

УДК 620.178:539.431:620.1.08(045)

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

Национальный авиационный университет, Украина

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УСТАЛОСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРИБОРА
«МИКРОН-ГАММА»**

Рассмотрен экспериментальный метод определения физико-механических характеристик поверхностного слоя стали 0,8кп при циклическом нагружении с помощью прибора «Микрон-гамма» методом непрерывного вдавливания индентора.

усталость, микротвердость, циклическое нагружение, поверхностный слой, физико-механические свойства, ресурс, долговечность

Введение

Повышенные требования к надежности деталей авиационных ГТД, работающих в экстремальных условиях термосилового нагружения, обуславливают необходимость разработки и использования адекватных методов и средств неразрушающего контроля для оценки их технического состояния по прочностным критериям. Объектом контроля должен быть поверхностный слой деталей, в котором процессы деформирования и разрушения более интенсифицированы по сравнению с остальным объемом материала [1 – 3]. Существующие в настоящее время методы и средства контроля физико-механических свойств поверхности не всегда соответствуют требованиям прочностной диагностики из-за недостаточной чувствительности и информативности и из-за значительной трудоемкости реализации. В этой связи актуальным становится направление исследований, связанное с разработкой новых эффективных методик оценки поврежденности и прогнозирования остаточного ресурса, работающих в условиях циклического нагружения деталей ГТД по изменению физико-механических свойств поверхностных слоев материала.

1. Формулирование проблемы

В отсутствии исходных трещин технологической природы разрушение может осуществляться только

под воздействием локальных внутренних концентраций напряжений второго рода [4]. Их источниками являются различного вида дефекты кристаллической решетки, из которых по степени влияния на прочность выделяются дислокации.

Под действием переменных напряжений в металле одновременно происходят два процесса: упрочнение и разупрочнение [5]. 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.

Поскольку процесс усталостной поврежденности протекает по поверхности материала неоднородно, необходимы методы, позволяющие изучать изменения физико-механических свойств в локальных микроскопических объемах металла. В этом аспекте весьма информативным является метод определения микротвердости. Однако, стандартизованное определение микротвердости с помощью микротвердо-

мера ПМТ-3 является трудоемким (необходимость большого, статистически значимого количества замеров) и недостаточно точным (погрешность измерений отпечатков) [6]. В этой связи предлагается новое аппаратное и методическое решение данной проблемы на базе многофункционального прибора «Микрон-гамма».

2. Решение проблемы

2.1. Краткая характеристика прибора «Микрон-гамма»

Прибор (рис. 1) предназначен для исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов методами непрерывного вдавливания и сканирования индентором.

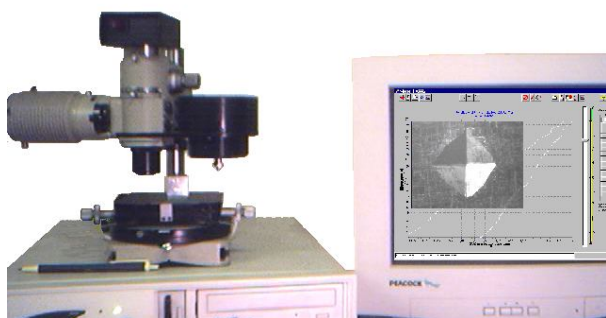


Рис. 1. Внешний вид прибора «Микрон-гамма»

Основные технические характеристики прибора:

Диапазон задаваемых нагрузок (P), гс.....1 – 500
 Измеряемая глубина внедрения (h), мкм.....0,01 – 200
 Скорость нагружения (V), гс/сек.....0,01 – 100
 Время выдержки под нагрузкой, мин.....0 – 10
 Диапазон сканирования, мм.....30 × 30
 Скорость сканирования, мкм/сек.....10 – 100

2.2. Метод непрерывного вдавливания

Метод основан на автоматической регистрации в процессе вдавливания нагрузки на индентор (P) и глубины (h) его внедрения в испытуемый материал с построением диаграммы нагружения $P = f(h)$ (рис. 2).

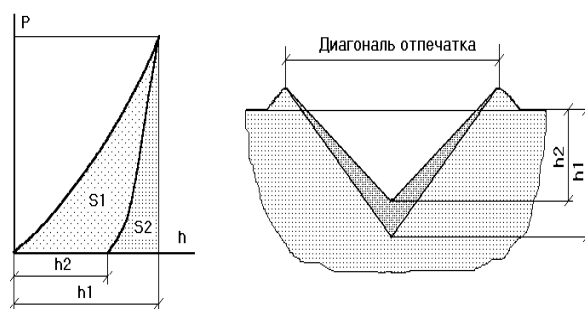


Рис. 2. Диаграмма нагружения и сечение отпечатка

Диаграмма нагружения несет в себе не только более обширную, но также и принципиально новую, по сравнению со стандартным методом испытаний на микротвердость, информацию. Метод позволяет получать данные о ходе процесса внедрения индентора, в частности, касающиеся релаксации напряжений, формоизменения материала под индентором в процессе вдавливания и при выдержке под нагрузкой.

Метод непрерывного вдавливания позволяет:

- проводить испытания на микротвердость в диапазоне малых и сверхмалых нагрузок;
- изучать особенности микродеформации материалов по кинетике внедрения индентора;
- регистрировать микроползучесть материалов;
- измерять градиент свойств по глубине внедрения;
- испытывать материалы с плохой отражающей способностью (в частности полимерные материалы), а также материалы, у которых отпечаток сильно изменяет размеры после снятия нагрузки;
- измерять хрупкость материалов по диаграмме внедрения;
- измерять характеристики упругости материалов (модуль Юнга).

По диаграмме нагружения (рис. 2) в автоматизированном режиме определяется: глубина внедрения индентора при максимальной нагрузке (h_1), глубина внедрения после снятия нагрузки (h_2); работа, затраченная на преодоление сопротивления материала вдавливанию (площадь под ветвью нагруже-

ния S_1); обратимая работа упругоэластического деформирования (площадь под ветвью разгрузки S_2) и доля необратимо поглощенной материалом энергии $s = 1 - S_2 / S_1$.

Твердость (истинная) для четырехгранной пирамиды Берковича с углом заточки 136° вычисляется по формуле

$$H_a = 0,305 \frac{P}{h^2}, \quad (1),$$

где P – максимальная нагрузка на индентор в граммах или мН; h – глубина внедрения индентора в мкм.

В табл. 1 приведены результаты испытания образцов из стали 0,8кП с концентратором в виде двухсторонней выкружки. После наработки N циклов при консольном изгибе производились замеры параметров: $h_1, h_2, S_1, S_2, s, H_a$ при $P = 40$ гр, $V = 4$ гр/с.

Таблица 1
Значения параметров сопротивления вдавлению индентора при циклическом нагружении

		N, циклов					
		0	110000	210000	310000	410000	510000
$h_1, \text{ мкм}$	D	0,039	0,096	0,069	0,067	0,12	0,166
	M	5,54	3,89	3,88	3,68	3,68	3,31
	W	0,7	2,5	1,8	1,8	3,3	5
$h_2, \text{ мкм}$	D	0,017	0,111	0,058	0,124	0,222	0,194
	M	1,97	2,21	2,28	2,25	2,18	2,15
	W	0,9	5	2,5	5,5	10,2	9
S_1	D	1,023	1,961	1,431	0,931	1,881	1,38
	M	104,31	70,49	69,84	66,33	67,64	62,16
	W	1	2,8	2	1,4	2,8	2,2
S_2	D	1,155	0,203	0,412	0,161	1,371	0,613
	M	66,01	28,02	28,16	23,87	25,75	18,79
	W	1,8	0,7	1,5	0,7	5,3	3,3
s	D	0,012	0,013	0,008	0,007	0,024	0,014
	M	0,37	0,6	0,6	0,64	0,62	0,7
	W	3,3	2,2	1,3	1	3,8	2
$H_a, \text{ ГПа}$	D	0,049	0,106	0,076	0,086	0,217	0,249
	M	1,24	1,49	1,53	1,58	1,76	1,79
	W	3,9	7,1	5	5,4	12,3	13,9

В табл. 1 обозначено: D – дисперсия измеряемого параметра; M – математическое ожидание измеряемого параметра; w – коэффициент вариации измеряемого параметра (в процентах).

Для оценки сопротивления материалов ползучести на инденторе удерживается постоянной максимальная сила P в течении заданного времени τ . При этом фиксируется зависимость глубины внедрения индентора h от τ .

2.3. Метод сканирования индентором (трибоспектральный метод)

Трибоспектральный метод базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению нагруженного с заданной силой индентора по поверхности материала. Регистрируются сигналы, пропорциональные нормальной и касательной к поверхности, составляющим силы трения (рис. 3).

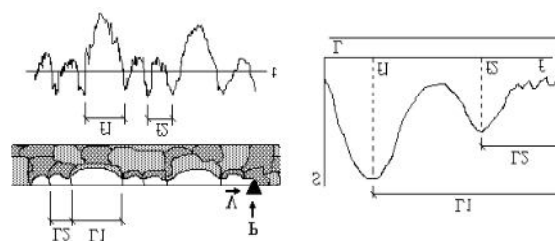


Рис. 3. Схема трибоспектрального метода

Статистическая обработка сигналов позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя вдоль трассы сканирования и, в частности, дает возможность:

- оценивать среднюю прочность поверхностного слоя по трассе сканирования;
- оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств;
- моделировать элементарные акты процессов трения и износа (микрорезания, микроскольжения и т.п.).

Если исследуемая поверхность вдоль трассы сканирования индентора состоит из твердых (и мелких L2) и мягких (и крупных L1) фрагментов, сигнал будет иметь характерные частоты (f_1, f_2), а спектральная плотность сигналов $S = \varphi(f)$ даст прочностной портрет поверхности (рис. 3). По графику спектральной плотности можно судить о размерах, количестве и о прочности фрагментов на трассе сканирования.

На рис. 4 представлены трибограммы нормальной составляющей силы трения, полученные в наи-

более нагруженном сечении образцов из стали 8кп после различного числа циклов нагружения.

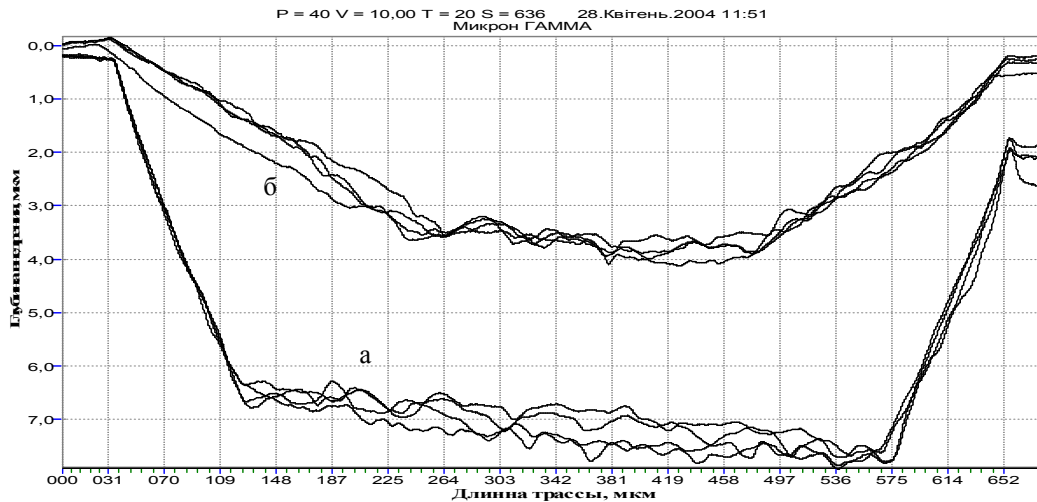


Рис. 4. Трибограммы нормальной составляющей силы трения: а – после наработки $N = 0$; б – после наработки $N = 510000$ ($P = 40$ гр, $V = 10$ гр/с, $T = 20$ с, $L = 636$ мкм)

Из графиков видно как существенно изменяется сопротивление материала царапанью с увеличением циклической наработки. Сканирование поверхности при минимальной нагрузке на индентор ($\approx 0,1$ г) позволяет регистрировать параметры шероховатости поверхности и строить ее трехмерный профиль (рис. 5).

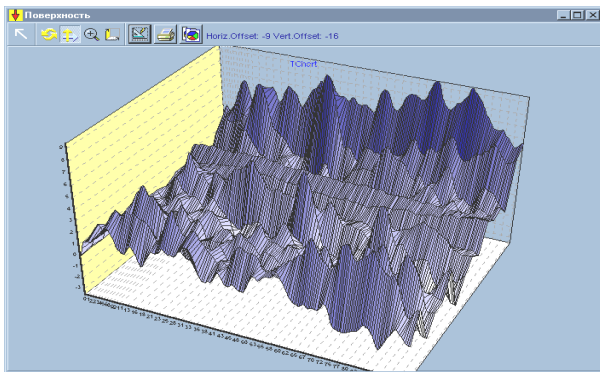


Рис. 5. Трехмерная профилограмма поверхности образца

Заключение

Представленная методика исследования физико-механических свойств материалов с непрерывной регистрацией процесса вдавливания и перемещения индентора позволяет получать ценную диагностическую информацию о состоянии поверхностного слоя материалов.

Литература

1. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела. – 1980. – 22, № 1. – С. 3344 – 3349.
2. Немец Я. Развитие усталостных трещин // Проблемы прочности. – 1988. – № 7. – С. 9 – 18.
3. Прокопенко А.В., Маковецкая И.А., Штукатурова А.С. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщ. 2. Неравномерность свойств на поверхности // Проблемы прочности. – 1986. – № 6. – С. 41 – 44.
4. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1978. – 352 с.
5. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 303 с.
6. Булычев С.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. Исследование физико-механических свойств материалов в приповерхностных слоях и в микрообъемах методом непрерывного вдавливания индентора (обзор) // Физика и химия обработки металлов. – 1979. – № 5. – С. 69 – 81.

Поступила в редакцию 24.05.2004

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