

УДК 620.178.3:620.179.118(045)

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

Национальный авиационный университет, Киев

МОДЕЛЬ ДЕСТРУКЦИИ ПЛАКИРУЮЩЕГО СЛОЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ УСТАЛОСТИ

Предлагается модель деструкции лакирующего слоя при усталости, описывающая изменение его объема в зависимости от параметров деформационного рельефа (ДР). Показано, что критическая деструкция определяется отношением площади ДР к его периметру

Ключевые слова: деформационный рельеф, деструкция, лакирующий слой, усталость.

Введение. Для защиты от коррозии цветных металлов и сплавов применяются технологии нанесения поверхностных покрытий. Листовые материалы из алюминиевых сплавов, которые применяются в авиационных конструкциях, обычно имеют тонкие слои лакировки с обеих сторон (толщина слоя составляет, приблизительно, 5% с каждой стороны). У сплавов 2024Т3 и Д16АТ слой лакировки состоит из технически чистого алюминия марки АД1 (А5). Для сплавов В95 и 7075Т6 применяется лакировочный материал марки АЦ – алюминий с добавлением 0,9...1,3 % цинка.

Прочность лакирующего слоя значительно отличается от прочности основного материала. Так, для алюминиевых сплавов Д16 и 2024 предел прочности $\sigma_b \cong 430..440$ МПа, а предел текучести $\sigma_y \cong 280..290$ МПа. Для материала покрытия АД1 эти показатели составляют: $\sigma_b \cong 80..100$ МПа и $\sigma_y \cong 10..50$ МПа. Такая композиция неразрывно связанных материалов, которые имеют различные механические свойства, определяет особенности пластического деформирования поверхностного слоя и влияет на сопротивление лакированных алюминиевых сплавов усталостному разрушению.

Известно, что защитный поверхностный слой негативно влияет на сопротивление усталости алюминиевых сплавов [1]. Оценки такого влияния различны – от «незначительного» [2] до ощутимого – предел выносливости снижается (в зависимости от базы долговечности) на 15...25 % [3] и, даже, на 30...50% [4; 5].

В работе [6] установлено, что лакирование и анодирование существенно снижает усталостную долговечность образцов с надрезом и заклепочного соединения внахлест листов из алюминиевых сплавов 2024Т3 и 7475Т761 при воздействии полетного спектра нагрузок. Испытания алюминиевого сплава LC9cs с покрытием и без покрытия показали, что при асимметричном циклическом нагружении ($R = 0$ и $R = 0,5$) долговечность лакированных образцов меньше, чем без покрытия, причем с понижением уровня напряжения этот эффект усиливается [7]. В этой работе отмечается, что в лакирующем слое от полос скольжения всегда образовывались и развивались множественные трещины, которые затем переходили в основной материал. Установлено, что негативное влияние лакирования зависит от толщины лакирующего слоя [8].

Следовательно, покрытие повреждается более интенсивно и инициирует разрушение матрицы. При этом лакирование алюминиевых сплавов в большей мере понижает предел усталости отдельных деталей, но мало влияет на предел

усталости соединений. Для соединения внахлестку плакирование вредно только в сочетании с анодированием [6]. Оксидные пленки обычно мало влияют на усталость алюминиевых сплавов.

Необходимо отметить, что деформирование плакирующего слоя и основного материала при циклическом нагружении существенно отличается. Например, предел текучести алюминия ($\sigma_Y^c = 30$ МПа) на порядок меньше предела текучести алюминиевого сплава Д16 ($\sigma_Y^a = 290$ МПа). Если образец плакируемого сплава нагружается пульсирующим циклом в упругой области ($\sigma_{\max} < \sigma_Y^a$), то при равенстве модулей упругости сплава и покрытия циклическое упругое деформирование матрицы будет сопровождаться знакопеременным упругопластическим деформированием плакирующего слоя [9]. На его поверхности образуются локальные участки пластической деформации, которые характерны изменением рельефа поверхности [5 – 9].

Определяющим фактором формирования деформационного рельефа (ДР) является эволюция дислокационной структуры поверхностного слоя при усталости. Локальное пластическое деформирование сопровождается выходом дислокаций на свободную поверхность и, как следствие, образованием ступенек и полос сдвига, возникновением экструзий и интрузий [10; 11]. Эти явления приводят к изменению рельефа поверхности в местах пластического деформирования. С увеличением числа циклов нагружения ДР развивается как по площади [12], так и в направлении, нормальном к поверхности [13; 14]. Такое поведение ДР плакирующего слоя при циклическом нагружении используется в специальных сенсорах усталостной поврежденности, а также при непосредственном контроле состояния авиационных конструкций, изготовленных из листовых алюминиевых сплавов [15; 16].

Целью настоящей работы является построение модели деструкции плакирующего слоя при циклическом нагружении для прогнозирования образования усталостных трещин в конструкциях из плакированных алюминиевых сплавов.

Модель деструкции плакирующего слоя. Насыщенность поверхности деформационным рельефом количественно характеризуется относительным параметром [5]

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

где S – суммарная площадь следов проявления ДР на площади A .

Пусть на поверхности площадью A расположены n непересекающихся участков ДР с площадями S_i ($i=1,2,\dots,n$). Суммарная площадь ДР $S = \sum_{i=1}^n S_i$, а на один участок ДР приходится площадь поверхности $A_1 = A/n$. Из формулы (1) следует

$$D = \sum_{i=1}^n S_i / nA_1 = S_m / A_1, \quad (2)$$

где $S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$ – среднее значение площади ДР на одном участке поверхности площадью A_1 .

Таким образом, участок A_1 по показателю D является свидетелем осредненной насыщенности ДР на всей поверхности площадью A .

Параметр D описывает развитие ДР в двухмерном измерении (на плоскости поверхности). В направлении, нормальном к поверхности, характеристиками ДР являются параметр шероховатости R_a или величина пластической деформации поверхности ε_a , которая неизбежно присутствует при изменении площади поверхности из-за появления ДР [5, 9]. Рассмотрим, как согласуется пластическое деформирование поверхности с деструкцией объема плакирующего слоя.

Пусть на участке поверхности плакирующего слоя площадью A_1 и толщиной t , за счет локального пластического деформирования имеется зона ДР площадью S_m , ограниченная периметром p (произвольной формы) и имеющая среднюю высоту h (рис.1).

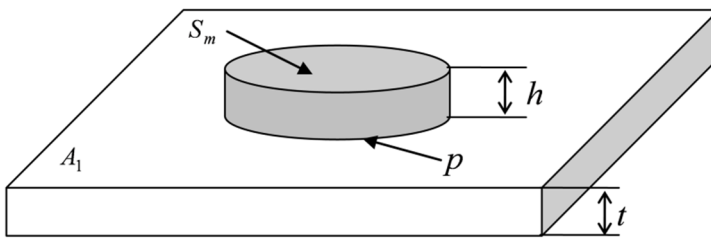


Рис.1. Схема формирования ДР на поверхности плакирующего слоя

Так как локальная зона ДР ограничивается областью с периметром p , то приращение площади поверхности будет равно ph , а пластическая деформация определится как

$$\varepsilon_a = \frac{ph}{S_m} = \frac{h}{b_a}. \quad (3)$$

Формула (3) устанавливает связь обобщенной характеристики ДР (ε_a) с параметрами ДР на плоскости (параметры p, S_m) и в направлении, нормальном к поверхности (параметр h).

В формулу (3) входит отношение площади области ДР к ее периметру

$$b_p = \frac{S_m}{p} \quad (4)$$

одного из определяющих параметров фрактальной геометрии, характеризующего форму плоских объектов. Это напрямую подтверждает обоснованность использования показателя фрактальной размерности для количественной оценки насыщенности ДР на поверхности плакированных алюминиевых сплавов при циклическом нагружении [12].

Из (3) следует соотношение

$$h = b_a \varepsilon_a. \quad (5)$$

Параметр h является феноменологическим и не поддается прямому измерению. Однако, можно предположить, что данный показатель рельефа должен быть пропорционален изменению шероховатости поверхности из-за развития ДР:

$$h = \alpha \Delta R_a, \quad (6)$$

где α – коэффициент; ΔR_a – приращение параметра шероховатости поверхности при эволюции ДР.

Пластическое деформирование поверхности, связанное с увеличением ее площади из-за развития ДР, должно сопровождаться изменением объема плакирующего слоя, а именно – с его деструкцией. Движение и размножение дислокаций, выдавливание микрообъемов материала сопровождается интенсивным образованием вакансий и пор, формированием трещин и пустот [17-19]. Согласно принятой схемы (рис. 1), изменение объема плакирующего слоя определится как

$$\Delta V_p = hS_m. \quad (7)$$

Вводим параметр деструкции ω , характеризующий изменение объема плакирующего слоя:

$$\omega = \frac{\Delta V_p}{V_0} = \frac{hS_m}{A_1 t}, \quad (8)$$

где $V_0 = A_1 t$ – объем до деформирования.

Подставив в формулу (8) соотношения (2) и (6), получим

$$\omega = \frac{hD}{t} = \frac{\alpha \Delta R_a D}{t}, \quad (9)$$

Если выразить параметр h через пластическую деформацию поверхности в соответствии с формулой (5), приходим к представлению соотношения (9) в виде

$$\omega = \frac{b_a \varepsilon_a D}{t}, \quad (10)$$

В выражения (9) и (10) входят параметры ДР ($D, \varepsilon_a, b_a, \Delta R_a$), методики определения которых отработаны при проведении исследований поверхности алюминиевых сплавов в условиях циклического нагружения [5; 13]. Рассмотрим численную реализацию предложенной модели на примере усталости плоских образцов из плакированного алюминиевого сплава Д16АТ [9].

Численная реализация модели. Исследовались закономерности развития ДР на специально подготовленных участках поверхности плакирующего слоя у отверстия в плоских образцах при отнулевом циклическом нагружении с максимальным напряжением $\sigma_{\max} = 80$ МПа. База испытаний составляла $N = 7 \cdot 10^5$ циклов. Измерение параметров ДР: $D, \varepsilon_a, b_a, \Delta R_a$ осуществлялся периодически через $N = 5 \cdot 10^3$ циклов. Толщина плакирующего слоя $t = 30$ мкм.

Тестовым показателем адекватности предлагаемой модели является феноменологическая зависимость (6), в которой параметр h можно определить по формуле (5) на основании объективных (измеряемых) показателей ДР. Как показывают результаты измерений, на двух контролируемых участках поверхности, расположенных в разных местах от концентратора, линейная зависимость h от ΔR_a подтверждается (рис. 2).

В процессе нагружения на поверхности исследуемых площадках происходило двухмерное развитие ДР, о чем свидетельствует зависимости от числа циклов параметра насыщенности D (рис. 3).

Развитие ДР на поверхности сопровождается деструкцией плакирующего слоя. Относительное увеличение его объема за счет образования и накопления внутренних дефектов, которое количественно описывается параметром (10), иллюстрируется соответствующими зависимостями от числа циклов нагружения (рис. 4).

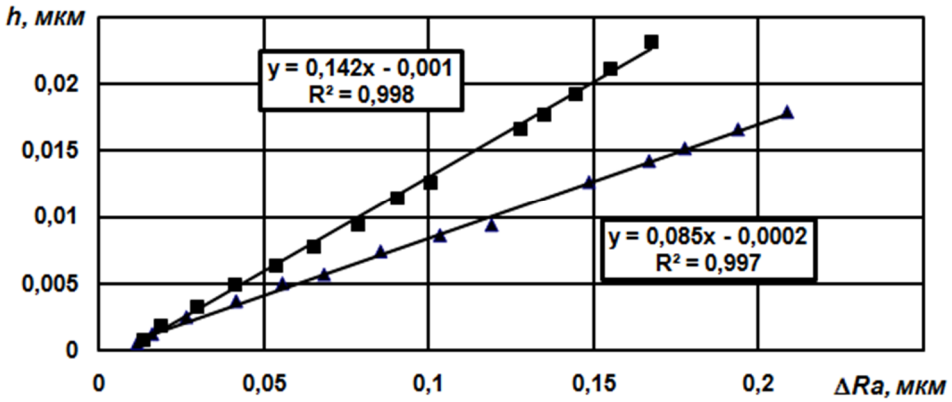


Рис. 2. Зависимость параметра h от приращения параметра шероховатости поверхности при циклическом нагружении

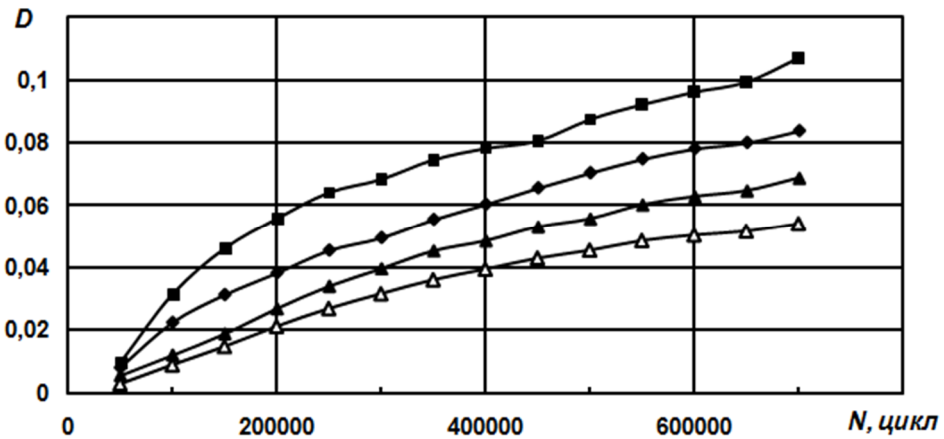


Рис. 3. Зависимость параметра D от числа циклов нагружения на различных участках контроля поверхности образца

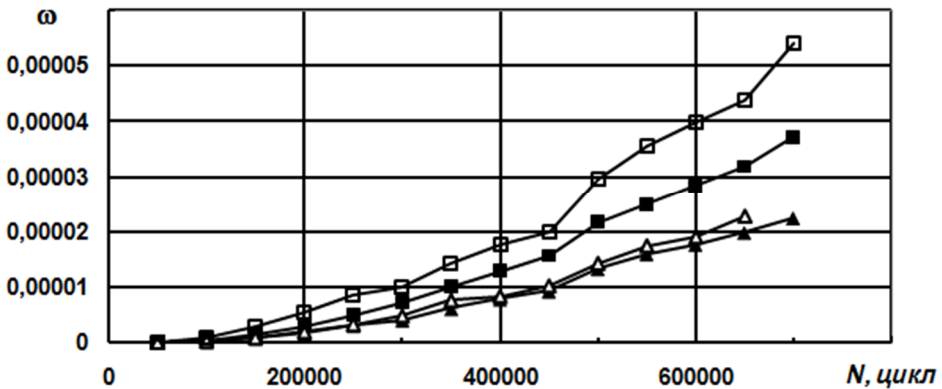
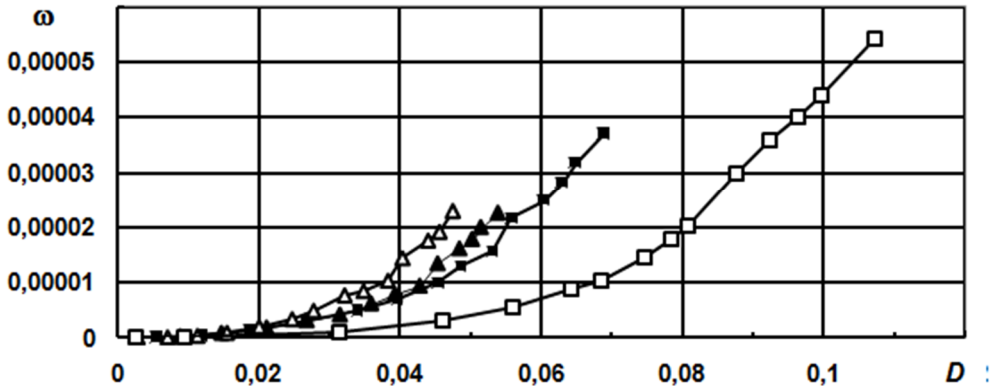


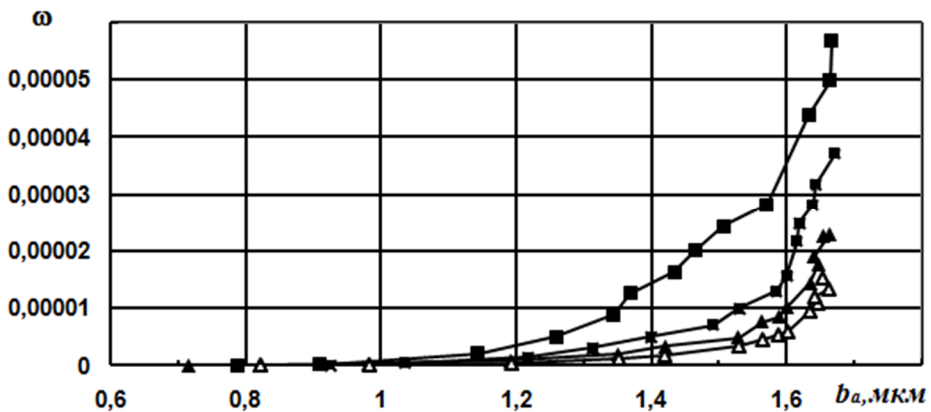
Рис. 4. Изменение деструкции плакирующего слоя от числа циклов нагружения на различных участках контроля поверхности образца

Зависимости параметра деструкции ω от числа циклов нагружения (рис. 4), как и параметра насыщенности ДР D (рис. 3), демонстрируют развитие поврежденности плакирующего слоя в процессе нагружения. Представленные зависимости монотонны в исследуемой области наработки и поэтому не отражают критического состояния слоя, связанного с его предельной деструкцией и образованием усталостной трещины.

Экспериментальные данные показывают, что деструкция плакирующего слоя зависит от площади ДР (рис.5, *a*), однако наиболее чувствительна к отношению площади к периметру (рис.5, *б*).



a



б

Рис. 5. Изменение деструкции плакирующего слоя от относительной площади ДР (*a*) и отношения площади ДР к его периметру (*б*) на различных участках контроля поверхности образца

Если зависимости параметра деструкции ω от параметра D монотонны (рис.5, *a*), то на зависимостях ω от b_a наблюдается скачкообразный рост деструкции при $b_a > 1,6$ на всех исследуемых участках поверхности (рис.5, *б*). Следовательно, значение $b_a = 1,6$ может использоваться как критерий предельной деструкции плакирующего слоя.

Выводы. На основании предложенной модели деструкции плакирующего слоя и экспериментальным данным по развитию ДР на его поверхности целесообразно использовать в качестве диагностического показателя образования усталостной трещины значение параметр b_a .

Список литературы

1. Schijve J., Jacobs F.A., Tromp P.J. The significance of cladding for fatigue of aluminium alloys in aircraft structures / National Aerospace Laboratory NLR, Report NLR TR76065 U. – 1976.
2. Роль защитного покрытия в сварных соединениях алюминиевого сплава на сопротивление усталости / В.А. Шонин, В.С. Машин, А.П. Мурашов, [и др.] // Автоматическая сварка. – 2009. – № 3. – С. 23–26.
3. Прочность машин и конструкций при переменных нагрузках // Научные школы МАТИ / Под общ. ред. Л.В. Агамирова. М: МАТИ, 2001. – 136 с.
4. Панков А.Т. Влияние плакирующего слоя на характеристики прочности конструкционных алюминиевых сплавов и эффективность их антикоррозионной защиты: автореф. дис. на получение науч. степени канд. техн. наук: спец. 01.02.03 «Сопротивление материала и строительная механика» / А.Т. Панков – К., 1975. – 23 с.
5. Игнатович С.Р., Карускевич М.В. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов. К.: НАУ. – 2014. – 260 с.
6. Wanhill, R.J.H. Effects of cladding and anodising on flight simulation fatigue of 2024-T3 and 7475-T761 aluminium alloys / National Aerospace Laboratory NLR, Report NLR TR 85006 L – 1985.
7. Newman J. C., Wu Jr., X. R., Venneri S. L., Li C. G. Small-crack effects in high-strength aluminum alloys / A NASA/CAE Cooperative Program / NASA Reference Publication 1309. – 1994. – 116 p.
8. Karlashov A.V., Gainutdinov R.G., Baishumurov Zh. Effect of the thickness of the cladding layer on the fatigue and corrosion-fatigue life of aluminum alloy sheet material // Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov. – V. 11, N. 4, – 1975. – P. 39–41.
9. Игнатович С.Р., Шмаров В.Н., Юцкевич С.С. Особенности формирования деформационного рельефа на поверхности сплава Д16АТ при усталости // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – N 10. – С. 132–136.
10. Горицкий В.М., Терентьев В.Ф. Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
11. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. – М.: Металлургия, 1990. – 623 с.
12. Karuskevich M.V., Korchuk E.Yu., Yakushenko A.S., Maslak T.P. Estimation of the accumulated fatigue damage by saturation and fractal dimension of the deformation relief // Strength of Materials – V. 40, No. 6, – 2008. – P. 693–698.
13. 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 // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 101, Part 1. – P. 45–50.
14. Ignatovich S.R., Yutskevich S.S. Monitoring of the D16AT alloy according to the characteristics of deformation surface pattern // Materials Science. – 2012. – Vol. 47, N 5. – P. 636 – 643.
15. 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. – 65. – P. 23–27.
16. Petrasek M., Ignatovich S., Karuskevich M., Maslak T. Surface of metal as an indicator of fatigue damage // Advances in Military Technology. – 2013. – Vol. 8, N 2. – P. 83–91.
17. Бетехтин В.И., Владимиров В.И., Кадомцев А.Г. Пластическая деформация и разрушение кристаллических тел. Сообщ.1. Деформация и развитие микротрещин // Пробл. прочности. – 1979. – № 7. – С. 38–45.
18. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г., Мешков Ю.Я. Исследование плотности деформированных металлов и сплавов // Физическая природа пластической деформации. – К.:

Наук. думка, 1966. – С. 89–98.

19. Рыбакина О.Г., Сидорин Я.С. Экспериментальное исследование закономерностей пластического разрыхления металлов // Инж. журнал. Механика твердого тела. – 1966. – № 1. – С. 120–124.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2018

С. Р. ІГНАТОВИЧ, М.В. КАРУСКЕВИЧ, С.С. ЮЦКЕВИЧ

МОДЕЛЬ ДЕСТРУКЦІЇ ПЛАКОВАНОГО ШАРУ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ ВТОМІ

Використання плакування авіаційних алюмінієвих сплавів як технології захисту від корозії, призводить до зниження опору втомі. Цей ефект обумовлений циклічним пружно-пластичним деформуванням плакуючого шару, в якому утворюються і інтенсивно розвиваються пошкодження у вигляді дефектів суцільності. Деструкція плакуючого шару ініціює втомну пошкоджуваність основного матеріалу сплаву, що призводить до зниження його опору втомі. Інтенсивне пружно-пластичне деформування плакуючого шару призводить до виникнення деформаційного рельєфу (ДР) поверхні, який проявляється у вигляді локальних ділянок пластичної деформації з підвищеними значеннями шорсткості. Зі збільшенням числа циклів навантаження ДР розвивається в тривимірному вимірі – на площині і в нормальному до поверхні матеріалу напрямках. Показником двомірного розвитку є відносна площа ДР, а показниками його поширення в нормальному до поверхні напрямку – параметр шорсткості. Інтегральним показником розвитку ДР є величина пластичної деформації поверхні. Для чисельної оцінки пошкоджуваності плакуючого шару пропонується використовувати критерій деструкції – відносну величину збільшення об'єму через формування та накопичення в шарі дефектів суцільності. На підставі феноменологічної моделі деструкції, яка запропонована в роботі, обґрунтовано вираз для визначення даного критерію, до якого входять відомі показники розвитку ДР в тривимірному напрямку. Показано, що для оцінки деструкції необхідно використовувати додатковий показник ДР – відношення його площі на поверхні до периметру. Чисельна реалізація запропонованої моделі здійснювалася на підставі експериментально отриманих даних щодо розвитку ДР на поверхні плакуючого шару плоских зразків при циклічному навантаженні. Показано, що прийняті при побудові моделі феноменологічні передумови не суперечать експериментальним показникам розвитку ДР, а критерій деструкції задовільно описує пошкоджуваність плакуючого шару. Обґрунтовано, що гранична деструкція реалізується при критичних значеннях відношення площі ДР до його периметру, що дає підставу запропонувати даний показник як критерій для опису розвитку ДР на поверхні і прогнозування утворення втомної тріщини в матеріалі сплаву.

Ключові слова: деформаційний рельєф, деструкція, плакований шар, втома

Ігнатович Сергій Ромуальдович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету, ignatovich@nau.edu.ua

Карускевич Михайло Віталійович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету, mkaruskevich@hotmail.com

Юцкевич Святослав Сергійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету, yutskevych@nau.edu.ua

S. R. IGNATOVICH, M. V. KARUSKEVICH, S. S. YUTSKEVYCH

THE MODEL OF ALUMINIUM ALLOY CLAD LAYER DESTRUCTION DURING FATIGUE

The use of aircraft aluminum alloys cladding as a corrosion protection technology leads to fatigue resistance decrease. This effect is due to the cyclic elasto-plastic deformation of the clad layer, in which damages in the form of continuity defects are formed and intensively developed. The destruction of the clad layer initiates the fatigue damage of the alloy base material, which leads to a fatigue resistance decrease. Intensive elasto-plastic deformation of the cladding layer leads to the deformation relief (DR) of the surface appearance, which occurs through the local areas of plastic deformation with increased roughness values. With an increase in the number of loading cycles, the DR develops in three dimensions: on the plane and in the directions normal to the material surface. Indicator of two-dimensional development is the relative area of the DR, and indicator of its development in the direction normal to the surface is the roughness parameter. An integral indicator of the DR development is the surface plastic deformation quantity. For the clad layer damage numerical assessment, it is proposed to use the criterion of destruction - the relative magnitude of the volume increase due to the formation and accumulation of integrity defects in the layer. Based on the phenomenological model of destruction proposed in the work, the expression for this criterion estimation, which includes known indicators of the DR development in the three-dimensional direction, is substantiated. It is shown that to destruction assessment, it is necessary to use an additional DR indicator - DR surface area to its perimeter ratio. The numerical implementation of the proposed model was carried out on the basis of test data of DR development on the clad layer surface of the flat specimens under cyclic loading. It is shown that the phenomenological assumptions for the model specification do not contradict the test data of DR indicators development, and the criterion of destruction satisfactorily describes the damage of the clad layer. It has been substantiated that the ultimate destruction is obtained at critical values of DR area to its perimeter ratio, which gives grounds to suggest this indicator as a criterion for describing the development of DR on the surface and predicting the fatigue crack initiation in the alloy material.

Key words: deformation relief, destruction, clad layer, fatigue

References

1. Schijve J., Jacobs F.A., Tromp P.J. The significance of cladding for fatigue of aluminum alloys in aircraft structures / National Aerospace Laboratory NLR, Report NLR TR76065 U. – 1976.
2. Rol zaschitnogo pokrytiya v svarnyih soedineniyah alyuminievogo splava na soprotivlenie ustalosti / V.A. Shonin, V.S. Mashin, A.P. Murashov, [and others] // Avtomaticheskaya svarka. – 2009. – № 3. – P. 23–26
3. Prochnost mashin i konstruktsiy pri peremennyih nagruzkah // Nauchnyie shkolyi MATI / Pod obsch. red. L.V. Agamirova. M: MATI, 2001. – 136 p.
4. Pankov A.T. Vliyanie plakiruyushchego sloya na harakteristiki prochnosti konstruktsionnyih alyuminievyih splavov i effektivnost ih antikorrozionnoy zaschityi: avtoref. dis. na poluchenie nauch. stepeni kand. tehn. nauk: spets. 01.02.03 «Soprotivlenie materialov i stroitel'naya mehanika» / A.T. Pankov K., 1975. – 23 p.
5. Ignatovich S.R., Karuskevich M.V. Monitoring vyirabotki ustalostnogo resur-sa letatelnyih apparatov. K.: NAU.– 2014. – 260 p.
6. Wanhill, R.J.H. Effects of cladding and anodising on flight simulation fatigue of 2024-T3 and 7475-T761 aluminium alloys / National Aerospace Laboratory NLR, Report NLR TR 85006 L – 1985.
7. Newman J. C., Wu Jr., X. R., Venneri S. L., Li C. G. Small-crack effects in high-strength aluminum alloys / A NASA/CAE Cooperative Program / NASA Reference Publication 1309. – 1994. – 116 p.
8. Karlashov A.V., Gainutdinov R.G., Baishumurov Zh. Effect of the thickness of the

cladding layer on the fatigue and corrosion-fatigue life of aluminum alloy sheet material // Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov. – V. 11, N. 4, – 1975. – P. 39–41.

9. Ignatovich S.R., Shmarov V.N., Yutskevich S.S. Osobennosti formirovaniya deformatsionnogo relefa na poverhnosti splava D16AT pri ustalosti // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2009. – N 10. – P. 132–136.

10. Goritskiy V.M., Terentev V.F. Struktura i ustalostnoe razrushenie metallov. 1980. – 208 c.

11. Kotsan'da S. Ustalostnoe rastreskivanie metallov. M.: Metallurgiya, 1990. – 623 p.

12. Karuskevich M.V., Korchuk E.Yu., Yakushenko A.S., Maslak T.P. Estimation of the accumulated fatigue damage by saturation and fractal dimension of the deformation relief // Strength of Materials – V. 40, No. 6, – 2008. – P. 693–698.

13. Ignatovich S.R., Karuskevich M.V., Yutskevich S.S. Evolution of the deformation relief on the surface of a clad aluminum alloy at random cyclic loads // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 101, Part 1. – P. 45-50.

14. Ignatovich S.R., Yutskevich S.S. Monitoring of the D16AT alloy according to the characteristics of deformation surface pattern // Materials Science. – 2012. – Vol. 47, N 5. . – P. 636 - 643.

15. 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. – 65. – P. 23-27.

16. Petrasek M., Ignatovich S., Karuskevich M., Maslak T. Surface of metal as an indicator of fatigue damage // Advances in Military Technology. – 2013. – Vol. 8, N 2. – P. 83–91.

17. Betehtin V.I., Vladimirov V.I., Kadomtsev A.G. Plasticheskaya deformatsiya i razrushenie kristallicheskih tel. Soobshch. 1. Deformatsiya i razvitie mikrotreschin // Probl. prochnosti. – 1979. – № 7. – P. 38–45.

18. Gridnev V.N., Gavrilyuk V.G., Meshkov Yu.Ya. Issledovanie plotnosti deformirovannykh metallov i spлавov // Fizicheskaya priroda plasticheskoy deformatsii. - K.: Nauk. dumka, 1966. – P. 89–98.

19. Ryibakina O.G., Sidorin Ya.S. Eksperimentalnoe issledovanie zakonornostey plasticheskogo razryhleniya metallov // Inzh. zhurnal. Mehanika tverdogo tela. – 1966. – № 1. – P. 120–124.