

УДК 620.179.1

**М. Карускевич, канд. техн. наук**

*Національний авіаційний університет, Київ, Україна*

## **ФОЛЬГОВЫЙ СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СЕНСОР УСТАЛОСТИ**

**Резюме.** Показано возможность мониторинга усталостного повреждения с помощью фольговых структурно-чувствительных сенсоров. Основным диагностическим параметром является параметр повреждения, который определяется по насыщенности деформационного рельефа поверхности сенсора. Компьютеризированный оптический неразрушающийся метод разработан для контроля авиационных конструкций, однако он может быть использован и для мониторинга деформационного повреждения кораблей, мостов, механизмов и машин, которые работают в условиях действия циклически повторяющихся нагрузок.

**Ключевые слова:** авиационные конструкции, Structural Health Monitoring Systems, усталость, структурно-чувствительный сенсор, деформационный рельеф.

**M. Karuskevich**

## **FOIL STRUCTURALLY SENSITIVE FATIGUE INDICATOR**

**The summary.** The possibility to monitor fatigue damage by the foil structurally sensitive indicators is shown. The damage parameter estimated as an intensity of the sensor surface deformation relief is considered as a main diagnostic parameter. Proposed computer aided optical non destructive method is developed for the inspections of the aviation structures, but can be used for the monitoring of the fatigue damage of ships, bridges, mechanisms and machines subjected to the action of the repeated loads.

**Key words:** aircraft structures, Structural Health Monitoring Systems, fatigue, structurally sensitive indicator, deformation relief.

**Введение.** Разнообразие нагрузок, действующих на самолет в полете и на земле, особенности нагружения различных элементов конструкции, спектр применяемых конструкционных материалов определяют необходимость создания комплекса методов оценки накопленного усталостного повреждения.

Наиболее перспективными представляются методы, основанные на регистрации непосредственных признаков процесса накопления повреждения. К таким признакам на микроскопическом уровне относится формирование и эволюция дислокационной структуры, на мезоскопическом уровне – появление и развитие деформационного рельефа, на макроскопическом уровне – распространение трещин усталости.

Многочисленные исследования деформационного рельефа, формирующегося на поверхности монокристаллического и поликристаллического алюминия показали, что его изменение может быть оценено качественно и количественно применением компьютеризированного оптического метода неразрушающего контроля.

Для элементов конструкции, изготовленных из плакированных алюминием сплавов это открывает возможность непосредственной диагностики конструкции оценки ее поврежденности.

В случаях, когда на поверхности конструкционного материала деформационный рельеф не формируется или масштабный уровень дефектной структуры поверхности не позволяет применять оптический метод контроля, предполагается установка структурно-чувствительных сенсоров усталости, состояние поверхности которых изменяется в соответствии с накопленным повреждением.

В представленной статье рассматривается возможность применения фольговых сенсоров усталости, изготовленных из поликристаллического алюминия.

**Материал, размеры, способ крепления сенсора.** Ранее [1–3] была показана возможность изготовления сенсоров усталости из монокристаллов алюминия, выращенных в соответствии с методом Бриджмена. Сложность процесса изготовления и, как следствие, высокая стоимость таких сенсоров привели к поиску альтернативных вариантов. Материалом, позволяющим изготовить структурно-чувствительный сенсор усталости? может быть технический алюминий АД-1 [4], основные характеристики которого приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Химический состав сплава АД-1, в % [4]

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примеси
до 0,3	до 0,3	до 0,025	до 0,15	min 99,3	до 0.05	до 0,05	до 0,1	Всего 0,7

Таблица 2. Механические свойства сплава АД-1 при  $T=20^{\circ}\text{C}$  [4]

Состояние	Предел прочности	Предел пропорциональности	Относительное удлинение при разрыве	Относительное сужение при разрыве
-	МПа	МПа	%	%
После отжига	70	30	36	89

Толщина фольги до обработки составляла 0,2 мм. Размер сенсора после подготовки поверхности к оптическому контролю 20,0 x 10,0 x 0,15 мм. Уменьшение толщины с 0,2 мм в заготовке до 0,15 мм в сенсоре обусловлено его полированием.

С целью снятия внутренних напряжений в заготовках сенсоров производится их предварительный отжиг. Температура отжига в представленных экспериментах составляла 500°C. Продолжительность выдержки при заданной температуре 2 часа. Термообработка привела к росту зерна с 0,05 мм до 0.5 мм.

Необходимое для оптического анализа деформационного рельефа качество поверхности сенсора достигается последовательным применением предварительного механического и электролитического полирования.

Механическое полирование выполнялось ручным способом с применением алмазной пасты.

Электролитическое полирование проводилось в электролите, который включает: 50%  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , 39%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 3%  $\text{CrO}_2$ , 8%  $\text{H}_2\text{O}$ . Плотность тока 15–20 А/дм<sup>2</sup>; температура раствора при полировании 75–85 °С.

Крепление фольговых сенсоров осуществлялось многокомпонентным клеем PASCO® FIX на основе этилового эфира цианакриловой кислоты. Приведенные изготовителем клея данные [5] и опыт применения клеев на основе циакрина для тензометрирования при проведении испытаний самолетов говорят о возможности применения клея в температурном диапазоне, соответствующем условиям работы авиационных конструкций.

**Диагностические параметры.** В проведенном цикле исследований фольговый сенсор крепился на плоском образце сплава Д16АТ, который испытывался при максимальном напряжении отнулевого цикла нагружения  $\sigma_{\text{max}} = 180,0$  МПа с частотой нагружения 11,0 Гц. Испытания проводились на стандартной гидропульсационной машине МУП-20. Наблюдение за состоянием поверхности проводилось с помощью оптического металлографического микроскопа ММР-4 с фиксацией цифровых изображений увеличением 350<sup>x</sup>.

На рисунках 1–3 показано развитие деформационного рельефа в трех выбранных

для контроля кристаллитах (зернах).

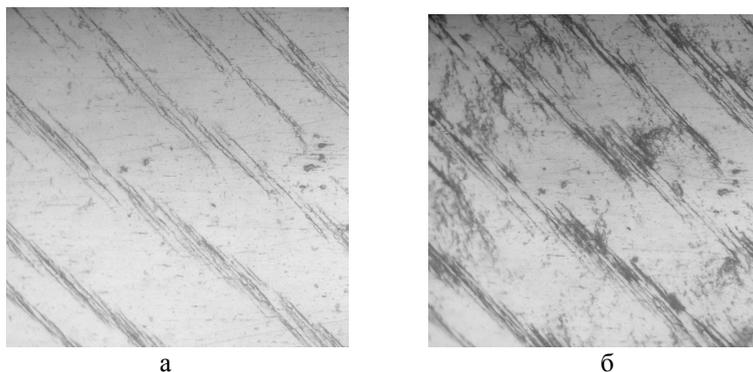


Рисунок 1. Деформационный рельеф поверхности фольгового структурно-чувствительного сенсора усталости, зерно №1: N = 10000 циклов нагружения (а); N = 200000 циклов нагружения (б)

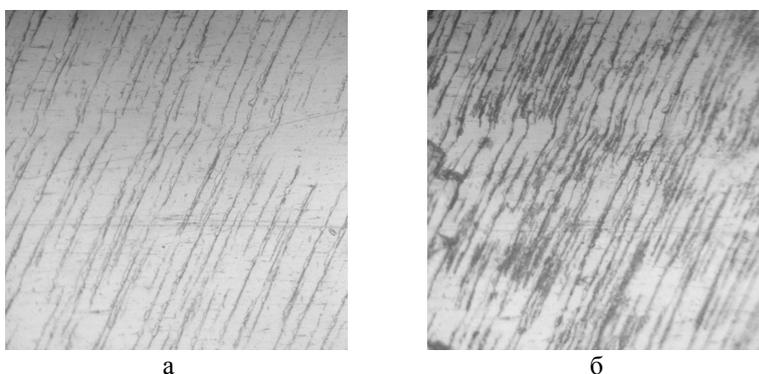


Рисунок 2. Деформационный рельеф поверхности фольгового структурно-чувствительного сенсора усталости, зерно № 2: N = 10000 циклов нагружения (а); N = 200000 циклов нагружения (б)

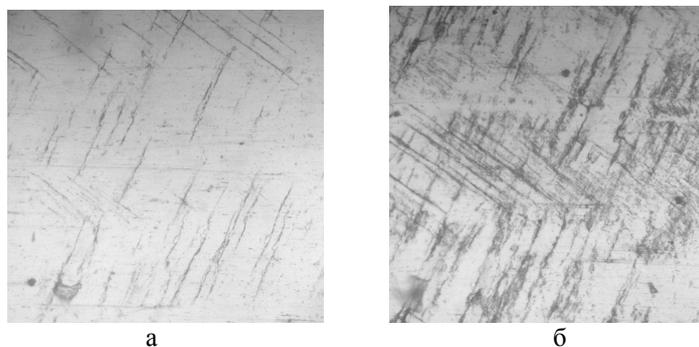


Рисунок 3. Деформационный рельеф поверхности фольгового структурно-чувствительного сенсора усталости, зерно №3: N = 10000 циклов нагружения (а); N = 200000 циклов нагружения (б)

Очевидно, что наблюдаемые различия формы и направления полос скольжения обусловлены особенностями кристаллографической ориентации рассматриваемых кристаллитов.

Ранее, при исследовании деформационного рельефа поверхности монокристаллов алюминия и поликристаллического алюминиевого плакирующего слоя, были предложены диагностические параметры, позволяющие выполнять количественную оценку накопленного усталостного повреждения: а) плотность полос скольжения [1,2]; б) фрактальная размерность деформационного рельефа [6]; в) параметр повреждения D, определяемый по насыщенности деформационного рельефа [6].

Проведенный сравнительный анализ возможности и эффективности применения указанных параметров позволил сделать следующие выводы:

- плотность полос скольжения может быть эффективным диагностическим параметром монокристаллов и крупных кристаллитов поликристаллических материалов только при их определенной благоприятной ориентации по отношению к оси нагружения;

- применение фрактальных размерностей полос скольжения в качестве количественного параметра требует использования оптических систем большого увеличения и разрешающей способности;

- в связи с тем, что эволюция полос скольжения включает увеличение количества линий и полос и их ширины, наиболее эффективным количественным параметром рельефа может быть параметр повреждения  $D$ , определяемый как отношение площади поверхности с признаками рельефа к общей наблюдаемой площади поверхности контролируемого участка.

**Результаты мониторинга состояния структурно-чувствительных сенсоров в процессе их циклического нагружения.** На рис. 4 показаны результаты мониторинга параметра повреждения, определенного по деформационному рельефу кристаллита (зерна) №1. Для автоматизированного определения параметра  $D$  использовалось разработанное ранее оборудование и программное обеспечение [6].

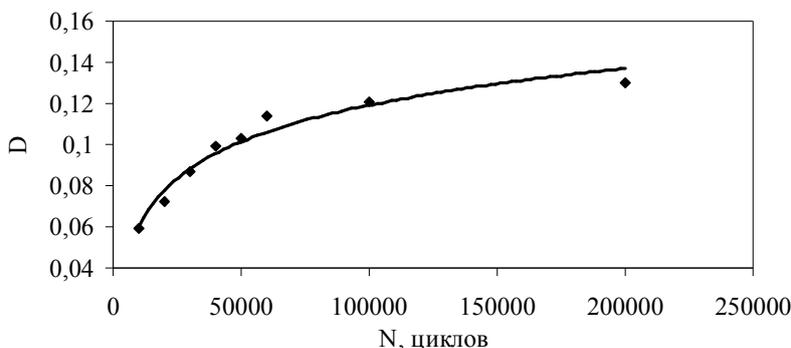


Рисунок 4. Эволюция параметра повреждения кристаллита №1

Как видно из рисунка 4, зависимость параметра повреждения от количества циклов нагружения является монотонной на всем протяжении мониторинга, что подтверждает возможность использования выбранного параметра в качестве диагностического.

Аналогичный вид имеют и графики изменения параметров повреждения кристаллитов №2 и №3.

Корреляционный и регрессионный анализ показал возможность использования логарифмической функции для описания связи между параметром повреждения  $D$  и числом циклов нагружения.

В таблице 3 приведены значения коэффициентов детерминации  $R^2$  при аппроксимации полученных экспериментальных зависимостей параметра  $D$  от числа циклов нагружения различными функциями: а) линейной; б) логарифмической; в) степенной.

Таблица 3. Результаты аппроксимации зависимостей параметра повреждения от числа циклов нагружения

Номер зерна	Линейная функция и соответствующий коэффициент $R^2$	Логарифмическая функция и соответствующий коэффициент $R^2$	Степенная функция и соответствующий коэффициент $R^2$

№ 1	$D = 3 \cdot 10^{-7} \cdot N + 0,0774$ $R^2 = 0,6771$	$D = 0,0257 \cdot \ln(N) - 0,1764$ $R^2 = 0,9601$	$D = 0,0048 \cdot N^{0,28}$ $R^2 = 0,9306$
№ 2	$D = 5 \cdot 10^{-7} \cdot N + 0,0826$ $R^2 = 0,6918$	$D = 0,0408 \cdot \ln(N) - 0,3201$ $R^2 = 0,9297$	$D = 0,0019 \cdot N^{0,3809}$ $R^2 = 0,8908$
№ 3	$D = 8 \cdot 10^{-7} \cdot N + 0,0427$ $R^2 = 0,7524$	$D = 0,0552 \cdot \ln(N) - 0,4989$ $R^2 = 0,9252$	$D = 5 \cdot 10^{-5} \cdot N^{0,6917}$ $R^2 = 0,9222$

**Выводы.** Одним из возможных путей оценки накопленного усталостного повреждения по состоянию деформационного рельефа поверхности может быть применение фольговых поликристаллических структурно-чувствительных сенсоров. Количественная оценка накопленного повреждения выполняется по насыщенности деформационного рельефа сенсора. Фольговые сенсоры крепятся на поверхности диагностируемых изделий с помощью клея, что позволяет использовать их для контроля различных конструкций, работающих в условиях сложно-напряженного состояния.

#### Литература

1. Карускевич, М.В. Монокристаллический датчик усталостного повреждения конструкций: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 01.02.06. «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» [Текст] / М.В. Карускевич. – К., 1990. – 20 с.
2. Karuskevich M.V., Radchenko A.I., Zasimchuk E.E., Single-crystal as an indicator of fatigue damage Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol.15. – 1993. – № 12. – P. 1281–1283.
3. А. с. 15802118 СССР, G 01 N 3/32. Способ контроля усталостной повреждаемости элементов конструкций [Текст] / Е.Е. Засимчук, М.В. Карускевич, А.И. Радченко, Ю.А. Лебедев (СССР). – № 4383976/25–28; заявл. 20.01.88; опубл. 20.08.02, Бюл. № 27.
4. ГОСТ 618 – 73. Фольга алюминиевая для технических целей. Технические условия.
5. Технические данные клеевого состава PASCO® FIX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.zenonline.ru/support/tech\\_lit/glues\\_pasco.htm](http://www.zenonline.ru/support/tech_lit/glues_pasco.htm).
6. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа [Текст] / М.В. Карускевич, Т.П. Маслак, Е.Ю. Корчук [и др.] // Пробл. прочности. – 2008. – № 6 (396). – С.128–135.