

УДК 620.178:539.431(045)

С.Р. ИГНАТОВИЧ, Д.И. БОРИСОВ, И.М. ЗАКИЕВ, С.С. ЮЦКЕВИЧ

Национальный авиационный университет, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ УСТАЛОСТИ МЕТОДОМ СКЛЕРОМЕТРИИ

Описана методика экспериментальной оценки неоднородности микропластического деформирования поверхностного слоя материалов с использованием наносклерометрии. Получены экспериментальные данные по структурной и микропластической неоднородности на поверхности сплава Д16 при циклическом нагружении.

усталость, микротвердость, склерометрия, циклическое нагружение, поверхностный слой, физико-механические свойства

Введение

В авиации актуальной проблемой является разработка методов неразрушающего контроля и оценки технического состояния деталей, работающих в условиях циклического нагружения. Объектом контроля, как правило, выступает поверхностный слой детали, так как процессы деформирования и разрушения в нем протекают более интенсивно по сравнению с остальным объемом материала [1]. Поэтому поверхностный слой является наиболее информативным при изучении процессов, происходящих в материале при усталости.

Под действием переменных напряжений в металле одновременно происходят два процесса: упрочнение и разупрочнение [2]. Упрочнение связано с генерацией и движением дислокаций, которые образуют локальные скопления, являющимися источниками полей внутренних напряжений. Эти поля препятствуют движению новых дислокаций и проявляются в локальном повышении микротвердости материала. Релаксация внутренних напряжений таких скоплений путем образования субмикро- и микротрещин, а также зарождение вакансий из-за эволюции дислокационной структуры приводит к разупрочнению («разрыхлению») и, как следствие, к снижению показателей микротвердости.

Процесс усталостной поврежденности протекает

по поверхности материала неоднородно. За счет более слабых зерен или других дефектов процессы локализованного микропластического деформирования имеют место в материале даже при напряжениях ниже предела текучести.

О тесной связи между особенностями локального пластического деформирования и трещинообразования свидетельствуют многочисленные данные по изучению неоднородности микропластической деформации [3 – 5]. Возникновение микротрещин происходит в местах локализации микропластической деформации.

1. Формулирование проблемы

Существующая методика измерения локальных микропластических деформаций [3, 4] заключается в нанесении ряда реперных точек и измерении расстояния между ними в процессе циклической нагрузки.

Одним из самых информативных методов, позволяющим изучать неоднородность микропластического деформирования, является метод царапанья индентором или склерометрия [6].

Склерометрический метод измерения микротвердости основан на измерениях средней ширины царапины. При этом различают «чистую ширину царапины» (на уровне начальной поверхности) и

ширину, измеренную по вершинам навалов. Однако измерить чистую ширину обычно трудно из-за наличия навалов. Поэтому, наиболее эффективно использовать приборы с непрерывной регистрацией глубины внедрения алмазного индентора [7].

Метод царапания позволяет оценивать микротвердость непрерывно вдоль трассы сканирования индентора.

На рис. 1 приведен пример трибограммы и фотография царапины. Изменение ширины царапины отчетливо видно на трибограмме.

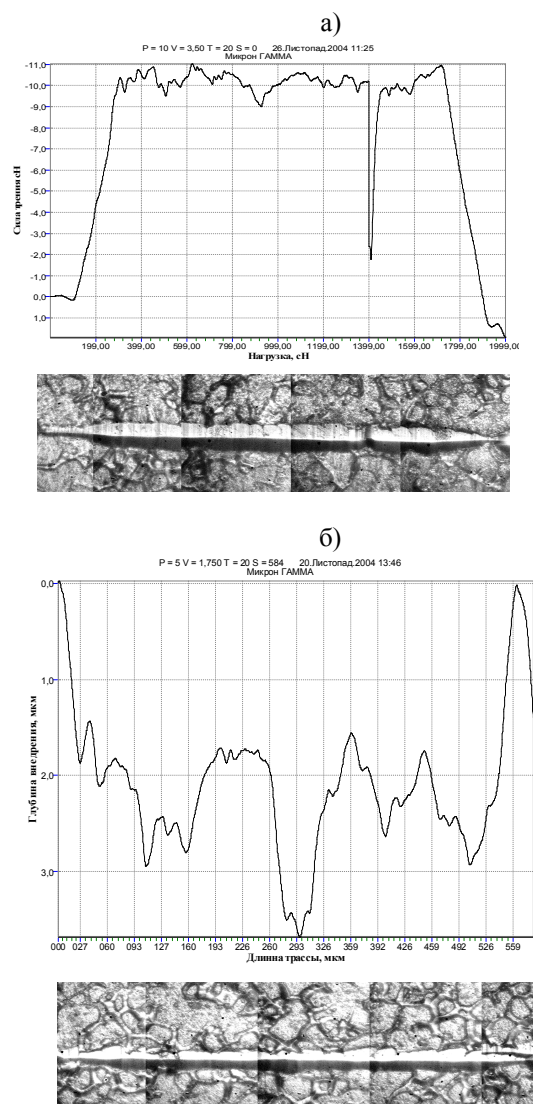


Рис. 1. Трибограмма (вверху), фотография царапины (внизу): а) при царапании замерялась тангенциальная составляющая; б) нормальная составляющая

Так как усталостная поврежденность металлов реализуется посредством локального микропласти-

ческого деформирования, а возникновение микротрещин происходит в местах наибольшей локальной пластической деформации, определение неоднородности микропластических деформаций может позволить диагностировать состояние поверхностного слоя деталей, работающих в условиях переменного нагружения, и определять их остаточный ресурс.

Целью данной работы было определение возможности использования метода царапания индентором (микросклерометрии) с непрерывной регистрацией глубины внедрения (depth sensing testing) для определения микропластической и структурной неоднородности алюминиевого сплава Д-16 в процессе усталости. Исследование проводилось на базе многофункционального прибора «Микрон-гамма» [7].

2. Решение проблемы.

2.1. Методика проведения эксперимента

Плакированный образец из сплава Д16 полировался. С целью снятия остаточных напряжений, наведенных при полировке, и выявления микроструктуры, образец протравливался согласно [8]. Средний размер зерна составлял 30 мкм. На поверхность образца с помощью прибора «МикронГамма» индентором наносилось 50 реперных точек на расстоянии 30 мкм друг от друга. Диагональ отпечатка реперной точки составляла 12 мкм. Далее производилось отнулевое циклическое растяжение образца на испытательной машине МУП-50 с максимальным напряжением $\sigma_{\max} = 200$ МПа. После $N = 10, 20, 30$ и 80 тыс. циклов с помощью микроскопа ПМТ-3 и цифровой камеры производились замеры расстояния между реперными точками. Результаты замеров приведены на рис. 2.

Отклонения микропластических деформаций значительно превышают погрешность измерений. Получено, что микропластическая деформация очень локализована и развивается неравномерно. Имеются зоны, где микропластическая деформация составляла более 12% после 20 тыс. циклов.

В процессе циклической наработки неоднородность пластической деформации возрастает.

После этапов нагружения вблизи линии реперных точек производилось царапание алмазным индентором (четырёхгранная пирамида) с непрерывной регистрацией глубины внедрения при разных нагрузках на индентор.

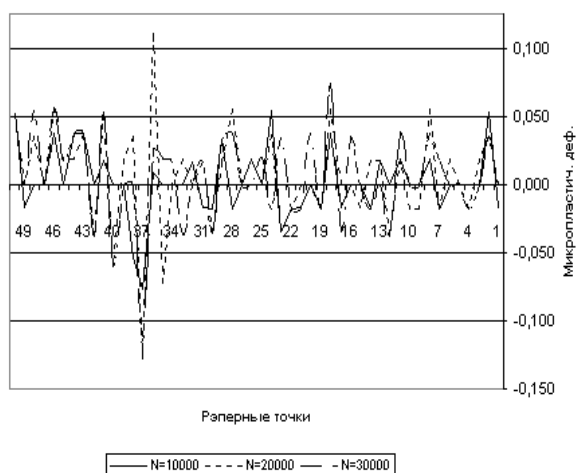


Рис. 2. Микропластическая деформация между реперными точками в процессе циклической наработки (по оси ординат – относительная деформация, по оси абсцисс – порядковые номера участков между реперными точками)

2.2. Результаты эксперимента

Результаты замеров микропластических деформаций после 80000 циклов приведены на рис. 3.

Получено (рис.3, а), что на участках 12, 15, 22, 26 и 47 микропластическая деформация составляет чуть более 5%, а на участках 37 и 46 – более 15%.

Царапание производилось при малых нагрузках на индентор $P = 5$ гр. Результаты царапания представлены на рис. 3, б.

Из сравнения результатов замеров микропластических деформаций (рис. 3, а, рис.3, б) видно, что микротвердость не зависит от знака микродеформации и экстремумы глубины, полученные при царапании (рис. 3, б), достаточно хорошо описывают локальные микропластические деформации.

При малых нагрузках на инденторе царапины носят вязко-пластический характер, без образования стружки.

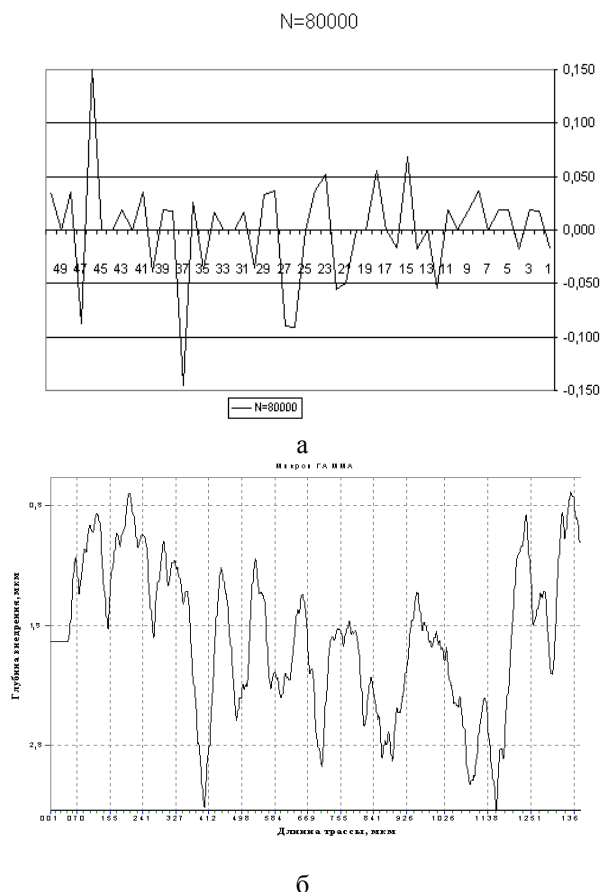


Рис. 3. а – микропластическая деформация между базовыми точками после 80000 циклов наработки (по оси ординат – относительная деформация, по оси абсцисс – порядковые номера участков между реперными точками); б – изменение глубины внедрения индентора $P = 5$ гр на базе 1500 мкм

По результатам замеров определялись законы распределения микропластических деформаций и глубины внедрения индентора при царапании (рис. 4, 5).

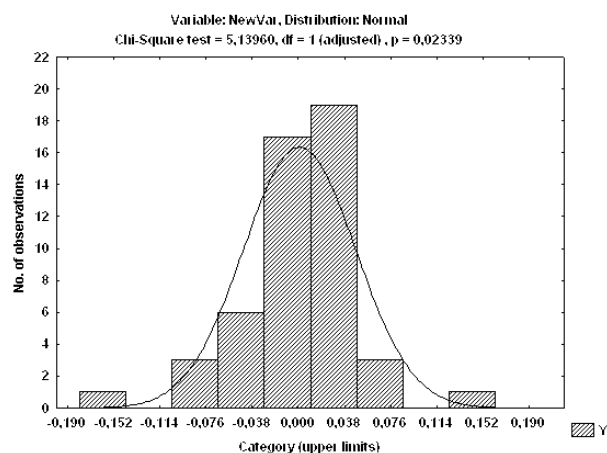


Рис. 4. Распределение микропластических деформаций; гистограмма - экспериментальные данные, линия – аппроксимация нормальным законом

Результаты замеров хорошо описываются нормальным законом распределения.

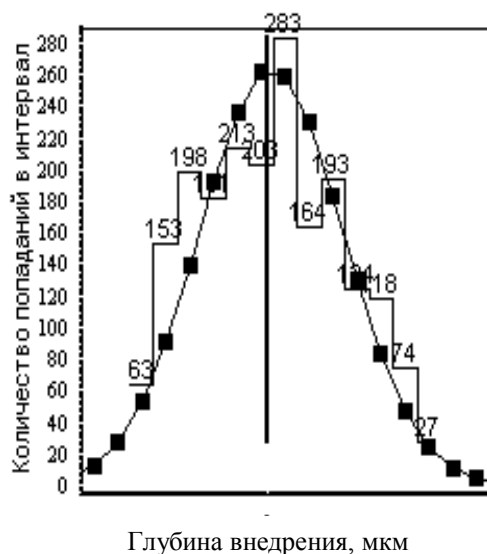


Рис. 7. Закон распределения глубины внедрения индентора при царапании: гистограмма – экспериментальные данные, линия – аппроксимация нормальным законом

Полученные результаты показывают хорошую диагностическую возможность метода царапания к идентификации микропластического деформирования.

Заключение

Представлена методика, заключающаяся в регистрации нормальной и тангенциальной составляющих силы, действующей на индентор во время царапания. Методика позволяет выявлять микропластическую и структурную неоднородность поверхностного слоя алюминиевого сплава Д-16, обусловленную усталостной поврежденностью.

Литература

1. Прокопенко А.В., Маковецкая И.А., Штукатурова А.С. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщ. 2. Неравномерность свойств на поверхности // Пробл. прочности. – 1986. – № 6. – С. 41 – 44.

2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 303 с.

3. Гурьев А.В., Столяров Г.Ю. Микроскопическое исследование развития полос скольжения и закономерностей накопления поврежденных мест в стали при усталостных испытаниях // Прочность металлов при циклических нагрузках. – М.: Наука, 1967. – С. 71 – 76.

4. 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.

5. Романов А.Н., Гаденин М.М. Особенности рассредоточенного трещинообразования в связи с неоднородностью развития деформаций при малоцикловом нагружении // Структурные факторы малоциклового разрушения металлов. – 1987. – №3. – С. 76 – 81.

6. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В. Определение комплекса механических свойств материалов в нанобъемах методами наноиндентирования // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2001. – Т.3. – №2. – С. 122 – 135.

7. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Борисов Д.И. Методика исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов при усталости с использованием многофункционального прибора «Микрон-Гамма» // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». – 2004. – №8 (16). – С. 163 – 166.

8. Коваленко В.С. Металлографические реактивы. Справочник, издание третье. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.

Поступила в редакцию 25.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Дмитриев
Национальный авиационный университет, Киев.