

**ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВА Д16АТ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Описана особенность эволюции деформационного рельефа на поверхности сплава Д16АТ при усталости. Результаты исследования получены с использованием оптического нанопрофилометра. В качестве параметров, характеризующих деформационный рельеф, предложены микропластическая деформация и неравномерность распределения микропластической деформации на контролируемом участке.

Ключевые слова: ресурс, циклическое нагружение, деформационный рельеф, оптическая профилометрия.

Для установления и обеспечения ресурса конструкций, которые подвержены воздействию переменных нагрузок, а также повышения их безопасности при эксплуатации необходимо использовать данные, основанные на происходящих в материале физико-механических явлениях. Особенно это актуально для авиационных конструкций, которые из-за необходимости получения максимальной весовой эффективности обладают наименьшими, по сравнению с другими инженерными конструкциями, запасами прочности.

С целью получения информации о текущем состоянии летательного аппарата (ЛА) используют различные неразрушающие методы контроля, интенсивное развитие которых позволяет перейти к концепции контроля технического состояния конструкции, известной как Structural Health Monitoring (SHM). Ключевым элементом SHM выступают датчики, воспринимающие вместе с конструкцией весь спектр нагрузок и в зависимости от интенсивности нагружения изменяют свои свойства.

В Национальном авиационном университете в качестве индикатора нагруженности авиационных конструкций предложено использовать образцы-сенсоры, поверхность которых образована лакирующим слоем из технически чистого алюминия. Показателем циклической нагруженности и усталостной поврежденности у таких образцов выступает деформационный рельеф (ДР), который формируется на поверхности датчика [1].

Исследования [2] показали, что уже для первой стадии усталости характерен процесс микропластического деформирования металла, который наиболее интенсивно происходит в приповерхностных слоях глубиной порядка размера зерна. Избыточная (в сравнении с объемом кристалла) деформация поверхностного слоя в этом случае обуславливает появление ДР.

Так как локализация деформации является результатом неоднородного распределения дислокаций в кристалле, и особенно на его поверхности, то поверхностный ДР отражает характер этого распределения в кристалле на макро-, мезо- и микромасштабном уровнях [3].

Используемый в отечественном авиастроении в качестве конструкционного материала для обшивки ЛА сплав Д16АТ имеет плакирующий слой из технически чистого алюминия. Проведенные в работах [4-5] исследования показали, что на поверхности плакирующего слоя сплава Д16АТ при циклическом нагружении происходит формирование ДР.

Таким образом, информация об эволюции ДР в местах контроля состояния обшивки самолета в процессе нагружения может использоваться для решения целого ряда задач, связанных с обеспечением работоспособности и надежности ЛА. Например, для обеспечения адекватности результатов, а также оптимизации программ ресурсных (прочностных) испытаний элементов конструкций самолетов с целью обоснования их ресурсных характеристик. При проведении таких испытаний очевидна необходимость применения эффективных методов контроля технического состояния элементов конструкции ЛА, к которым может быть отнесен и контроль ДР на обшивке.

Другая задача связана с проведением мониторинга технического состояния наиболее ответственных элементов конструкции ЛА в эксплуатации с целью контроля исчерпания индивидуального ресурса или прогнозирования их остаточного ресурса. Для решения этой задачи базовой информацией является история эксплуатационного нагружения контролируемых элементов.

В данной работе для исследования состояния поверхности используется метод оптической профилометрии, позволяющий осуществлять контроль эволюции ДР в трехмерном пространстве.

Усталостные испытания проводили на сервогидравлической испытательной машине Vi-00-202V фирмы ViSS (Индия). Нагружение образцов осуществляли по знакопостоянному положительному отнулевому несимметричному циклу. Максимальное значение напряжений в цикле σ_{max} составляло 80...150 МПа.

В центральной части образца (рис.1, а) высверливали отверстие диаметром 4 мм, моделирующее отверстие под заклепку в конструкции обшивки самолета. Участок поверхности образца, примыкающий к отверстию, полировали алмазной пастой.

Периодически усталостные испытания образцов приостанавливали, и с помощью интерференционного профилометра Micron-Alpha осуществляли сканирование участков поверхности размером 225×170 мкм, которые примыкают к отверстию и находятся в зоне действия концентрации напряжений. На каждом образце было 4 таких участка – по 2 с каждой стороны отверстия. Расположение участков и их нумерация приведены на рис. 1, б.

Использование прибора Micron-Alpha позволяет регистрировать и определять 3D топографию исследуемой поверхности с точностью: 0,7 мкм в плоскости образца и 5 нм в направлении, перпендикулярном к плоскости

образца.

Испытания продолжали до момента образования усталостной трещины длиной 0,5 мм.

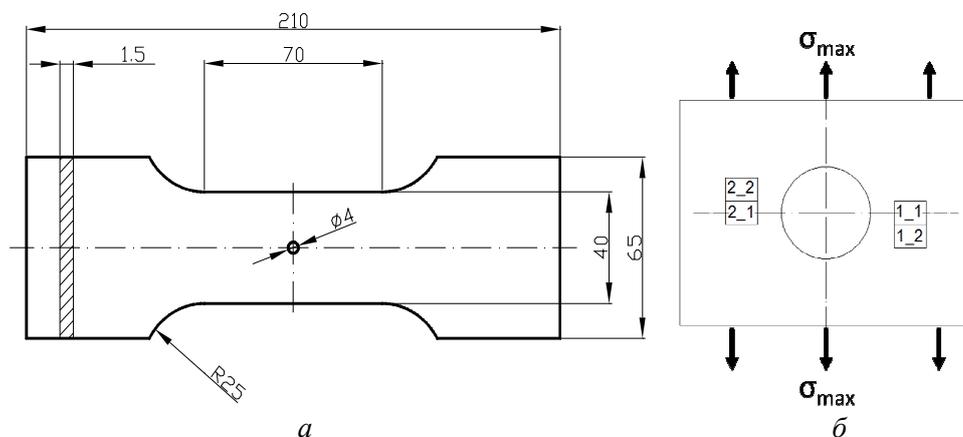


Рис. 1. Общая схема образца для усталостных испытаний (а) и расположение контролируемых участков на нем (б).

Ключевым условием испытаний было соблюдение точности выбора участка сканирования при каждом замере, что стало возможным благодаря особенностям навигационно-измерительной системы Micron-Alpha.

Полученные при сканировании поверхности контролируемого участка результаты обрабатывали с помощью специально разработанной для этих целей программы в среде MatLab.

В качестве параметра, описывающего эволюцию ДР при циклической наработке, использовалась пластическая деформация поверхности. В работе [6] было показано, что формирование ДР на поверхности плакирующего сплава Д16АТ при усталости сопровождается увеличением площади поверхности. По изменению площади определяли пластическую деформацию поверхности:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta A}{A_0} \quad (1)$$

Изменение рельефа приводит к увеличению площади поверхности:

$$\Delta A = A_N - A_0, \quad (2)$$

где A_0 – площадь поверхности до нагружения; A_N – площадь поверхности после N циклов наработки.

Для расчета площади поверхности проекцию контролируемого участка на плоскость x, y представляли в виде сетки из 320×240 узлов, каждому из которых соответствует значение высоты рельефа поверхности z_i , определенной с помощью профилометра (рис. 2). Поверхность заменяли совокупностью треугольников, координаты вершин которых соответствовали

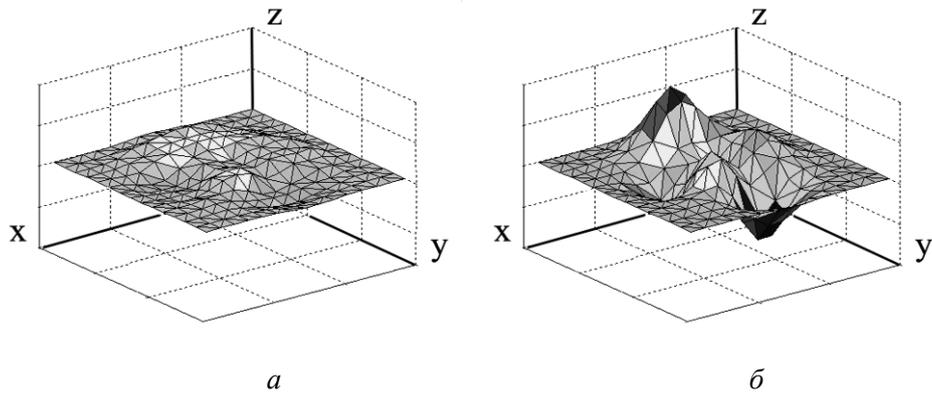


Рис. 2. Площади поверхности: *a* - в исходном состоянии, *б* - после наработки.

значениям z_i . Площадь всей поверхности рассчитывали суммированием площадей треугольников.

Результаты испытаний показали, что зависимости ε_a от циклической наработки аппроксимируются степенной функцией и в существенной степени зависят от действующих напряжений (рис. 3). В диапазоне напряжений от $\sigma_{\max} = 60$ МПа до $\sigma_{\max} = 150$ МПа пластическая деформация изменяется на три порядка.

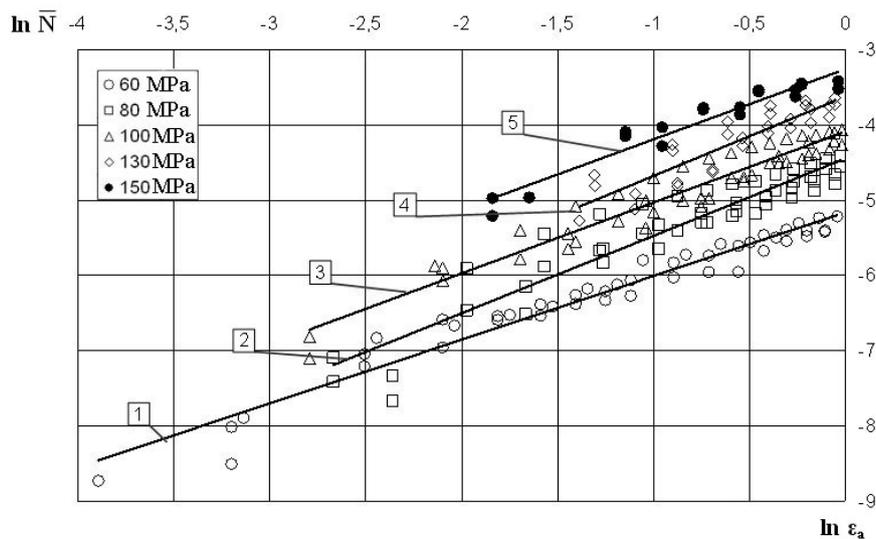


Рис. 3. Изменение пластической деформации контролируемого участка от относительной наработки до образования трещины 0,5 мм [6].

Полученные результаты обобщаются зависимостью

$$\varepsilon_a = 1.67 \cdot 10^{-6} \sigma_{\max}^2 \bar{N}^{0.96}, \quad (3)$$

где σ_{\max} измеряется в МПа.

Следует отметить, что данную методику исследования ДР можно

использовать не только для определения пластической деформации всей поверхности, но и для оценки деформации локальных участков, вплоть до размеров составляющих сетку квадратов.

В данной работе внимание уделяется решению задачи микропластичности, заключающейся в оценке неоднородности пластического деформирования микрообъемов материала, свойственного поликристаллическим материалам [7]. При этом предложенная методика более эффективна, чем методики реперных рядов [8] или склерометрии [9].

Для удобства контролируемую зону поверхности разбивали на 34 ячейки размером $4,9 \times 4,9$ мкм. В результате такого преобразования контролируемая зона был представлен 1496 ячейкой. Такое разделение позволяет определить микропластичность материала и оценить неоднородности пластического деформирования микроучастков поверхности.

Анализ изменения микропластической деформации осуществляли путем определения пластической деформации каждой ячейки контролируемого участка:

$$\varepsilon_{aj} = \frac{A_{jN} - A_{j0}}{A_{j0}}, \quad (4)$$

где A_{j0} – исходное значение площади микроучастков поверхности контролируемой зоны перед циклическим нагружением; A_{jN} – значение площади j -го микроучастка поверхности контролируемой зоны после циклического нагружения.

Таким образом, в ходе эксперимента для каждой наработки был получен массив данных размером 34×44 , характеризующий пластическую деформацию элементарных ячеек.

Для дальнейшего анализа использовали величины математического ожидания микропластической деформации

$$\langle \varepsilon_a \rangle = \sum_{j=1}^{1496} \frac{\varepsilon_{aj}}{1496} \quad (5)$$

и среднеквадратического отклонения микропластической деформации

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{1496} \sum_{j=1}^{1496} (\varepsilon_{aj} - \langle \varepsilon_a \rangle)^2} \quad (6)$$

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

На рис. 4 и 5 приведены соответственно зависимости изменения величины математического ожидания и среднеквадратического отклонения микропластической деформации от наработки при разных уровнях максимальных напряжений. Отображенные на графиках зависимости свидетельствуют о постепенном увеличении контролируемых параметров от наработки.

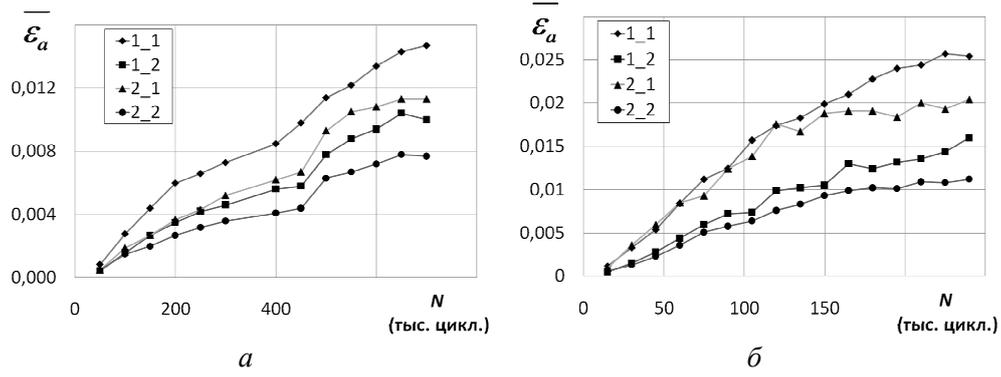


Рис. 4. Изменение математического ожидания микропластической деформации $\langle \varepsilon_a \rangle$ от наработки N для $a - \sigma_{\max} = 80$ МПа, $b - 100$ МПа, $\varepsilon - 150$ МПа.

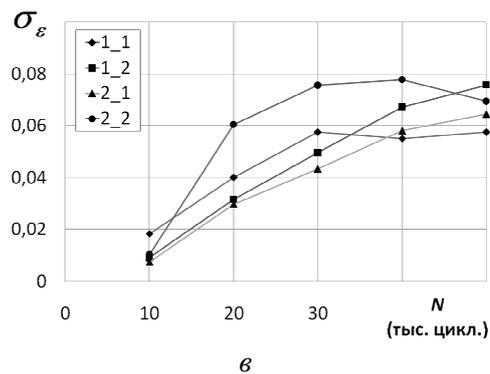
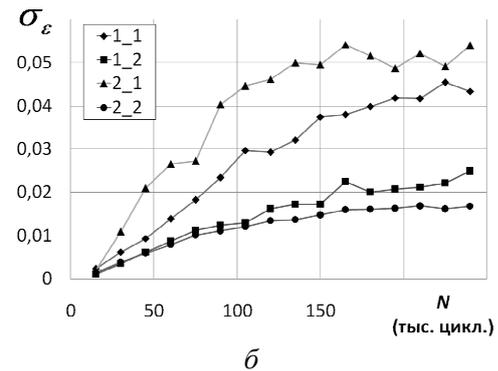
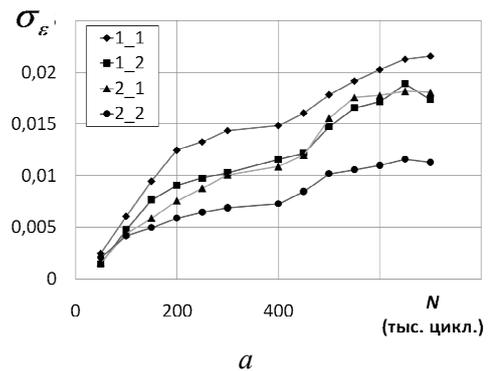
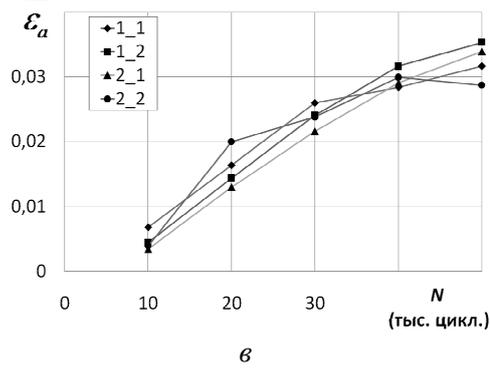


Рис. 5. Изменение среднеквадратического отклонения микропластической деформации σ_ε от наработки N для $a - \sigma_{\max} = 80$ МПа, $b - 100$ МПа, $\varepsilon - 150$ МПа.

В качестве дополнительно параметра, описывающего особенности протекания процесса микропластической деформации при усталости, был использован коэффициент вариации

$$V = \frac{\sigma_{\varepsilon}}{\langle \varepsilon_a \rangle}. \quad (7)$$

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента вариации от наработки, которые указывают на то, что с увеличением наработки происходит стабилизация процесса пластического деформирования на поверхности лакирующего слоя.

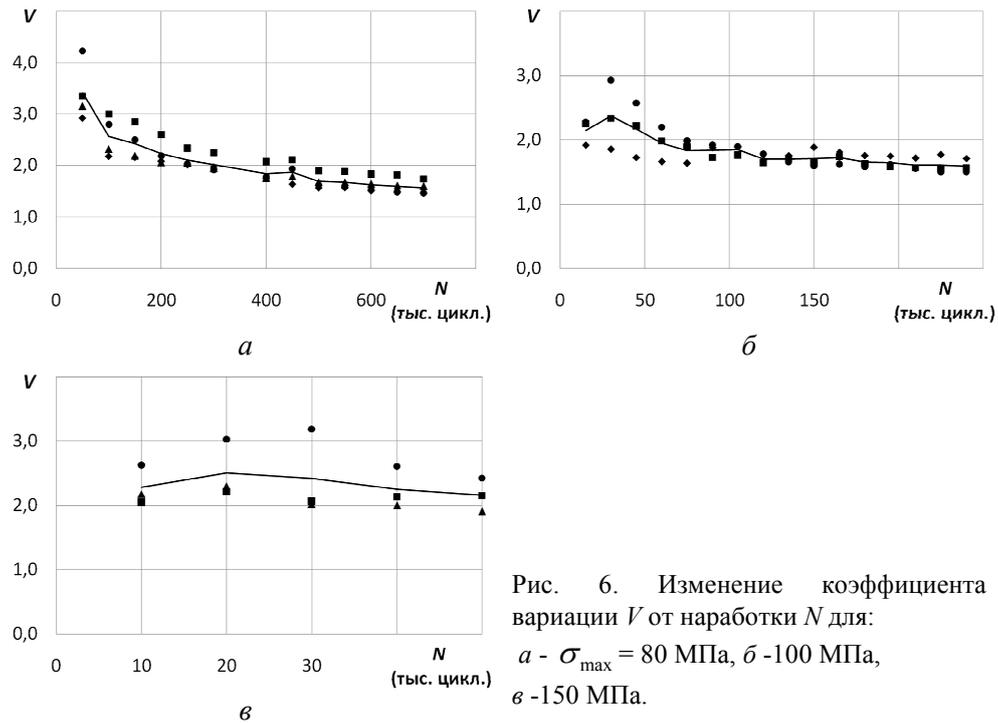


Рис. 6. Изменение коэффициента вариации V от наработки N для:
 а - $\sigma_{\max} = 80$ МПа, б - 100 МПа,
 в - 150 МПа.

Выводы. 1. В качестве индикатора поврежденности конструкции предложено использовать деформационный рельеф, который образуется на поверхности лакирующего слоя сплава Д16АТ.

2. Предложена новая методика оценки микропластической деформации лакированных материалов с использованием интерференционного профилометра.

3. Показано, что с наработкой происходит увеличение площади поверхности лакирующего слоя конструкционного сплава Д16АТ.

4. В качестве показателя деформации поверхностного слоя предложено использовать параметр пластической деформации всей поверхности контролируемой площадки.

5. Разбивку контролируемой площадки на участки и использование параметров среднего значения пластической деформации и

среднеквадратического отклонения пластической деформации позволяет оценить особенности протекания процесса пластического деформирования.

6. Применение коэффициента вариации показывает, что с увеличением наработки происходит стабилизация процесса пластического деформирования на поверхности лакирующего слоя.

Summary

Specific of deformation relief evolution of D16AT surface layer under fatigue was described. Findings of investigation were obtained with optical interfere nanoprofilometer use. Deformation relief parameters characterized a microstrain and irregularity distribution of microstrain in control area.

Keywords: service life, cyclic loading, deformation relief, optical profilometry.

Резюме

Описана особливість еволюції деформаційного рельєфу на поверхні сплаву Д16АТ при втомі. Результати дослідження були отримані з використанням оптичного нанопрофілометра. В якості параметрів, що характеризують деформаційний рельєф, запропоновані мікропалстична деформація і нерівномірність розподілу мікропалстичної деформації на контрольованій ділянці.

Ключові слова: ресурс, циклічне навантаження, деформаційний рельєф, оптична профілометрія.

1. Карускевич М. В., Засимчук Е. Э., Радченко А. И. Метод и датчик автономного неразрушающего контроля поврежденности и исчерпания несущей способности деталей и конструкций // Пробл. прочности. – 1990. – № 12. – С. 110-114.
2. Терентьев В. Ф. К вопросу о негомогенности протекания деформации в начальной стадии циклического нагружения армко-железа // Пробл. прочности. – 1973. – № 11. – С. 3-10.
3. Панин В. Е. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода // Физ. мезомех. – 2006. – Т. 9, № 3. – С. 9-22.
4. Игнатович С. Р., Карускевич М. В., Юцкевич С. С., Маслак Т. П. Эволюция деформационного рельефа лакированного слоя алюминиевого сплава Д16АТ при усталости // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування та прогнозування. Праці міжнар. наук.-техн. конф (Тернопіль, 21-24 вересня 2009 р.). – Тернопіль: ТДТУ, 2009. – С. 47-53.
5. Моніторинг утоми конструкційних алюмінієвих сплавів / С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, О. М. Карускевич, та ін. // Вісник НАУ. – 2004. – № 1(19). – С. 88-91.

6. *Игнатович С. Р., Юцкевич С. С., Дорошенко Є. В.* Деформаційний рельєф на поверхні сплаву Д16АТ як показник історії експлуатаційного навантажування авіаційних конструкцій // Вісник ТНТУ. – 2011. – Т. 16. – № 3. – С.57-62.
7. *Головин С. А., Пушкар А.* Микропластичность и усталость металлов – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
8. *Гурьев А. В., Митин В. Я.* Особенности развития локальных микронеоднородных деформаций и накопления усталостных повреждений в углеродистых сталях // Пробл. прочности. – 1978. – № 11. – С. 19-23.
9. *Исследование* микропластического деформирования при усталости методом склерометрии / С. Р. Игнатович, Д. И. Борисов, С. С. Юцкевич и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – Вип. 8 (24). – Харьков: ХАИ, 2005. – С. 81-84.

Поступила 30.05.2013