

УДК 620.179.1

DOI: 10.18372/0370-2197.2(83).13692

*М. В. КАРУСКЕВИЧ, Е. Ю. КОРЧУК, С. В. ЩЕПАК**Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

## **ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН**

*Выполнен анализ зависимости скорости распространения усталостной трещины от поврежденности в области ее формирования. В результате усталостных испытаний образцов из конструкционного плакированного алюминиевого сплава Д16АТ установлена связь между насыщенностью деформационного рельефа у концентратора напряжений и процессом развития трещины. Электронно-микроскопические исследования позволили выявить границы участка поверхности с деформационным рельефом на стадии формирования трещины, что было подтверждено аналитическим распределением напряжений вблизи концентратора.*

**Ключевые слова:** *усталостная трещина, деформационный рельеф, параметр поврежденности, инкубационная стадия, скорость распространения трещины.*

**Введение.** Усталостные трещины возникают в элементах крыла, фюзеляжа, оперения и других ответственных частях конструкции самолета [1]. Анализ процесса разрушения в настоящее время выполняется главным образом на основе механики разрушения. Механика разрушения позволяет [2] прогнозировать остаточную долговечность, как функцию длины трещины, прогнозировать длину трещины, которая может быть допустимой по критериям прочности конструкции, прогнозировать продолжительность распространения трещины от начальной длины до критической.

Внедрение в авиации принципа допустимого повреждения предполагает знание закономерностей развития дефектов, в том числе трещин, возможность надежного прогнозирования достижения критического состояния.

Стадии развития трещины предшествует накопление повреждений, сопровождающееся эволюцией ряда физико-механических характеристик. Проводимые в настоящее время исследования процессов накопления повреждений и разрушения привели к обоснованию новых критериев. Экспериментально доказано, что деформационный рельеф поверхности плакирующего слоя, формирующийся под действием циклически повторяющихся нагрузок, является индикатором накопленного усталостного повреждения. Исследование деформационного рельефа поверхности плакирующего слоя конструкционных алюминиевых сплавов Д16АТ, В95, 2024Т3, 7075Т6 методами оптической микроскопии, электронной сканирующей и трансмиссионной микроскопии, бесконтактной интерференционной профилометрии, проведенные в Национальном авиационном университете (НАУ), доказали возможность количественной оценки накопленного усталостного повреждения по деформационному рельефу поверхности [3-8]. Эффективность предложенного показателя усталостной поврежденности доказана многочисленными исследованиями, завершившимися разработкой методологии определения выработки ресурса летательных аппаратов по параметрам деформационного рельефа поверхности конструктивных элементов и образцов-свидетелей [9].

Усталостная трещина формируется в зоне концентрации напряжений, например отверстия под заклепку. На время и место формирования трещины оказывает влияние ряд факторов, в том числе случайных. При этом, локальное усталостное повреждение, накопленное к моменту начала распространения трещины, может быть различным. В связи с этим, перспективным является исследование связи между локальным усталостным повреждением, накопленным на инкубационной стадии усталости, и процессом распространения трещины.

**Методика исследования.** Для установления связи между локальным усталостным повреждением, накопленным на инкубационной стадии усталости, и процессом распространения трещины использовались результаты мониторинга поврежденности у концентратора напряжений и мониторинга трещин в образцах алюминиевого сплава Д16АТ. Следует отметить, что исследования эволюции деформационного рельефа, проведенные в НАУ, указывают на возможность мониторинга деформационного рельефа также на поверхности конструкционных сплавов В95, 2024Т3, 7075Т6.

Геометрия образцов для усталостных испытаний показана на рис. 1.

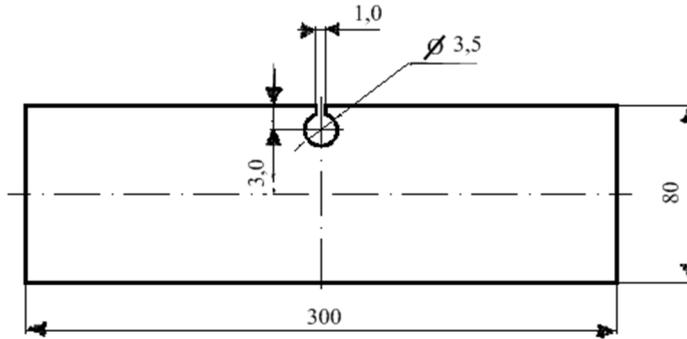


Рис. 1. Образец для мониторинга локальной поврежденности и трещины.

В качестве количественной характеристики накопленного усталостного повреждения использовался параметр насыщенности деформационного рельефа – параметр повреждения, определяемый по цифровым фотографиям деформационного рельефа, полученным с применением оптического микроскопа увеличением  $250\times$ . Фотографии поверхности циклически деформированных образцов обрабатываются с помощью вычислительной программы, что обеспечивает автоматизированное определение параметра повреждения, как числового значения относительной площади поверхности со следами деформации в зоне контроля.

Для определения размеров зоны локализации повреждения у концентратора напряжений и соответствующих распределений напряжений и деформаций использовались возможности метода конечных элементов, который позволил учесть особенность плакированного алюминиевого сплава Д16АТ, а именно, совместную работу материалов с различными физико-механическими свойствами: а) алюминиевого плакирующего слоя; б) сплава системы Al-Cu-Mg. Сканирующая электронная микроскопия позволила исследовать поверхности разрушения и морфологию деформационного рельефа, установить влияние уровня циклических напряжений на размер зоны интенсивного развития деформационного рельефа поверхности.

**Результаты исследования и их анализ.** Известно, что скорость распространения трещины увеличивается с увеличением ее длины. Таким образом, начальная стадия является наиболее продолжительной. В тоже время, именно начальная стадия проходит на фоне сформировавшегося на инкубационной стадии деформационного рельефа и соответствующей локальной поврежденности. После появления трещины насыщенность деформационного рельефа в контролируемой зоне не изменяется, таким образом, параметр повреждения достигает максимального (критического) значения. Для установления связи между накопленной локальной усталостной поврежденностью и скоростью развития трещины необходимым является определение размеров области, определяющей скорость развития трещины усталости на начальном этапе ее развития. В ходе электронно-микроскопических исследований было определено, что при рассматриваемых режимах нагружения на стадии формирования трещины деформационный рельеф проявляется и может быть количественно оценен на участке, длина которого не превышает 4,0 мм (рис.2).

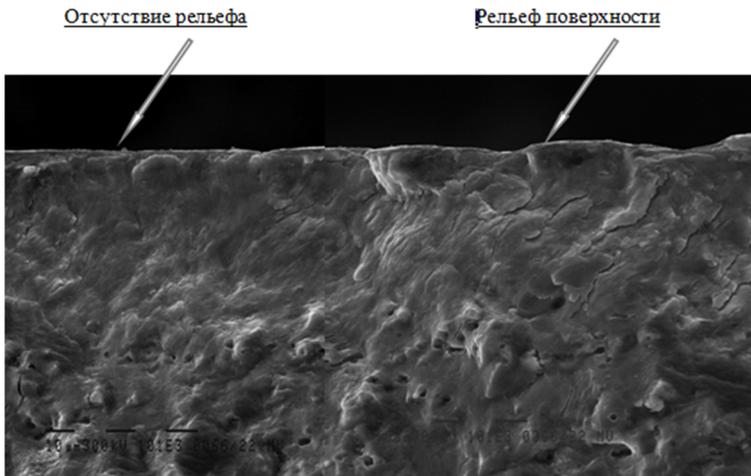


Рис.2. Поверхность разрушения образца на расстоянии 4 мм от концентратора

Это нашло подтверждение и при аналитическом определении распределения напряжений вблизи концентратора (рис.3).

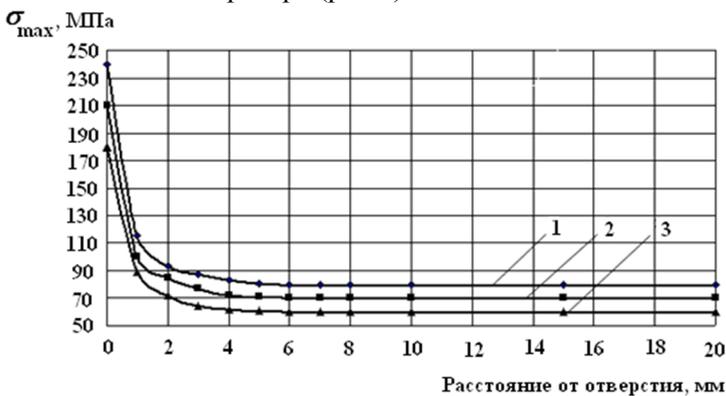


Рис.3. Распределение напряжений вблизи концентратора: 1 – при  $\sigma_{\max} = 80,0$  МПа;

2 – при  $\sigma_{\max} = 70,0$  МПа; 3 – при  $\sigma_{\max} = 60,0$  МПа

При выполнении мониторинга распространения трещин были рассмотрены следующие интервалы длин трещин:

- 1-й интервал – от 0 до 4,0мм;
- 2-й интервал – от 4,0 до 8,0мм;
- 3-й интервал – от 8,0 до 12,0мм;
- 4-й интервал – от 12,0 до 16,0 мм.

И определена связь скорости трещин на различных расстояниях от отверстий с критическими значениями параметра повреждения вблизи концентратора. Для примера приведена зависимость скорости распространения усталостной трещины от параметра повреждения на 1-ом интервале для трещины длиной до 4 мм (рис. 4).

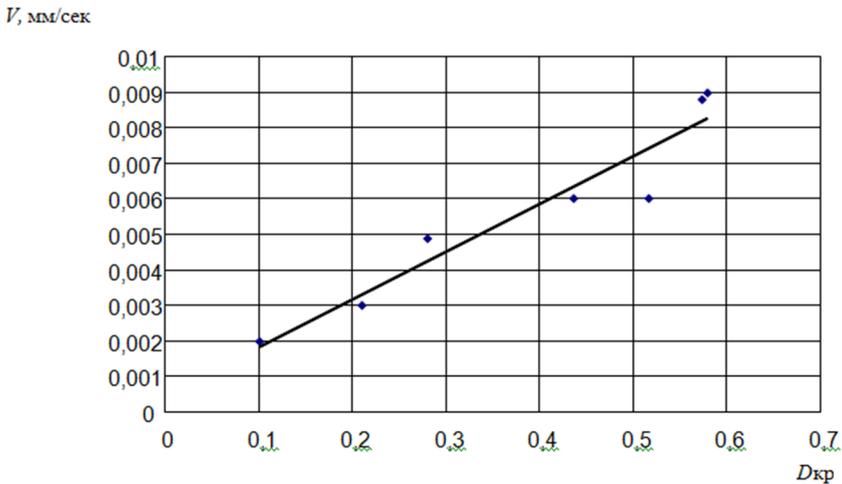


Рис. 4. Зависимость скорости распространения усталостной трещины от критического параметра повреждения  $D_{кр}$  для трещин длиной до 4,0 мм

Как показал регрессионный и корреляционный анализ, связь между скоростью распространения трещины и критическим параметром повреждения  $D_{кр}$  целесообразно описывать линейными зависимостями вида  $V = a + b \cdot D$ .

Приведенные в табл. 1 данные указывают на то, что прогнозирование скорости распространения трещины является наиболее точным на ее начальном этапе.

Таблица 1

Значения коэффициентов детерминации

| Интервал длин трещин, мм.       | 0-4,0; | 4,0-8,0; | 8,0-12,0; | 12,0-16,0; |
|---------------------------------|--------|----------|-----------|------------|
| Коэффициент детерминации, $R^2$ | 0,915  | 0,8627   | 0,7339    | 0,5995     |

**Выводы.** В результате проведенных испытаний установлено наличие тесной корреляционной связи между насыщенностью деформационного рельефа на стадии формирования усталостной трещины со скоростью ее распространения в гладких образцах сплава Д16АТ. Наиболее точное прогнозированием скорости распространения усталостной трещины выполняется на ее начальной стадии. В то же время, именно этот этап составляет большую часть продолжительности стадии распространения трещины. Это позволяет прогнозировать общую про-

должителность стадии распространения трещины по параметрам рельефа вблизи концентратора напряжений, который сформировался к моменту возникновения трещины.

### Список литературы

1. *Басов В.Н.* Типизированная программа нагружения крыла тяжелого транспортного самолета / В.Н.Басов, Г.И.Несторенко, Г.И.Стрижиус // Труды ЦАГИ. Выпуск 2642. – 2001. – С.26–34.
2. *Брок Д.* Основы механики разрушения / Д. Брок – М.: Высшая школа, 1980–368 с.
3. Пат. 3470 Україна, МПК G 01 N 3/32. 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 Національний авіаційний університет. – № 2004031792; заявл. 11.03.04; опубл. 15.11.04, Бюл. № 11.
4. *Карускевич М.В.* Неруйнівний контроль втомного пошкодження алюмінієвих конструкційних сплавів / М.В.Карускевич, А.М.Овсянкін, Т.П.Маслак, С.В.Щепак // Теорія і практика неруйнівного контролю металів і конструкцій. Львів.Збірник наукових праць. – 2008–Випуск 13. – С.266-271.
5. *Карускевич М.В.* Оцінка довговічності плакованих алюмінієвих сплавів при асиметричному циклічному навантаженні / М.В.Карускевич, А.Д.Погребняк, Т.П.Маслак, С.В.Щепак // Вісник Національного авіаційного університету. – 2009. - № 2. – С. 52-56.
6. *Karuskevich M.* Non destructive optical method under full-scale aircraft testing as a method of fatigue life prediction / M.Karuskevich, T.Maslak, S.Shchepak // Aviation in the XXI-st Century” [«Safety in Aviation and Space Technologies»]- 2010: the 4 world congress, 21-23 September 2010. – К., 2010. - P.13.21-13.24.
7. *Karuskevich M.* Extrusion / intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage / M.Karuskevich, O.Karuskevich, S.Shchepak // XV-ICMFM – 2010: XV intern. colloquium “Mechanical Fatigue of Metals”, 13-15 September 2010.: abstract. – Opole, Poland, 2010.– P. 27.
8. *Карускевич М.В.* Вимоги до діагностичних параметрів при неруйнівному контролі втомних елементів авіаційних конструкцій / М.В.Карускевич, О.Ю.Корчук, С.В.Щепак, А.А.Капустинський // Вісник Національного авіаційного університету. – 2011. – № 2. – С. 110–114.
9. *Карускевич М.В.* Методологія визначення відпрацювання ресурсу літальних апаратів за параметрами деформаційного рельєфу поверхні конструктивних елементів: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук / Карускевич Михайло Віталійович. – Київ–2012.– 305 с.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2019.

**Карускевич Михайло Віталійович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри конструкції літальних апаратів аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету.

**Корчук Олена Юрївна** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри філологічних та природничих дисциплін Інституту міжнародного співробітництва та освіти Національного авіаційного університету, 2802korchuk@ukr.net.

**Щепак Сергій Вікторович** – канд. техн. наук, доцент кафедри конструкції літальних апаратів аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету.

*M. V. KARUSKEVICH, O.Yu. KORCHUK, S.V. SHCHEPAK*

## INFLUENCE OF LOCAL FATIGUE DAMAGE ON THE FATIGUE CRACK PROPAGATION RATE

Implementation of Damage Tolerance concept requires knowledge of the damages evolution regularities. Before the crack starts propagation the nucleation stage occurs, accompanied by the evolution of some physical and mechanical properties. It was proved early by the set of experiments that deformation relief emerged as a result of cyclical loading can be considered as a quantitative indicator of the accumulated fatigue damage. To the constructional material exhibiting emerging and development of deformation relief could be referred well known aluminium alloys D16AT, V95, 2024T3, 7075T6. The deformation relief on the surface of mentioned materials has been studied by the methods of light microscopy, electron scan microscopy, profilometry, etc. Fatigue crack nucleates at the area of the increased stresses, for example close to the hole for rivet. The moment of a crack emerging is influenced by the different factors mostly accidental. The local fatigue damage at the moment of crack emerging can be different. In this connection the relation of fatigue crack propagation rate and local accumulated damage has been studied. As a quantitative characteristic of the accumulated fatigue damage the parameter of the deformation relief intensity has been used. This parameter is calculated as a ratio of the surface area with signs of micro plastic deformation to the total observed by light microscope area. The area of controlled surface was equal to the area of circle with diameter 0.3 mm. As a result of fatigue tests the close correlation was found between the intensity of deformation relief and fatigue crack propagation rate. This correlation is most strong for the initial stage of fracture, which has the biggest duration. Thus, it can be concluded that the local fatigue damage accumulated at the stage of crack nucleation affects further crack propagation.

**Key words:** fatigue crack, deformation relief, damage parameter, crack nucleation stage, fatigue crack propagation rate.

### References

1. Basov V.N. Tipizirovannaja programma nagruzenija kryla tjazhelogo transportnogo samoleta / V.N.Basov, G.I.Nestorenko, G.I.Strizhius // Trudy CAGI. Vypusk 2642. –2001.–S.26–34.
2. Broek D. Osnovy mehaniki razrushenija / D. Broek– M.: Vysshaja shkola, 1980–368 s.
3. Pat. 3470 Ukrayina, MPK G 01 N 3/32. Sposib vy'znachennya zaly'shkovogo resursu elementiv konstrukcij za stanom deformacijnogo rel'yefu poverxni plakuyuchogo sharu / Ignatovy'ch S. R., Karuskevych M. V., Karuskevych O. M.; zayavny'k ta patentovlasny'k Nacional'ny'j aviacijny'j universytet. – # 2004031792; zayavl. 11.03.04; opubl. 15.11.04, Byul. # 11.
4. Karuskevych M.V. Nerujnivny'j kontrol' vtomnogo poshkodzhennya alyuminiyevy'x konstrukcijny'x splaviv / M.V.Karuskevych, A.M.Ovsyankin, T.P.Maslak, S.V.Shchepak // Teoriya i prakty'ka nerujnivnogo kontrolyu metaliv i konstrukcij. L'viv.Zbirny'k naukovy'x prac' . – 2008–Vypusk 13.– S.266-271.
5. Karuskevych M.V. Ocinka dovgovichnosti plakovany'x alyuminiyevy'x splaviv pry' asy'metry'chnomu cy'klichnomu navantazhenni / M.V.Karuskevych, A.D.Pogrebnyak, T.P.Maslak, S.V.Shchepak // Visny'k Nacional'nogo aviacijnogo universytetu. – 2009. - # 2. – S. 52-56.
6. Karuskevich M. Non destructive optical method under full-scale aircraft testing as a method of fatigue life prediction / M.Karuskevich, T.Maslak, S.Shchepak // Aviation in the XXI-st Century” [«Safety in Aviation and Space Technologies»]- 2010: the 4 world congress, 21-23 September 2010. – K., 2010. - P.13.21-13.24.
7. Karuskevich M. Extrusion / intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage / M.Karuskevich, O.Karuskevich, S.Shchepak // XV-ICMFM – 2010: XV intern. colloquium “Mechanical Fatigue of Metals”, 13-15 September 2010.: abstract. – Opole, Poland, 2010.– P. 27.

8. Karuskevych M.V. Vy'mogy` do diagnosty`chny`x parametriv pry` nerujnivnomu kontroli vtomy` ele-mentiv aviacijny`x konstrukcij / M.VKaruskevych, O.Yu.Korchuk, S.V.Shhepak A.A.Kapusty`ns`ky`j // Visny`k Nacional`nogo aviacijnogo universy`tetu. – 2011. – # 2. – S. 110 – 114.

9. Karuskevych M.V. Metodologiya vy`znachennya vidpracyuvannya resursu lital`ny`x aparativ za parametry` deformacijnogo rel`yefu poverxni konstruktivny`x elementiv: dy`sertaciya na zdobuttya naukovogo stupenya doktora texnichny`x nauk / Karuskevych My`-xajlo Vitalijovy`ch. – Ky`yiv–2012.– 305 s.

*M. B. КАРУСКЕВИЧ, О. Ю. КОРЧУК, С. В. ЦЕПАК*

### **ВПЛИВ ЛОКАЛЬНОЇ ВТОМНОЇ ПОШКОДЖУВАНОСТІ НА ШВИДКІСТЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИН**

Впровадження в авіації принципу допустимого пошкодження передбачає знання закономірностей розвитку дефектів, в тому числі втомних тріщин.

Стадії розвитку тріщини передують накопичення пошкоджень, яке супроводжується еволюцією ряду фізико-механічних характеристик. Експериментально доведено, що деформаційний рельєф поверхні, що формується в результаті дії циклічного навантажування, може розглядатися як кількісний показник накопиченого втомного пошкодження. До конструкційних сплавів, які демонструють формування та розвиток деформаційного рельєфу, відносяться відомі алюмінієві сплави Д16АТ, В95, 2024Т3, 7075Т6. Деформаційний рельєф на поверхні зазначених матеріалів досліджувався методами оптичної та сканувальної мікроскопії, профілометрії, та іншими сучасними методами дослідження фізико-механічних характеристик металів. Втомна тріщина формується в зоні концентрації напружень, наприклад біля отвору під заклепку. На час виникнення тріщини впливають різні фактори, в тому числі випадкові. При цьому, локальне втомне пошкодження в зоні формування тріщини може бути різним. У зв'язку з цим досліджується зв'язок швидкості розповсюдження тріщини з рівнем локального втомного пошкодження. В якості кількісної характеристики накопиченого втомного пошкодження використовується параметр насиченості деформаційного рельєфу, який обчислюється як відношення площі поверхні з ознаками мікропластичної деформації до загальної площі поверхні, що контролюється за допомогою оптичного мікроскопу. Ділянка спостереження не перевищує площу кола діаметром 0.3 мм. У результаті проведення втомних випробувань було встановлено тісний кореляційний зв'язок між насиченістю деформаційного рельєфу поблизу концентратора напружень та швидкістю її розповсюдження. Цей зв'язок найбільш вагомий на початковій стадії руйнування, яка є найбільш тривалою. Таким чином, локальна пошкоджуваність, накопичена на стадії формування втомної тріщини, визначає її подальше розповсюдження.

**Ключові слова:** втомна тріщина, деформаційний рельєф, параметр пошкодження, інкубаційна стадія, швидкість розповсюдження тріщини.