

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАКИРУЮЩЕГО СЛОЯ СПЛАВА Д16АТ ПРИ УСТАЛОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО БЕСКОНТАКТНОГО ПРОФИЛОМЕТРА

Описана методика количественной оценки деформационного рельефа, возникающего на поверхности плакирующего слоя конструктивного сплава Д16АТ при циклическом нагружении с использованием бесконтактного интерференционного профилометра. В качестве количественного параметра, характеризующего эволюцию деформационного рельефа при усталости, предложено использовать значение пластической деформации поверхности. Методика позволяет разбивать контролируемый участок на ячейки размером  $4,9 \times 4,9$  мкм или  $9,8 \times 9,8$  мкм и оценивать неоднородности пластического деформирования микрообъемов материала рассматриваемого конструктивного сплава.

**Ключевые слова:** деформационный рельеф, усталость, микропластическая деформация, интерференционная профилометрия.

### Введение

Согласно подходам физической мезомеханики, описывающим деформируемое твердое тело как многоуровневую систему, поверхностный слой можно считать самостоятельной подсистемой материала или, даже, как особое состояние вещества [1, 2]. При усталости на поверхности металла происходит формирование деформационного рельефа (ДР), вызванное пластическим деформированием из-за потери сдвиговой устойчивости на различных структурно-масштабных уровнях [1, 3, 4]. Пластическая деформация начинается в наиболее слабых местах и носит локальный характер.

В случае конструктивного алюминиевого сплава Д16АТ его характерной особенностью является наличие плакирующего слоя из технически чистого алюминия. Следует отметить, что значения пределов текучести сплава сердцевины Д16 и плакирующего слоя отличаются на порядок:  $\sigma_{02}^{Д16} = 290$  МПа и  $\sigma_{02}^{АД1} = 30$  МПа. Из-за этого при упругом растяжении и разгрузке сплава Д16 деформирование плакирующего слоя осуществляется по знакопеременному циклу со значительным размахом циклической пластической деформации. Такой процесс сопровождается формированием ДР на поверхности плакирующего слоя.

В ряде работ [5 - 7] появившийся на поверхности материала при усталости ДР рассматривается как индикатор нагруженности или поврежденности. Поэтому исследование особенностей поведения ДР при усталости

является актуальной задачей при изучении вопросов, связанных с определением ресурса авиационных конструкций.

### 1. Экспериментальная часть

Механические испытания проводились на сервогидравлической испытательной установке с цифровым управлением Vi-00-202V. Нагружение образцов осуществлялось по знакопостоянному положительному отнулевому несимметричному циклу.

Количественная характеристика рельефа определялась с использованием оптического интерференционного нанопрофилометра Micron-alpha [8-9], разработанного на кафедре конструкции летательных аппаратов.

Основные функциональные возможности Micron-Alpha позволяют использовать его как эффективное аппаратное средство для исследования ДР. С помощью данного прибора возможно построить 3D профили поверхности (рис. 1), а также обеспечить проведение количественной оценки размерных характеристик рельефа поверхности.

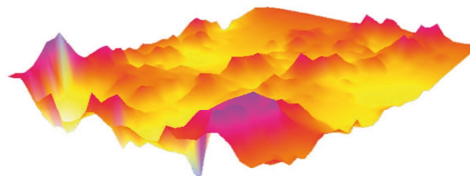


Рис. 1. Трехмерное изображение ДР

Форма и размеры образцов для усталостных испытаний (рис. 2) выбирались в соответствии с [10], что позволило избежать неравномер-

ного распределения напряжения на образце вблизи захвата. В центральной части образца сверлилось отверстие, которое имитировало конструктивный концентратор напряжений в обшивке ЛА под заклепку.

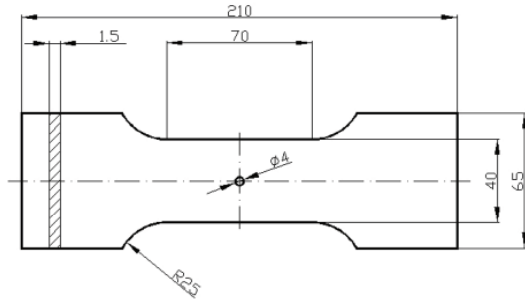


Рис. 2. Образец для усталостных испытаний

Контроль топографии поверхности осуществлялся на 4 площадках, лежащих на удалении 100 мкм от концентратора напряжения - отверстия диаметром 4 мм (по 2 площадки с каждой стороны концентратора). Расположение участков и их размеры приведены на рис. 3.

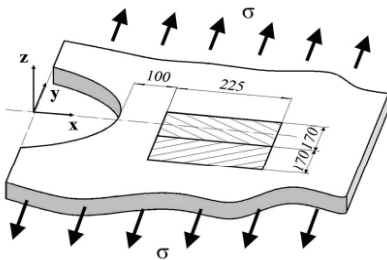


Рис. 3. Схема расположения зоны контроля

## 2. Анализ полученных результатов

Для последующего анализа информации, полученной в ходе сканирования поверхности, используется разработанная в универсальной среде Matrix Laboratory (MatLab) программа.

В соответствии с алгоритмом программы для определения площади поверхности контролируемого участка использовался трехмерный массив данных, который формировался из матрицы размером 320×240 точек (рис.4). Каждой  $i$ -точке этого массива соответствует значение высоты рельефа  $z_i$ .

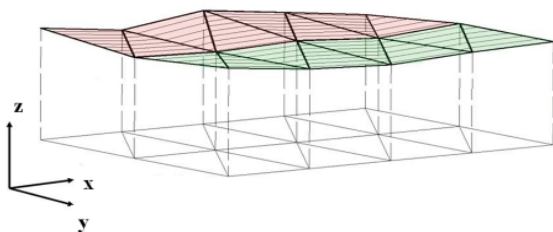


Рис. 4. Схема разбиения поверхности на плоские треугольники

При соединении этих точек между собой формируется сетка из плоских треугольников, которая является приближением исследуемой поверхности.

Трехмерное представление рельефа поверхности в виде сетки плоских треугольников с учетом измеренных значений рельефа показано на рис. 5.

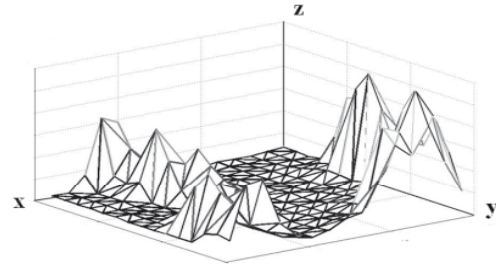


Рис. 5. Трехмерное представление рельефа поверхности контролируемой площадки в виде сетки плоских треугольников

Теперь площадь поверхности можно определить суммированием площадей треугольников. Площадь каждого треугольника рассчитывалась по значениям высоты рельефа в соседних узлах сетки.

Для оценки деформации локальных участков контролируемая площадка разбивалась на ячейки. При этом количество и размеры ячеек варьировались:

- 34×44 ячейки размером 4,9×4,9 мкм,
- 17×22 ячейки размером 9,8×9,8 мкм.

В результате такого преобразования контролируемая зона была представлена  $k = 1496$  и  $k = 374$  ячейками соответственно, что позволяет оценить неоднородности пластического деформирования микроучастков поверхности.

В данном случае решается задача определения микропластичности, заключающейся в оценке неоднородности пластического деформирования микрообъемов материала.

Для дальнейшего анализа изменения микропластической деформации определялась пластическая деформация для каждой ячейки контролируемого участка (рис.6).

По известной площади ячейки поверхности определяется микропластическая деформация

$$\varepsilon_{aj} = \frac{A_{ji} - A_{j0}}{A_{j0}}, \quad (1)$$

где  $A_{j0}$  – исходное значение площади ячейки поверхности контролируемой зоны перед циклическим нагружением.

$A_{ji}$  – значение площади ячейки поверхности контролируемой зоны после циклического нагружения.

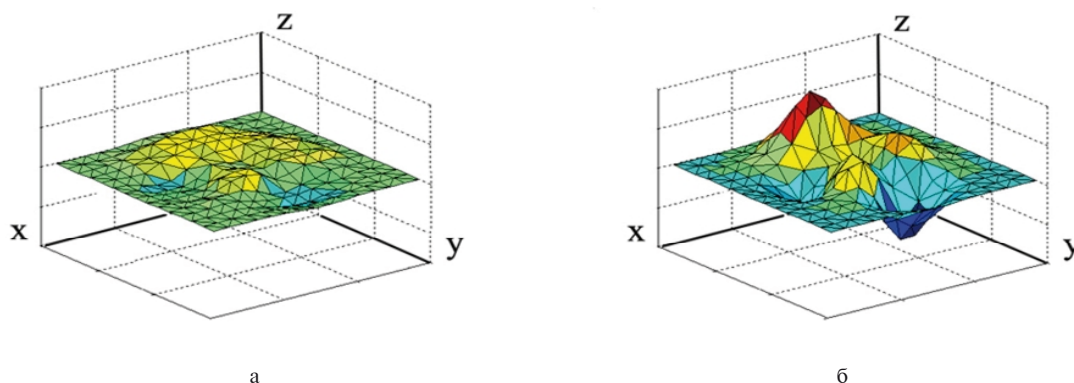


Рис. 6. Отображение площади ячейки:  
а – перед наработкой ( $N = 0$  цикл); б – после наработки

Таким образом, в ходе эксперимента для каждой наработки был получен массив данных микропластической деформации размером  $34 \times 44$  (рис. 7 а, б) и  $17 \times 22$  (рис. 8 а, б).

Такое преобразование контролируемой площадки для анализа особенностей протекания процесса микропластической деформации позволяет использовать математическое ожидание значения микропластической деформации:

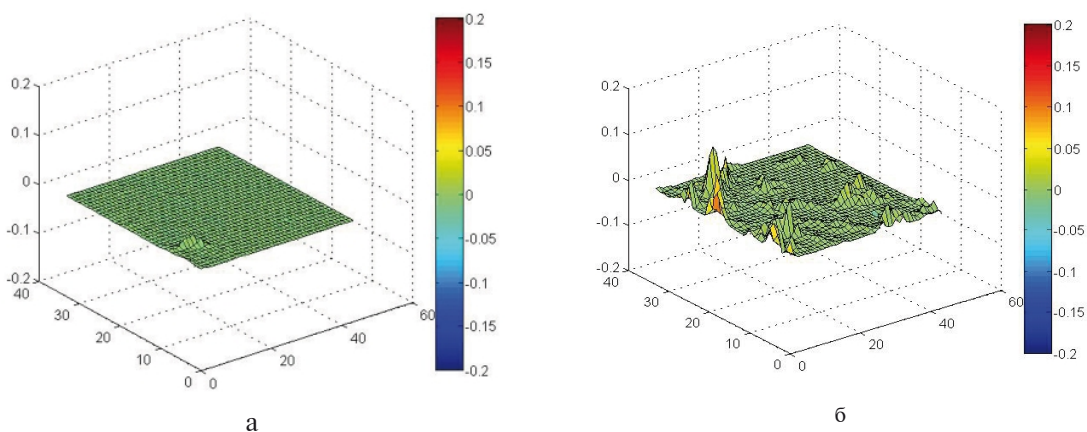


Рис. 7. Изменение микропластической деформации для контролируемой площадки  $34 \times 44$  ячейки:  
а - после первой наработки; б - перед образованием усталостной тершины

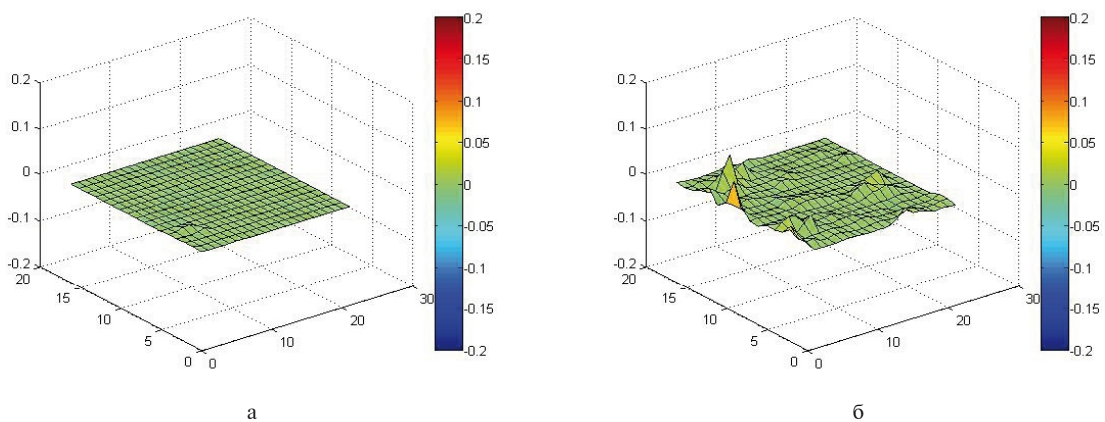


Рис. 8. Изменение микропластической деформации для контролируемой площадки  $17 \times 22$  ячейки:  
а - после первой наработки; б - перед образованием усталостной тершины

$$\langle \varepsilon_a \rangle = \sum_{j=1}^k \frac{\varepsilon_{aj}}{k} \quad (2)$$

и среднеквадратического отклонения:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\varepsilon_{aj} - \langle \varepsilon_a \rangle)^2} \quad (3)$$

Использование этих величин позволяет оценить общую тенденцию развития и степень неоднородности микропластических деформаций при усталости.

Очевидно, что изменение математического ожидания микропластической деформации для случая, когда контролируемая площадка разбивается на  $k=1496$  и  $k=374$  ячеек будет одинаковым (рис. 9).

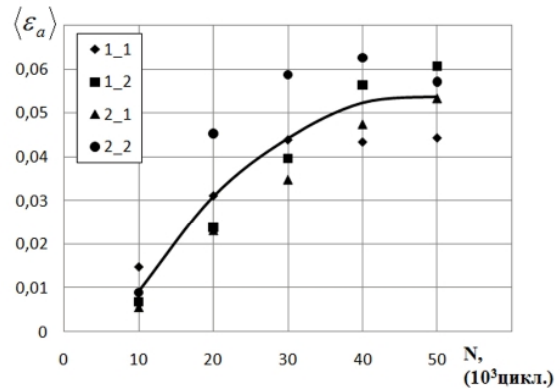


Рис.9.Изменение математического ожидания микропластической деформации  $\langle \varepsilon_a \rangle$  от наработки

Однако в случае среднеквадратического отклонения наблюдается различие в изменении исследуемого параметра (рис.10 а, б) - уменьшается разброс данных с увеличением размера ячейки.

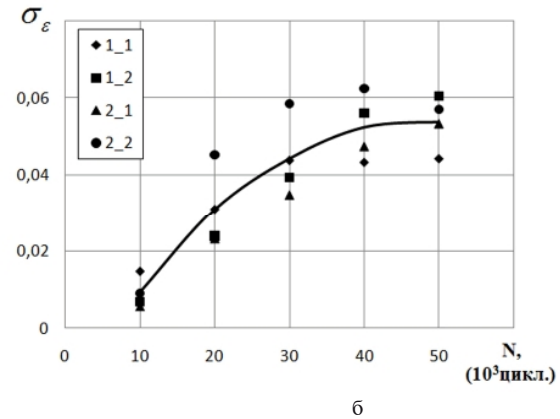
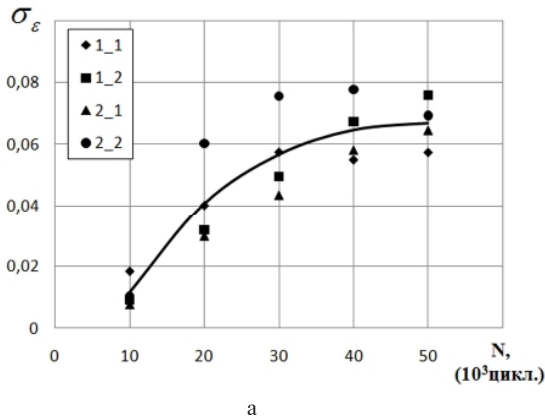


Рис. 10. Изменение величины среднеквадратического отклонения микропластической деформации  $\sigma_\varepsilon$  от наработки для случаев, когда:  
а - количество ячеек  $k=1496$ ; б - количество ячеек  $k=374$

### Заключение

Использование бесконтактного интерференционного профилометра Micron-Alpha открывает широкие возможности при изучении особенностей изменения деформационного рельефа, который образуется при усталости на поверхности конструктивного сплава Д16АТ.

Предложенная в статье методика количественной оценки микропластической деформации позволяет получить дополнительную информацию о процессах, протекающих в поверхностных слоях плакирующего слоя и использовать ее для прогнозирования наступления предельного состояния конструктивного сплава.

### Литература

1. Панин В.Е. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода [Текст]/ В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин // Физ. мезомех. 2006. Т. 9, № 3. С. 922.
2. Hatherly M. Shear band in deformed metals [Text]/ M. Hatherly, A. S. Malin // Scr. Met. 1984. V. 18. P. 449-454.
3. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах [Текст]/ Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск : СО РАН, 2006. 520 с.

4. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов [Текст] / под общ. ред. В. Е. Панина. Новосибирск : Наука, 1995. 297 с.
5. А. с. 15802118 СССР. Способ контроля усталостной повреждаемости элементов конструкций. М.В. Карускевич, Е.Е. Засимчук, А.И. Радченко, Ю.А. Лебедев (СССР). – Заявл. 10.04.89; опубл. 30.10.89, Бюл. №26. – 3 с.
6. Патент на корисну модель №29683 Україна, МПК G01N 3/32. Спосіб визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за станом деформаційного рельєфу поверхні плакуючого шару / С.Р. Ігнатович, М.В. Карускевич, О.М. Карускевич; Власник НАУ. № 200709909; заявл. 04.09.2007; опубл. 25.01.2008, Бюл. №2. – 3 с.: іл.
7. Karuskevich M.V. Estimation of the accumulated fatigue damage by saturation and fractal dimension of the deformation relief [Text] / M.V. Karuskevich, E.Yu. Korchuk, A.S. Yakushenko, T.P. Maslak, // Strength of Materials, - 2008. - V. 40., - P. 693-697.
8. Игнатович С.Р. Исследование процесса усталости в сплаве Д16АТ при помощи нанопрофилометр [Текст] / С.Р. Игнатович, С.С. Юцкевич, В.И. Закиев // Вестник двигателестроения – № 3. Харьков: ХАИ, 2008. – С.99-102.
9. Интерференционный профилометр для контроля топографии поверхности материалов с нанометровым разрешением [Текст] / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, С.С. Юцкевич, В.И. Закиев // Праці Міжнародної НТК [«Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування»], (Тернопіль, 21-24 вересня 2009 р.) Тернопіль : Терн. держ. техн. університет, 2009. С. 175179.10.
10. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8 M-08 (Approved Oct. 10, 2001). West Conshohocken, 2001. – 24 p.

Поступила в редакцію 01.07.2013

**С.С. Юцкевич. Дослідження мікропластичної деформації поверхні плакуючого шару сплаву Д16АТ при втомі з використанням оптичного безконтактного профілометра**

*Описано методику кількісної оцінки деформаційного рельєфу, який виникає на поверхні плакуючого шару конструкційного сплаву Д16АТ при циклічному навантаженні з використанням безконтактного інтерференційного профілометра. В якості кількісного параметра, що описує еволюцію деформаційного рельєфу при втомі, запропоновано використовувати значення пластичної деформації поверхні. Методика дозволяє розбивати контрольований ділянку на чарунки розміром 4,9×4,9 мкм або 9,8×9,8 мкм та оцінювати неоднорідності пластичного деформування мікрооб'ємів матеріалу розглянутого конструкційного сплаву.*

**Ключові слова:** деформаційний рельєф, втома, мікропластична деформація, інтерференційна профілометрія.

**S.S. Yutskevych. Study of D16AT aluminum alloy alclad surface microstrain under fatigue using optical noncontact profiler**

*A methodology for quantifying of deformation relief that is forming on the surface of D16AT structural alloy alclad under cyclic loading with the use of non-contact interfere profiler is described. As a quantitative parameter describing the deformation relief evolution was proposed to use the value of the surface strain. It was also proposed controlled area partition on 4.9×4,9 μm or 9.8×9,8 μm cell size, which allows to estimate the heterogeneity of strain of micro volumes of material under consideration structural alloy.*

**Key words:** deformation relief, fatigue, microstrain, interfere profilometry.