

ISSN 0430-6252

**Ф**ІЗИКО-  
**Х**ІМІЧНА  
**М**ЕХАНІКА  
**М**АТЕРІАЛІВ



**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**  
**PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS**

**5-2011**

## КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТИ СПЛАВА Д16АТ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

С. Р. ИГНАТОВИЧ, С. С. ЮЦКЕВИЧ

*Национальный авиационный университет, Киев*

Показано, что в процессе циклического нагружения на поверхности плакирующего слоя конструкционного алюминиевого сплава образуется и развивается деформационный рельеф (ДР). Количественные параметры ДР – насыщенность, шероховатость и пластическая деформация поверхности – являются индикаторами поврежденности материала. Экспериментальные зависимости рассмотренных параметров от наработки (количества циклов нагружения) можно использовать при создании методов прогнозирования предельного состояния элементов конструкции самолета.

**Ключевые слова:** *деформационный рельеф, интерференционная профилометрия, усталость, параметры деформационного рельефа.*

Процессы повреждаемости при усталости металлов, связанные с формированием и эволюцией дислокационной структуры, пластическим разрыхлением и микроразрушением, локализованы в поверхностном слое. Более интенсивное пластическое деформирование поверхности по сравнению с объемом материала позволяет трактовать поверхностный слой как самостоятельную функциональную подсистему, которая определяет особенности локального пластического деформирования и разрушения материала в целом [1]. Таким образом, поверхность может являться своеобразным индикатором накопленных повреждений, а оценка ее состояния рассматриваться как способ диагностирования усталостной поврежденности и исчерпания несущей способности всей конструкции.

Одно из перспективных направлений исследования пластического деформирования поверхности связано с разработкой методологии контроля технического состояния конструкций в эксплуатации. Сенсорные датчики (образцы-свидетели) в виде тонких пластин или пленок, выполненные из легко деформируемых материалов (например, монокристаллического алюминия), наклеиваются на наиболее нагружаемые участки конструкции и воспринимают вместе с ней эксплуатационные силовые воздействия [2]. История эксплуатационного нагружения контролируемого элемента конструкции, определяющая его поврежденность, проявляется в виде типичных следов локального пластического деформирования поверхности датчика – линий и полос скольжения, экструзий, интрузий и т.п. На поверхности формируется деформационный рельеф (ДР).

В авиационных конструкциях в качестве материала используют листовые алюминиевые сплавы, покрытые тонким плакирующим слоем из технически чистого алюминия. При нагружении ДР формируется непосредственно на поверхности такого слоя и легко регистрируется оптическими средствами. Мониторинг исчерпания ресурса конструктивных элементов здесь можно осуществлять по критерию насыщенности ДР, равном относительной площади участка контроля, покрытой следами пластического деформирования [3]. Особенности этого метода изложены ранее [4, 5]. Количественная оценка ДР по его площади, т. е. в двухмерном (плоском) измерении, не является исчерпывающей. Необходимо исследовать

исследовать количественные показатели ДР в трехмерном измерении [6, 7]. Ниже изучены особенности формирования и эволюции ДР на поверхности лакирующего слоя при циклическом нагружении алюминиевого сплава.

**Материал и методика исследования.** Плоские образцы из конструкционного алюминиевого сплава Д16АТ циклически нагружали на сервогидравлической установке BiSS Bi00-202V при отнулевом цикле ( $\sigma_{\min} = 0$ ) с заданным значением максимального напряжения  $\sigma_{\max}$ . Поверхность образцов в состоянии поставки покрыта лакирующим слоем из технического чистого алюминия толщиной 50  $\mu\text{m}$ . В центральной части образца высверливали отверстие диаметром 4 мм, моделирующее отверстие под заклепку в конструкции обшивки самолета. Участок поверхности, примыкающий к отверстию, полировали алмазной пастой.

При циклическом нагружении образцы периодически снимали с установки для контроля ДР, который осуществляли на площадке поверхности  $225 \times 170 \mu\text{m}$ , примыкающей к отверстию в зоне концентрации напряжений: на каждом образце четыре таких участка – по два с каждой его стороны. Участки лакирующего слоя на поверхности образцов исследовали с помощью интерференционного оптического нанопрофилометра [8], который регистрирует оптическое изображение поверхности со следами ДР, производит цифровую его обработку, а также определяет 3D-топографию поверхности. При этом регистрировали насыщенность ДР, шероховатость и пластическую деформацию поверхности.

**Насыщенность ДР.** На фотографиях, полученных с помощью оптического микроскопа, входящего в состав профилометра, ДР проявляется в виде темных участков (рис. 1а), соответствующих большей выпуклости рельефа поверхности, полученного с помощью профилометра (рис. 1б). Эти фотографии преобразовывали в монохромное (черно-белое) изображение, по которому в автоматическом режиме определяли суммарную площадь ДР ( $S$ ). Для количественной оценки насыщенности ДР использовали формулу

$$D = S / A, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь исследуемого участка.

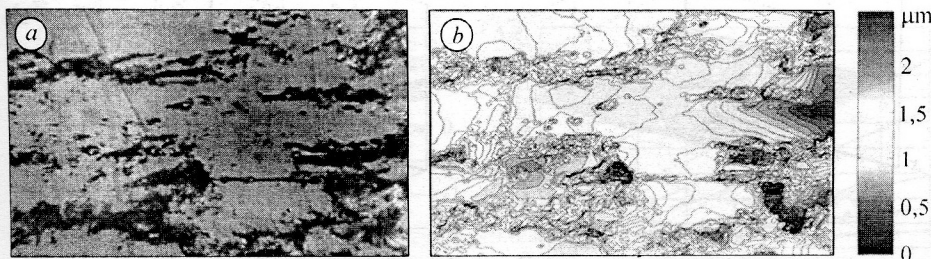


Рис. 1. Цифровая фотография ( $\times 500$ ) (а) и 3D-топография (б) участка поверхности со следами деформационного рельефа.

Fig. 1. Digital photography ( $\times 500$ ) (a) and 3D topography (b) of surface control zone with deformation relief (DR) marks.

**Шероховатость.** Развитие ДР в направлении, нормальном к поверхности, характеризовали по изменению шероховатости  $R_a$ , которая равна усредненному отклонению абсолютных значений профиля поверхности  $z_i$  от средней линии (рис. 2а):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i|, \quad (2)$$

где  $n$  – количество точек измерения профиля.

Контролируемую площадку разбивали на 320 линий длиной 170  $\mu\text{m}$  и вдоль каждой из них по формуле (2) определяли значение  $R_{ai}$  (рис. 2б). Шероховатость на площадке вычисляли, усредняя значение  $R_{ai}$  по всем линиям. Эволюцию шеро-

ховатости площадки при циклическом нагружении характеризовали приращением параметра  $R_a$ :

$$\Delta R_a = R_{aN} - R_{a0}, \quad (3)$$

где  $R_{a0}$  и  $R_{aN}$  – шероховатость до (исходная) и после  $N$  циклов нагружения.

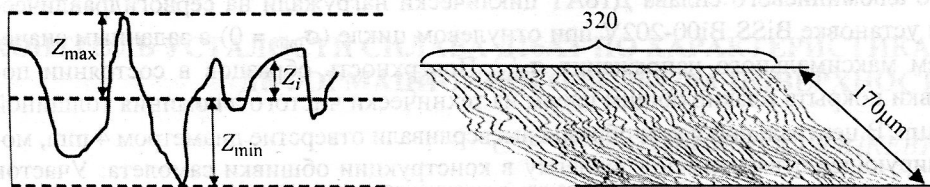


Рис. 2. Схемы расчета шероховатости  $R_a$  вдоль  $i$ -ой линии (а) и на контролируемой площадке поверхности (b).

Fig. 2. Calculation model for roughness,  $R_a$ , along the line (a) and on the surface control zone (b).

**Пластическая деформация.** С изменением рельефа увеличивается площадь поверхности:

$$\Delta A = A_N - A_0, \quad (4)$$

где  $A_0$ ,  $A_N$  – площадь поверхности до и после  $N$  циклов нагружения. Для расчета площади поверхности проекцию контролируемого участка на плоскость  $x$ ,  $y$  представляли в виде сетки из  $320 \times 240$  узлов, каждому из которых соответствует значение высоты рельефа поверхности  $z_i$ , определенной профилемером (рис. 3). Поверхность заменяли совокупностью треугольников, координаты вершин которых соответствуют значениям  $z_i$ . Площадь всей поверхности рассчитывали, суммируя площадь треугольников. По изменению площади определяли пластическую деформацию поверхности:

$$\varepsilon_a = \Delta A / A_0. \quad (5)$$

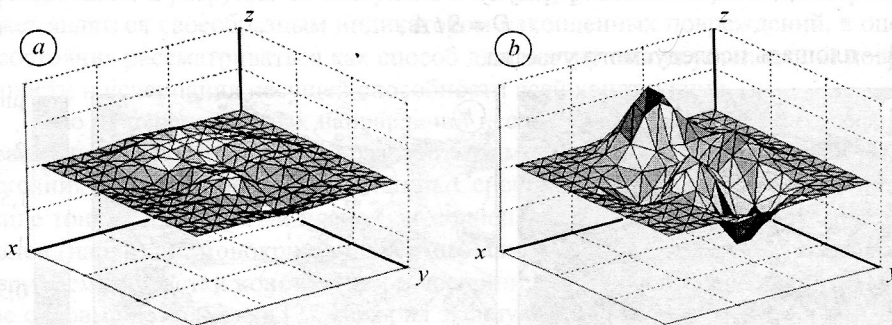


Рис. 3. Расчет площади поверхности в исходном состоянии  $A_0$  (а) и после наработки  $A_N$  (b).

Fig. 3. Surface area calculation in the initial state,  $A_0$ , (a) and after operating time cycles,  $A_N$ , (b).

**Результаты и их обсуждение. Насыщенность ДР.** Локальное микропластическое деформирование поверхности плакирующего слоя начинается с первых циклов нагружения. Выявлены три стадии изменения насыщенности ДР при циклическом нагружении: на начальном этапе наработки скорость изменения параметра  $D$  (1) относительно небольшая, затем увеличивается интенсивность накопления ДР с последующим уменьшением. Последний этап развития ДР – стабилизация насыщения поверхностного микропластического деформирования.

Для сопоставления результатов, полученных для пяти различных значений максимального напряжения в цикле (60 МПа; 80; 100; 130; 150), зависимости  $D$  от  $N$  привели к относительной наработке  $\bar{N} = N / N_f$ ; где  $N$  – текущее число циклов, а  $N_f$  – до появления на контролируемой площадке трещины длиной 0,5 мм.

Установлено, что изменение насыщенности ДР в зависимости от относительной наработки не зависит от действующих напряжений (рис. 4) и может быть описано степенной функцией

$$D = 0,3656 \bar{N}^{0,8} \quad (6)$$

Рис. 4. Зависимость насыщенности ДР от количества циклов нагружения до образования трещины для различных значений  $\sigma_{\max}$ :  $\circ$  – 60 МПа;  $\square$  – 80;  $\triangle$  – 100;  $\diamond$  – 130;  $\bullet$  – 150 МПа ( $R$  – коэффициент корреляции).

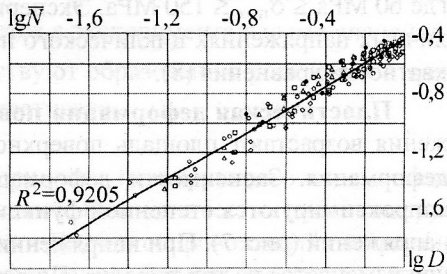


Fig. 4. Dependence of DR saturation on a number of cycles to the crack formation for different stresses,  $\sigma_{\max}$ :  $\circ$  – 60 МПа;  $\square$  – 80;  $\triangle$  – 100;  $\diamond$  – 130;  $\bullet$  – 150 МПа ( $R$  – correlation coefficient).

Зависимость (6) свидетельствует, что насыщенность ДР является обобщенной характеристикой долговечности сплава Д16АТ до образования трещины. Независимо от действующих напряжений трещина зарождается при постоянном предельном значении насыщенности ДР  $D^* \cong 0,366$  (при  $\bar{N} \rightarrow 1$ ), что подтверждает эффективность этой характеристики для прогнозирования долговечности сплава Д16АТ при усталости.

**Шероховатость.** При циклическом нагружении ДР развивается не только в плоскости, но и в направлении, нормальном к поверхности образца. Шероховатость возрастает с увеличением числа циклов нагружения на порядок. Зависимости относительного приращения шероховатости  $\Delta \bar{R}_a = \Delta R_a / R_{a0}$  от относительной наработки  $\bar{N}$  для различных значений напряжения в цикле, представленные в двойных логарифмических координатах, имеют вид прямых линий с приблизительно одинаковым углом наклона (рис. 5) и обобщаются функцией

$$\Delta \bar{R}_a = 7 \cdot 10^{-4} \sigma_{\max} (\sigma_{\max} - 34) \bar{N}^{0,9} \quad (7)$$

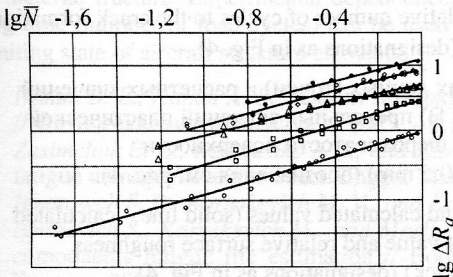


Рис. 5. Fig. 5.

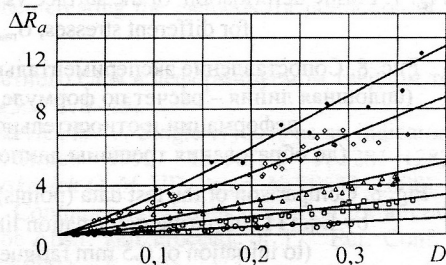


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 5. Зависимости приращения шероховатости поверхности от количества циклов нагружения до образования трещины для различных значений  $\sigma_{\max}$  (обозначения см. рис. 4).

Fig. 5. Roughness increment vs a relative number of cycles to the crack formation for different stresses,  $\sigma_{\max}$  (designations as in Fig. 4).

Рис. 6. Экспериментальные данные (точки) и рассчитанные по формуле (8) зависимости приращения шероховатости поверхности от насыщенности ДР при различных значениях  $\sigma_{\max}$  (обозначения см. рис. 4).

Fig. 6. Roughness parameter increment versus DR saturation for experimental data (points) and calculated by the formula (8) relations (lines) for different applied stresses,  $\sigma_{\max}$  (designations as in Fig. 4).

На основании эмпирических формул (6) и (7) получена зависимость, описы-

вающая развитие ДР на поверхности плакирующего слоя при циклическом нагружении в трех измерениях – на плоскости (параметр  $D$ ) и по нормали к поверхности (параметр  $\Delta\bar{R}_a$ ):

$$\Delta\bar{R}_a = 2,17 \cdot 10^{-3} \sigma_{\max} (\sigma_{\max} - 34) D^{1,125}, \quad (8)$$

где  $60 \text{ МПа} \leq \sigma_{\max} \leq 150 \text{ МПа}$ . Экспериментальные данные о развитии ДР при различных напряжениях циклического нагружения свидетельствуют (рис. 6) об адекватности уравнения (8).

**Пластическая деформация поверхности.** В процессе циклического нагружения возрастают площадь поверхности плакирующего слоя и ее необратимая деформация. Зависимости деформации  $\epsilon_a$  от количества циклов нагружения аппроксимируются степенной функцией и существенно зависят от действующих напряжений (рис. 7). При напряжении  $\sigma_{\max} = 60...150 \text{ МПа}$  пластическая деформация изменяется на три порядка. Полученные результаты обобщает зависимость

$$\epsilon_a = 1,67 \cdot 10^{-6} \sigma_{\max}^2 \bar{N}^{0,96}. \quad (9)$$

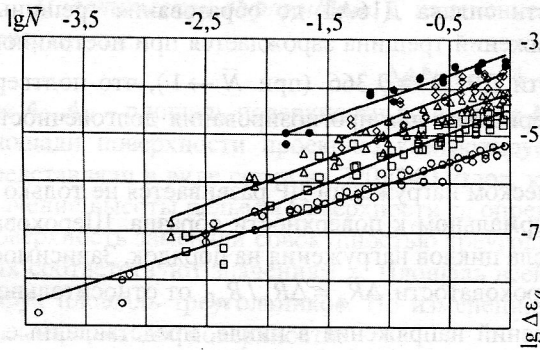


Рис. 7. Fig. 7.

Рис. 7. Зависимости пластической деформации поверхности от количества циклов нагружения для различных напряжений  $\sigma_{\max}$  (обозначения см. рис. 4).

Fig. 7. Plastic deformation of the surface vs relative number of cycles to the crack formation for different stresses,  $\sigma_{\max}$  (designations as in Fig. 4).

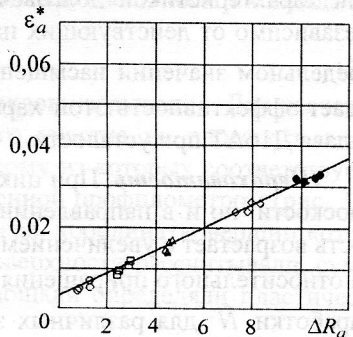


Рис. 8. Fig. 8.

Рис. 8. Сопоставление экспериментальных данных (точки) и расчетных значений (сплошная линия – расчет по формуле (11)) предельных значений пластической деформации и относительной шероховатости поверхности (до образования трещины длиной 0,5 мм) (обозначения см. рис. 4).

Fig. 8. Comparison of the test data (points) and calculated values (solid line – calculated by Eq. (11) of plastic deformation limit value and relative surface roughness (to initiation of 0.5 mm fatigue crack) (designations as in Fig. 4).

Исключив в выражениях (9) и (6) параметр  $\bar{N}$  и определив  $\sigma_{\max}$  из (8), получим обобщенную зависимость пластической деформации поверхности от параметров  $D$  и  $\Delta\bar{R}_a$ :

$$\epsilon_a = 1,614 \cdot 10^{-3} \left( 1 + \sqrt{1 + 1,6 \cdot \Delta\bar{R}_a D^{-1,125}} \right)^2 D^{1,2}. \quad (10)$$

Затем, подставив в формулу (10) значение предельной насыщенности ДР  $D^* \cong 0,366$ , следующее из формулы (6) при  $\bar{N} = 1$ , получим соотношение между критическими значениями параметров  $\epsilon_a^*$  и  $\Delta\bar{R}_a^*$  для момента образования усталостной трещины:

$$\epsilon_a^* = 4,825 \cdot 10^{-4} \left( 1 + \sqrt{1 + 4,963 \cdot \Delta\bar{R}_a^*} \right)^2. \quad (11)$$

Следует отметить, что зависимость (11) построена на основании обобщения и аппроксимации экспериментальных данных по изменению параметров  $\epsilon_a$ ,  $D$  и  $\Delta\bar{R}_a$  от циклической наработки, которые имеют естественный разброс значений.

Поэтому для данной зависимости условие  $\epsilon_a^* = 0$  при  $\Delta\bar{R}_a^* = 0$  не является определяющим. Зависимость (11) хорошо согласуется с экспериментальными значениями параметров  $\epsilon_a^*$  и  $\Delta\bar{R}_a^*$ , которые соответствуют образованию усталостной трещины (рис. 8), что свидетельствует о ее адекватности.

## ВЫВОДЫ

При циклическом нагружении на поверхности плакирующего слоя сплава Д16АТ формируется и развивается ДР. С увеличением количества циклов нагружения растет площадь поверхности со следами ДР, что сопровождается возрастанием ее шероховатости и пластической деформации. Зарождению усталостной трещины соответствует значение насыщенности ДР  $D^* \cong 0,366$ , которое не зависит от уровня приложенного напряжения. Момент образования усталостной трещины определяется также предельными значениями пластической деформации  $\epsilon_a^*$  и параметра шероховатости  $\Delta\bar{R}_a^*$  поверхности. Зависимость между этими предельными величинами ДР является инвариантной по отношению к максимально-му напряжению в цикле нагружения.

**РЕЗЮМЕ.** Показано, що під час циклічного навантажування на поверхні плакувального шару конструкційного алюмінієвого сплаву формується та розвивається деформаційний рельєф (ДР). Кількісні параметри ДР – насиченість, шорсткість та пластична деформація поверхні є індикаторами пошкодження матеріалу. Експериментальні залежності цих параметрів від напрацювання (кількості циклів навантаження) можна використати для створення методів прогнозування граничного стану елементів конструкції літака.

**SUMMARY.** It is shown that during cyclic loading the deformation relief (DR) is formed and develops on the cladding surface of aluminum alloy structure. Quantitative parameters of DR are the saturation, roughness and plastic deformation of the surface and they are indicators of material fracture. Experimental dependences of the considered parameters versus the operating time (number of load cycles) can be used when creating the methods for prediction of the limiting state of aircraft structure elements.

1. Панин В. Е., Панин А. В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2005. – 8, № 5. – С. 7–15.
2. Zasimchuk E. E., Radchenko A. I., and Karuskevich M. V. Single-crystals as an indicator of fatigue damage // Fatigue Fract. Enggn. Mater. Struct. – 1992. – 15, № 12. – P. 1281–1283.
3. Ignatovich S. R., Karuskevich M. V., and Karuskevich O. M. UR, Patent № 29683 (2008).
4. Ignatovich S., Karuskevich M., and Maslak T. Computer aided optical method for aircraft's components fatigue life estimation // Book of Abstr. and Proceed. of 17<sup>th</sup> Eur. Conf. on Fracture: 2008, Brno, Czech Republic (on CD ROM). – P. 2308–2313.
5. Estimation of the accumulated fatigue damage by saturation and fractal dimension of the deformation relief / M. V. Karuskevich, E. Yu. Korchuk, A. S. Yakushenko, and T. Maslak // Str. Mater. – 2008. – 40, № 6. – P. 693–698.
6. Еволюція деформаційного рельєфа плакированого слоя алюмінієвого сплава Д16АТ при усталості / С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, Т. П. Маслак, С. С. Юцкевич // Пр. Міжнар. НТК "Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування, 21–24 вересня 2009. – Тернопіль: Терноп. держ. техн. ун-т, 2009. – С. 47–53.
7. Деформаційний рельєф поверхності як показатель усталостної пошкодженості авіаційних сплавів на основі алюмінія / С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, Т. П. Маслак, С. С. Юцкевич // Сб. матеріалів Третій міжнарод. конф. "Деформація і руйнування матеріалів і наноматеріалів", Москва, 12–15 окт. 2009. – М.: Інтер-контакт. Наука, 2009. – Т. 1. – С. 53–54.
8. <http://www.nau.edu.ua/en/Science/GotoviRozrobky/MicronAlpha/>