообразного изменения деструкции на графике (см. рис. 1) связана с изменением механизма пластического деформирования поверхности, отраженного в виде двух участков зависимости ϵ_a от параметра насыщенности D (см. рис. 2.). Резкое возрастание деструкции при $D = 0,25 \dots 0,3$ соответствует образованию усталостной трещины в основном материале и не идентифицируется на зависимостях насыщенности от числа циклов нагружения.

Заключение

При циклическом нагружении алюминиевого сплава Д16АТ на поверхности плакирующего слоя образуется и развивается деформационный рельеф в виде локализованных участков пластически деформированного материала покрытия. Количественными показателями ДР является его насыщенность, пластическая деформация и деструкция поверхностного слоя. Полученные результаты свидетельствуют об изменении механизма повреждаемости плакирующего слоя, когда насыщенность ДР на поверхности достигает значение $D = 0,25 \dots 0,3$. При такой насыщенности ДР изменяется характер пластического деформирования поверхности плакирующего слоя и скачкообразно увеличивается его деструкция.

Данное значение насыщенности может использоваться как диагностический показатель образования начальных усталостных трещин.

Литература

1. Игнатович, С. Р. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов [Текст] / С. Р. Игнатович, М. В. Карускевич. – К. : НАУ, 2014. – 260 с.
2. *Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring* [Text] / S. R. Ignatovich, A. Menou, M. V. Karuskevich, P. O. Maruschak // *Theoretical and applied fracture mechanics*. – 2013. – № 65. – P. 23-27.
3. Petrasek, M. Surface of metal as an indicator of fatigue damage [Text] / M. Petrasek, S. Ignatovich, M. Karuskevich, T. Maslak // *Advances in Military Technology*. – 2013. – Vol. 8, No. 2. – P. 83–91.
4. Игнатович, С. Р. Контроль усталости сплава Д16АТ по характеристикам деформационного рельефа поверхности [Текст] / С. Р. Игнатович, С. С. Юцкевич // *Физико-хим. механика материалов*. – 2011. – Т. 47, № 5. – С. 60-65.
5. *Evolution of the deformation relief on the surface of a clad aluminum alloy at random cyclic loads* [Text] / S. R. Ignatovich, M. V. Karuskevich, S. S. Yutskevych // *Int. J. Fatigue*. – 2017. – Vol. 101, Part 1. – P. 45-50.
6. Игнатович, С. Р. Модель деструкции плакирующего слоя алюминиевых сплавов при усталости [Текст] / С. Р. Игнатович, М. В. Карускевич, С. С. Юцкевич // *Проблемы тертя та зношування*. – 2018. – № 4(81). – С. 54-61. DOI: 10.18372/0370-2197.4(81).13328.
7. Lovejoy, S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas [Text] / S. Lovejoy // *Science*. – 1982. – Vol. 216. – P. 185-187.

References

1. Ignatovich, S. R., Karuskevich, M. V. Monitoring vyrabotki ustalostnogo resursa letatel'nykh apparatov [Aircraft lifetime exhaustion monitoring]. Kyiv, National aviation university Publ., 2014. 260 p.
2. Ignatovich, S. R., Menou, A., Karuskevich, M. V., Maruschak, P. O. Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring. *Theoretical and applied fracture mechanics*, 2013, no. 65, pp. 23-27.
3. Petrasek, M., Ignatovich, S., Karuskevich, M., Maslak, T. Surface of metal as an indicator of fatigue damage. *Advances in Military Technology*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 83-91.

4. Ignatovich, S. R., Yutskevich, S. S. Kontrol' ustalosti splava D16AT po kharakteristikam deformatsionnogo rel'efa poverkhnosti [Fatigue control of the alloy D16AT according to the characteristics of the surface deformation relief]. *Fiziko-him. mexanika materialov*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 60-65.

5. Ignatovich, S. R., Karuskevich, M. V., Yutskevych, S. S. Evolution of the deformation relief on the surface of a clad aluminum alloy at random cyclic loads. *Int. J. Fatigue*, 2017, vol. 101, pp. 45-50.

6. Ignatovich, S. R., Karuskevich, M. V., Yutskevich, S. S. Model' destruktсии plakiruyushchego sloya alyuminievuykh splavov pri ustalosti [The model of an aluminium alloy clad layer destruction during fatigue]. *Problemi tertya ta znoshuvannya*, 2018, no.4 (81), pp. 54-61. DOI: 10.18372/0370-2197.4(81).13328

7. Lovejoy, S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas. *Science*, 1982, vol. 216, pp. 185-187.

Поступила в редакцию 12.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ДЕФОРМАЦІЙНИЙ РЕЛЬЄФ І ДЕСТРУКЦІЯ ПОВЕРХНІ ЯК ПОКАЗНИКИ ВТОМНОЇ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ПЛАКОВАНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, С. С. Юцкевич, С. В. Хижняк

У статті наведено результати дослідження зміни стану поверхні конструкційного сплаву D16AT з напруженням при різних значеннях напруження. Контроль стану поверхні матеріалу здійснювався інтерференційним нанопрофілометром. Основною особливістю сплаву D16AT є те, що для захисту від корозії матеріал покритий з обох сторін тонким шаром плакування, товщина якого становить близько 5 % від загальної товщини листа. При навантаженні деформування плакуючого шару і основного матеріалу через існуючі відмінності значень границі плинності істотно відрізняється. Така композиція нерозривно пов'язаних матеріалів сприятиме інтенсифікації пластичного деформування поверхневого шару. В ході циклічного навантаження на поверхні плакованого шару утворюються і розвиваються ділянки пластично деформованого матеріалу з особливим проявом рельєфу поверхні, обумовленим дислокаційними механізмами (сходинки і смуги зсуву, екструзії, інтрузії і т.п.). Кількісними показниками деформаційного рельєфу (ДР) є площа та периметр пластично деформованих ділянок, їх фрактальні характеристики та пластична деформація поверхні. Ці показники можуть виступати у якості індикаторів втомної пошкоджуваності сплаву, однак за ними важко провести ідентифікацію граничного стану – утворення початкової втомної тріщини. Таким діагностичним параметром є деструкція плакованого шару, для визначення якої використовуються основні показники ДР. Деструкція (збільшення об'єму плакованого шару) фізично об'єктивна – вона пов'язана зі збільшенням площі поверхні при формуванні та розповсюдженні ДР. Деструкцію можна вважати основним фактором втомного руйнування плакованих алюмінієвих сплавів. Показано, що при насиченості деформаційним рельєфом, приблизно, 25...30 % від загальної площі поверхні деструкція плакованого шару стрибкоподібно збільшується, що обумовлено зміною характеру пластичного деформування поверхні – збільшенням приросту її площини при високих значеннях насиченості.

Ключеві слова: деструкція; плакований шар; деформаційний рельєф; фрактальна розмірність.

DEFORMATION RELIEF AND DESTRUCTION OF SURFACE AS AN ALUMINUM ALLOY CLAD LAYER FATIGUE DAMAGE INDICATOR

S. R. Ignatovich, M. V. Karuskevych, S. S. Yutskevych, S. V. Khiznyak

The article presents the results of the study of changes in the state of the structural alloy D16AT surface with the operating time at various stress levels. The state of the surface of the material was monitored by an interference nanoprofiler. The main feature of the D16AT alloy is that to protect against corrosion, the material is coated on both sides with a thin layer of clad, the thickness of which is about 5 % of the sheet total thickness. During loading, the deformation of the cladding layer and the base material due to the existing difference in the yield strength values differs significantly. Such a composition of inextricably bound materials will contribute to the intensification of plastic deformation of the surface layer. During cyclic loading, areas of plastically deformed material are formed and developed on the surface of a clad aluminum alloy with a special representation of the surface relief caused by dislocation mechanisms (steps and slip bands, extrusion, intrusion etc.). Quantitative indicators of deformation relief

(DR) are the area and perimeter of plastic-deformed areas, their fractal characteristics and plastic deformation of the surface. These parameters can act as indicators of the alloy fatigue damage, but it is hard to identify the boundary state that is the fatigue crack initiation. Such a diagnostic parameter is the destruction of the clad layer to determine in order are used basic indicators of DR. Destruction (increase in the volume of the clad layer) is physically objective that is associated with an increase in surface area during the formation and extended of DR. Destruction can be considered as the main factor in the fatal destruction of clad aluminum alloys. It is shown that when saturated with a deformation relief, approximately 25 ... 30 % of the total surface area of the destruction of the clad layer increases abruptly due to the change in the nature of the plastic deformation of the surface that is an increase in the growth of its plane at high saturation values. This saturation value can be used as a diagnostic indicator of the initial fatigue cracks initiation.

Keywords: destruction; clad layer; deformation relief; fractal dimension.

Игнатович Сергей Ромуальдович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции летательных аппаратов, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Карускевич Михаил Витальевич – д-р техн. наук, проф. каф. конструкции летательных аппаратов, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Юцкевич Святослав Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкции летательных, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Хижняк Сергей Васильевич – канд техн. наук, доцент кафедры конструкции летательных, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Ignatovich Sergey Romualdovich – Doctor of Science, Professor, Head of Aircraft Design Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: ignatovich@nau.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-9322-2195, Scopus Author ID: 6603696962, ResearcherID: Q-4479-2019 <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=LWSWVXEAAAAJ>

Karuskevych Mikhail Vitalievich – Doctor of Science, Professor of Aircraft Design Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: mvkaruskevich@nau.edu.ua, orcid Author ID: 0000-0003-1698-0296, Scopus Author ID: 6507854987, ResearcherID: Q-4057-2019, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=oAltI5oAAAAJ&hl=ru&oi=sra>.

Yutskevych Sviatoslav Sergeevich – Candidate of Science, associate professor of Aircraft Design Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: yutskevych@nau.edu.ua, orcid Author ID: 0000-0001-6650-4453, Scopus Author ID: 57204993861, ResearcherID: 2955736, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=xHQDSrUAAAAJ>.

Khiznyak Sergey Vasilievich – Candidate of Science, associate professor of Aircraft Design Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: khz.serg@gmail.com, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=Ajzkr8AAAAJ>.