

М.В.КАРУСКЕВИЧ

*Национальный авиационный университет, Украина*

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ИНДИКАЦИЯ ЕДИНИЧНЫХ ПЕРЕГРУЗОК НА СТАДИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

*Рассмотрен процесс распространения трещин в плакированном алюминиевом сплаве Д16АТ при циклическом нагружении и действии единичной перегрузки. Режим циклического нагружения при проведении экспериментов определен с учетом нагруженности несущих элементов авиационных конструкций. Установлено, что действие единичного цикла перегрузки оставляет в кончике трещины визуально идентифицируемый след в виде локализованной области деформационного рельефа поверхности, размер которой и насыщенность существенно превышают соответствующие характеристики рельефа, сформировавшегося вблизи трещины при регулярном циклическом нагружении и зависят от уровня перегрузки.*

**Ключевые слова:** обшивка самолета, плакированные сплавы, усталостные трещины, перегрузка, деформационный рельеф.

### Введение

Проектирование и эксплуатация самолета в соответствии с принципом допустимого повреждения возможны только на основе точного прогнозирования процесса распространения усталостных трещин. Одним из факторов, оказывающих влияние на скорость распространения трещин, является действие единичной перегрузки, т.е. цикла нагружения, амплитуда которого существенно отличается от регулярного многократно приложенного.

Понимание механизма влияния перегрузки на скорость распространения трещины способствует совершенствованию соответствующих расчетных методов.

Практическое значение имеет и количественная оценка перегрузок при анализе истории нагруженности конструкции воздушного судна. Большинство современных самолетов оснащено бортовыми системами регистрации параметров полета, позволяющих оценивать величину перегрузки конструкции. Однако, данные о перегрузках при этом являются интегральной характеристикой нагруженности конструкции и не дают возможности оценить локальную деформационную поврежденность, обусловленную перегрузкой и ее влияние на развитие усталостных трещин.

Как показано в работах [1-5], о поврежденности плакированных конструктивных алюминиевых сплавов можно судить по состоянию деформационного рельефа поверхности, формирующегося при усталости.

**Целью представленного в статье исследования** является экспериментальное обоснование

метода индикации и количественной оценки единичных перегрузок по параметрам деформационного рельефа поверхности в области распространения трещины.

### 1. Замедление усталостных трещин в результате действия однократной перегрузки

Практическая и научная значимость экспериментальных данных о влиянии перегрузки на развитие трещин усталости обусловили значительное количество соответствующих исследований.

Единичная перегрузка может оказать существенное влияние на скорость развития трещины [6]. Степень перегрузки  $q$  принято характеризовать отношением коэффициентов интенсивности:

$$q = \frac{K_{\max}^n}{K_{\max}}$$

где  $K_{\max}^n$  - коэффициент интенсивности при регулярном нагружении;  $K_{\max}$  - коэффициент интенсивности для цикла перегрузки.

На рис.1 показано изменение скорости распространения трещины в результате приложения однократной перегрузки, полученное при испытаниях алюминиевого сплава 2024-T3 [6].

Как видно из рис. 1, после приложения перегрузки скорость распространения трещины резко падает, достигая минимального значения после продвижения трещины на некоторую величину. В дальнейшем скорость вновь растет и в точке  $B$  выходит на новый уровень.

Влияние перегрузки связывают с формированием дополнительной пластической зоны и действием соответствующих остаточных напряжений сжатия со стороны упругодеформированного металла. После замедленного прохождения зоны действия остаточных напряжений сжатия скорость распространения трещины восстанавливается [7].

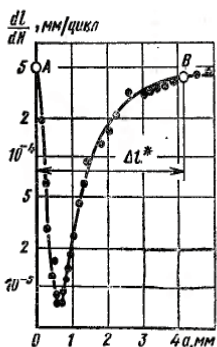


Рис. 1. Изменение скорости развития усталостной трещины в сплаве 2024-T3 после однократной перегрузки [6].

Перегрузки оказывают влияние на трещины усталости как при регулярном, так и при случайных спектрах циклических нагрузок [8,9].

Очевидно, что для оценки влияния перегрузки на процесс накопления повреждения и разрушения, необходимой является оценка фактической величины перегрузки.

Изменение режима нагружения и перегрузка оставляет след на изломе [10, 11] (рис.2), однако анализ истории нагруженности по поверхности разрушения может быть применен только по отношению к полностью разрушившейся детали конструкции.

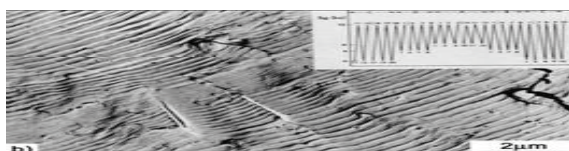


Рис. 2. Изменение расстояния между бороздками усталости и размера бороздок в соответствии с изменением режима нагружения [11]

Формирование деформационного рельефа на поверхности плакированных конструктивных алюминиевых сплавов дает возможность оценить размер пластической зоны в поверхностном слое.

Необходимо также отметить, что, несмотря на то, что доля несущей способности, определяемая слоем чистого алюминия невелика, роль его в формировании начального усталостного повреждения и разрушения — значительна. Это связано с двумя факторами: а) известным преимущественным повреждением поверхности

металла при циклическом нагружении [12]; б) зарождением усталостных трещин в плакирующем слое алюминиевых сплавов [13].

## 2. Деформационный рельеф в области усталостной трещины

Исследования деформационного рельефа, формирующегося на поверхности плакирующего слоя конструктивных алюминиевых сплавов, проводимые в Национальном авиационном университете [1-5 и др.] показывают, что параметры деформационного рельефа позволяют судить о накопленном усталостном повреждении. Деформационный рельеф формируется у концентраторов напряжений: отверстий, клеесварных точек, трещин.

В современных моделях эффекта замедления трещин, ключевую роль играет величина пластической зоны в кончике трещины. Величина пластической зоны в большинстве случаев определяется аналитически. Для плакированных материалов пластическая зона плакирующего слоя может быть определена визуально-оптическим способом. Признаком пластической зоны в этом случае является наличие деформационного рельефа (рис.3).

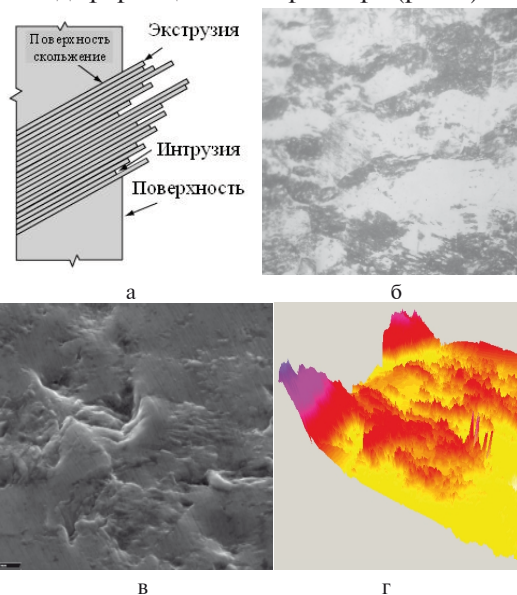


Рис.3. Деформационный рельеф поверхности плакирующего слоя сплава D16AT:

а - схема; б - оптическое изображение, 350 $\times$ ;  
в - электронно-микроскопическое изображение, 1620 $\times$ ;  
г - изображение, полученное с помощью бесконтактного профилметра.

В работах [1-5] был предложен ряд количественных параметров деформационного рельефа, среди которых наиболее эффективным в задачах оценки накопленного усталостного повреждения является так называемый параметр повреждения, определяемый по цифровым изображениям деформационного рельефа поверхности, полученным с помощью

оптического микроскопа при увеличении 150<sup>x</sup>-300<sup>x</sup>. Параметр повреждения  $D$  характеризует насыщенность деформационного рельефа. В проведенных ранее экспериментах предельное значение параметра повреждения  $D$ , соответствующее моменту появления трещины, не превышает 0,5-0,6.

Параметр  $D$  монотонно изменяется в процессе циклического нагружения (рис. 4) в соответствии с накопленным усталостным повреждением, что и определило возможность его использования в качестве показателя усталости элементов конструкций, изготовленных из плакированных алюминиевых сплавов.

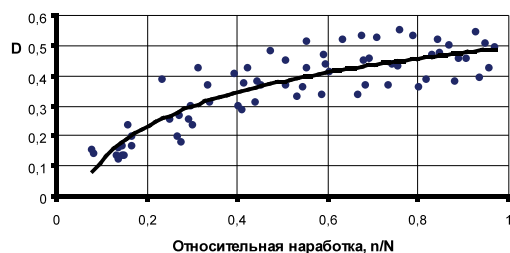


Рис. 4. Эволюция насыщенности деформационного рельефа в процессе циклического нагружения

Поврежденность у концентратора напряжений - отверстия оказывает влияние на процесс развития усталостной трещины. В то же время, на старт усталостной трещины оказывает влияние не только накопленное деформационное повреждение поверхностного слоя, но и наличие дефектов как на поверхности, так и во внутренней структуре. Концентратором напряжения, активирующим старт трещины может быть, как показано на рис. 5, участок, содержащий окись алюминия и локальный концентратор — ослабленные границы зерен. Усталостные трещины формируются также у дефектов поверхности — царапин, заусениц у концентраторов напряжений.

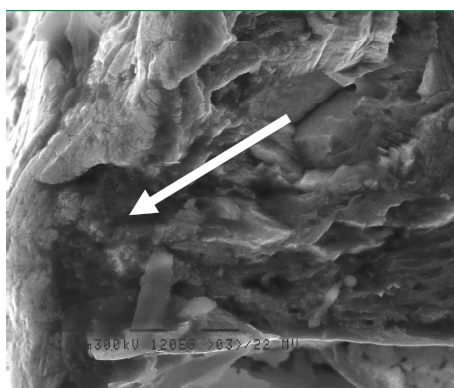


Рис. 5. Очаг зарождения трещины - участок, содержащий окись алюминия и локальный концентратор — ослабленные границы зерен

В представленном исследовании насыщенность рельефа анализировалась вблизи усталостной трещины при регулярном циклическом нагружении и при действии единичной перегрузки.

На рис. 6 показан образец алюминиевого сплава Д16АТ, при испытаниях которого выполнялся анализ деформационного рельефа в кончике трещины и мониторинг трещины, а на рис. 7 - участок трещины усталости.

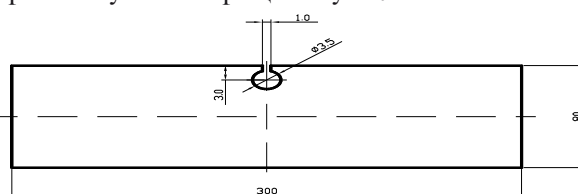


Рис. 6. Образец для усталостных испытаний

Испытания проводились при максимальном напряжении регулярного цикла нагружения 100,0 МПа и коэффициенте асимметрии  $R = 0$ .

При регулярном циклическом нагружении деформационный рельеф формируется в кончике трещины и может выявляться оптическим методом на расстоянии до 1,5 мм от берегов трещины.

Единичный цикл перегрузки (максимальное напряжение 220 МПа), приложенный после 280000 циклов нагружения при длине трещины 4,4 мм, оставил след в виде рельефа, повышенная интенсивность которого позволяет идентифицировать перегрузку. Область развитого рельефа наблюдалась при этом на расстоянии до 5,5 мм.

Кроме того, следует отметить, что результатом статической перегрузки является визуально наблюдаемая ротация кристаллитов.

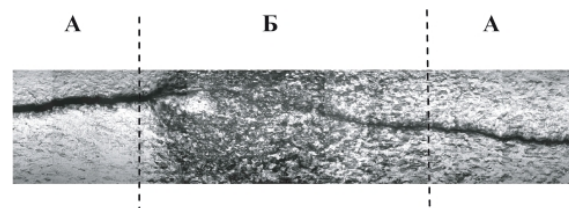


Рис. 7. Усталостная трещина в образце сплава Д16АТ и деформационный рельеф, сформировавшийся при циклическом нагружении (область А) и при единичной перегрузке (область Б).

Единичная перегрузка вызвала остановку и замедленный рост трещины (рис. 8).

При пересечении трещиной границ области насыщенного рельефа, сформировавшегося в результате перегрузки, скорость трещины стремительно возрастает.

Насыщенность рельефа, сформировавшегося в результате циклического нагружения и

после единичной статической перегрузки оценивалась по значению параметра повреждения  $D$ . Значение параметра повреждения вблизи трещины до приложения перегрузки не превышало 0,1, в то время как после одного цикла перегрузки достигало 0,75.

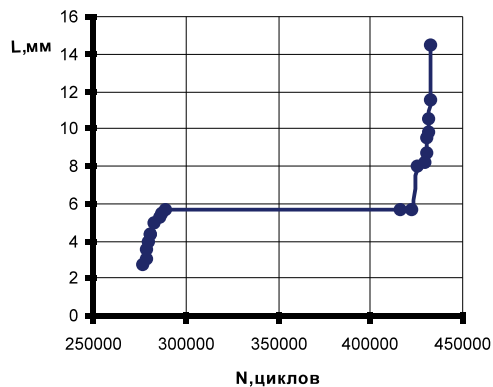


Рис. 8. Рост усталостной трещины до (область А) и после (область Б) единичной перегрузки

### Заключение

Формирование деформационного рельефа поверхности плакированных алюминиевых сплавов на стадии распространения трещины позволяет выявлять наличие единичной перегрузки в спектре действующих циклически повторяющихся нагрузок. Показателями единичной перегрузки являются размер зоны интенсивного деформационного рельефа и его насыщенность.

Дальнейшие исследования должны включать установление количественной связи между уровнем перегрузки и характеристиками деформационного рельефа, адаптацию полученных закономерностей для прогнозирования процесса распространения трещин в элементах реальных авиационных конструкций, исследование действия перегрузок на различных стадиях распространения трещин.

### Литература

1. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа [Текст] / М.В. Карускевич, Е.Ю. Корчук, Т.П. Маслак [та ін.] // Проблемы прочности. – 2008. – №6 (396). – С.128–135.
2. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage [text] / M. Karuskevich, O. Karuskevich, T. Maslak, S. Schepak // International Journal of Fatigue. – 2012. – № 39. – P.116–121.
3. Karuskevich M.V. Fatigue life prediction by the structurally sensitive damage indicator [text]

/ M.V. Karuskevich // Proceeding of NAU. – 2012. – № 1. – P.139–143.

4. Пат. 3470 Україна, МПК G 01 N3/32. Спосіб визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за станом деформаційного рельєфу поверхні плакуючого шару / Ігнатович С.Р., Карускевич М.В., Карускевич О.М.; Заявник та патентовласник Націон. авіац. ун-т. – № 2004031792; заявл. 11.03.04; опубл. 15.11.04, Бюл. № 11.
5. Пат. 29683 Україна, МПК G 01 N3/32. Спосіб прогнозування залишкової довговічності елементів авіаційної конструкції по насиченості і фрактальній розмірності деформаційного рельєфу / Ігнатович С.Р., Карускевич М.В., Маслак Т.П., Пантелеев В.М., Якушенко О.С.; Заявник та патентовласник Націон. авіац. ун-т. – № 200709909; заявл. 04.09.07; опубл. 25.01.08, Бюл. №2.
6. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность [Текст]: справ./В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
7. Броек Д. Основы механики разрушения [Текст]: пер. с англ./ Д.Броек. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
8. Никонов В.В. Расчетно-экспериментальная оценка циклической трещиностойкости при эксплуатационных режимах нагружения [Текст] / В.В. Никонов, В.С. Стреляев. – М.: Машиностроение, 1991. – 64 с.
9. Schijve J. Effect of load sequences on crack propagation under random and program loading [text] / J. Schijve // Eng. Fract. Mech. 1973, Vol. 5. – P. 269-280.
10. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение [Текст] / В.С. Иванова, А.А. Шанявский. – Челябинск.: Металлургия, 1988. – 400 с.
11. McMillan J.C. Fatigue Crack Propagation under Programmed and Random Loads [text] / J.C. McMillan, R.M.N. Pelloux // Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 1967, Vol. 415. – P. 505-535.
12. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов [Текст] / В.П. Алехин. – М.: Наука, 1983. – 230 с.
13. Панков А.Т. Влияние плакирующего слоя на характеристики прочности конструктивных алюминиевых сплавов и эффективности их антикоррозионной защиты: автореф. дис. канд. техн. наук: / Панков А.Т.; – К., 1995. – 23 с.

Поступила в редакцию 01.06.2013

**М.В. Карускевич. Инструментальна індикація одиничних перевантажень на стадії розповсюдження втомної тріщини**

*Розглянуто процес розповсюдження тріщин в плакованому алюмінієвому сплаві Д16АТ при циклічному навантажуванні та дії одиничного перевантаження. Режим циклічного навантажування при проведенні експериментів визначено з урахуванням навантажувальності елементів авіаційних конструкцій. Встановлено, що дія одиничного циклу перевантаження залишає в кінчику тріщини слід у вигляді області деформаційного рельєфу поверхні, розмір якої і насиченість суттєво перевищують відповідні характеристики рельєфу, які сформовані поблизу тріщини при регулярному циклічному навантажуванні і залежать від рівня перевантаження.*

**Ключові слова:** обшивка літака, плаковані сплави, втомні тріщини, перевантаження, деформаційний рельєф.

**M.V. Karuskevich. Instrumental indication of single overloads at the stage of the fatigue crack propagation**

*The process of fatigue cracks propagation in alclad aluminium alloy D16AT under cyclical loading and single overload is considered. The regime of cyclical loading in the conducted experiments has been selected with respect to the loading conditions of aircraft bearing components. It was found that the action of single cycle of the overload leaves at the tip of the crack the visually identified marks. This mark is a spot of the deformation relief. The area and intensity of the deformation relief spot sufficiently exceeds the correspondent characteristics of the relief, formed under regular cyclical loading and depends on the overload level.*

**Key words:** aircraft skin, alclad alloys, fatigue cracks, overloads, deformation relief.