

# МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Фадеев А. Ю., Шитарев И. Л., Проничев Н. Д., Смирнов Г. В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Современный авиационный двигатель является сложным и трудоемким в изготовлении изделием. К нему предъявляются высокие эксплуатационные требования. Поэтому при производстве двигателя уделяют большое внимание вопросам повышения качества изготовления всех составляющих его элементов с целью увеличения надежности и ресурса ГТД.

К параметрам, влияющим на надежность и ресурс лопаток компрессора ГТД, изготавливаемым методом ЭХО, относится качество поверхностного слоя, формирование которого определяется целым рядом факторов: свойствами обрабатываемого материала, составом рабочей среды, электрическими, гидродинамическими и другими параметрами. В зависимости от наличия этих факторов и их соотношения может существенно измениться механизм формирования микрогеометрии. Кроме того, характерными признаками этих лопаток являются: сложная пространственная форма, ажурность, наличие большого количества переходов от одного вида поверхностей к другим, недоступность и фактически малая пригодность этих лопаток для существующих в настоящее время методов и средств контроля. Поэтому возникает необходимость разработать методику комплексного изучения поверхностного слоя титановых сплавов после ЭХО в разных электролитах.

Для количественной оценки микронеровностей в зависимости от структуры сплавов предусматривается снятие профилограммы поверхности после ЭХО при строгом фиксировании трассы шупа измерительного прибора на образце и совмещении полученной профилограммы с фотографией микроструктуры. Важным условием проведения этих исследований является выбор таких режимов ЭХО, при которых на поверхности отсутствует окисная пленка и хорошо видна микроструктура сплава без дополнительного протравливания.

По профилограммам, снятым на профилографе-профилометре модели 250 производится измерение микронеровностей. Масштабы увеличений выбираются из условий точного описания поверхности (величина зерна, высота неровностей, ширина границ и др.). Важным условием точного совмещения профиля микронеровностей и микроструктуры поверхности является нанесение реперных рисок.

Схема нанесения рисок и трассирования профилограммы показана на рис.1.

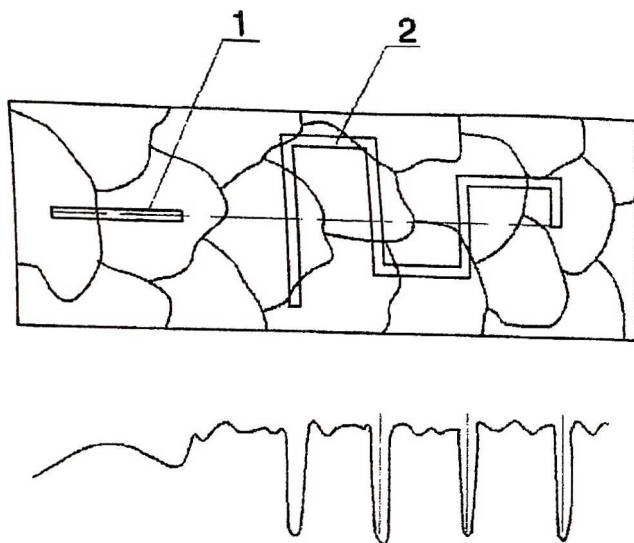


Рис. 1. Схема нанесения рисок и трассирования профилограммы:

1 - направляющая риска; 2 - контрольная риска

Риски наносятся с помощью алмазной пирамидки на приборе ПМТ-3, их расстояние и длина выбираются из условий возможности точной установки алмазной иглы прибора для записи профилограммы, а также с учетом принятого горизонтального масштаба.

Формирование микрогеометрии поверхностного слоя при электрохимической обработке предполагает воздействие как случайных факторов (например, пробой окисной пленки), так и закономерно изменяющихся факторов (например, преимущественное травление границ зерен). При этом профилограмма шероховатости поверхности будет отражать весь комплекс случайных и систематических воздействий, т.е. состоять из двух составляющих: систематической  $u_B$  ( $\chi$ ) и случайной  $u_\gamma$  ( $\chi$ ). Если наличие периодичности профиля поверхностей, обработанных точением, фрезерованием, сверлением и другими видами механической обработки с помощью металлорежущих инструментов, принципиально не вызывает сомнений, то периодичность профиля поверхности, обработанной электрохимическим методом не имеет объяснения.

В настоящее время разработан математический аппарат, позволяющий оценить величины систематической и случайной составляющих [1, 2, 3].

Анализ существующих видов обработки показывает, что уровень случайной составляющей в профиле поверхностей, обработанных абразивным инструментом, значительно выше, чем в профиле поверхностей, обработанных металлорежущими инструментами, и близок к единице (таблица 1).

Таблица 1

**Коэффициент случайности (неоднородности) профиля**

Вид обработки		$\gamma$
Фрезерование цилиндрическое	черновое	0,15-0,35
	получистовое	0,35-0,75
Точение	черновое	0,15-0,31
	чистовое	0,62-0,72
Знекерование		0,45-0,75
Сверление		0,50-0,80
Шлифование	черновое	0,60-0,70
	чистовое	0,80-0,92
Полирование	черновое	0,78-0,82
	чистовое	0,90-0,96
Хонингование	чистовое	0,83-0,96
Электроискровая обработка		0,85-0,97

Данные таблицы подтверждают реальность двух моделей шероховатости: случайной и систематической.

Для оценки случайной стационарной функции используется корреляционная функция. Она показывает степени зависимости сечений случайной функции, разделенных промежутком  $\tau$ . Очевидно, что всегда при малых  $\tau$  значение случайной функции связано более тесной зависимостью, чем при больших  $\tau$ . Величина  $\tau_{кор}$ , при которой корреляционная связь внутри случайной функции совершенно исчезает, называется шагом корреляции. Расчет корреляционной функции ведется на ЭВМ. На практике вместо корреляционной функции  $K(\tau)$  часто пользуются нормированной корреляционной функцией (рис.2).



Рис. 2. Коррелограмма поверхности

Не приводя математических преобразований, выполненных в работе [4] приведем структурную формулу коррелограммы профиля, содержащего систематическую и случайную составляющие:

$$K(\tau) = K_{\beta}(\tau) + K_{\gamma}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n A_i^2 \cos \frac{2\pi}{T_i} \tau + K_{\gamma}(\tau), \quad (1)$$

где  $A_i$  и  $T_i$  - амплитуда и шаг  $i$ -ой систематической составляющей профиля. Коррелограмма профиля, содержащего систематическую  $u_{\beta}(\chi)$  и случайную  $u_{\gamma}(\chi)$  составляющие, в свою очередь, состоит из коррелограммы  $K_{\beta}(\chi)$  систематической и коррелограммы  $K_{\gamma}(\chi)$  случайной составляющих исследуемого профиля.

Корреляционное преобразование профиля дает возможность получить большее количество информации о шероховатости поверхности. Полученные профилограммы обрабатываются с помощью ЭВМ.

Следующий этап обработки заключается в определении систематической и случайной составляющих профиля используя данные распечаток и графики корреляционной функции.

Затем определяется коэффициент концентрации напряжений по формуле:

$$\alpha_T = 1 + 4\pi n R_g \quad (2)$$

где  $n = \frac{1}{T}$  — среднее число пересечений контуром шероховатости

нулевого уровня;

$T$  - шаг;

$R_g$  - среднее квадратичное отклонение высоты шероховатости.

А по формуле, приведенной в работе [1] определяется шероховатость обработанной поверхности.

$$R_a = 0,9 R_g \quad (3)$$

В таблице 2 приведены значения коэффициента концентрации

напряжений для поверхностей, подвергнутых различным видам механической обработки.

Таблица 2

Значения коэффициента концентрации напряжения

Вид обработки	$\alpha$
Шлифование черновое	1,25-1,43
Шлифование получистовое	1,15-1,26
Шлифование чистовое	1,21
Протягивание	1,27
Хонингование	1,09
Притирка	1,07-1,10
Суперфиниш	1,09
ЭХО титановых сплавов в электролитах:	
NaCl+NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O	1,03
NaCl+KBr+H <sub>2</sub> O	1,28
NaCl +H <sub>2</sub> O	1,31

Очень важной задачей является исследование влияния ЭХО на сопротивление усталости материалов, из которых изготавливают лопатки компрессоров ГТД, работающие со знакопеременной нагрузкой. Для этого разработана методика исследования влияния качества поверхностного слоя, сформированного в процессе ЭХО, на сопротивление усталости лопаток компрессора ГТД.

На первом этапе осуществляется электрохимическая обработка исследуемой поверхности на специальной установке на заранее изготовленных образцах. Для уменьшения погрешности формы образца ему придается вращение. Далее проводится испытание лопаток на усталость на установке, включающей электродинамический вибростенд, имеющей системы крепления испытываемой лопатки, измерения параметров испытания и автоматического управления испытаниями. Для измерения возникающих в лопатке переменных напряжений лопатки препарируются тензорезисторами с базой 3 мм. При появлении усталостной трещины в лопатке меняется ее резонансная частота колебаний. Эти изменения регистрируются системой управления и при снижении частоты на 2% от исходного значения (что соответствует появлению усталостной трещины протяженностью 2 - 5 мм) испытание прекращается и фиксируется число циклов нагружения для данной лопатки.

Явление усталости имеет статистическую природу, вследствие чего и обработку результатов испытаний на усталость необходимо проводить на базе методов математической статистики [5], для чего составлена программа для персонального компьютера.

В результате проведения испытаний на усталость устанавливается связь между амплитудой напряжения и долговечностью лопатки. Амплитуда напряжений является независимой величиной и ее значения задаются при испытании. Долговечность является случайной величиной, подчиняющейся логарифмически нормальному закону распределения. С помощью линейного регрессивного анализа устанавливается связь между нормально распределенной величиной  $\log N$  и неслучайной величиной  $\sigma_a$  [4].

Долговечность для заданной вероятности разрушения  $P$  определяется по формуле:

$$N_p = 10^{z_p \cdot S + y}, \quad (4)$$

где  $N_p$  - долговечность для вероятности разрушения  $P$ ;

$z_p$  - квантиль нормального распределения для вероятности разрушения  $P$ ;

$S$  - дисперсия;

$y$  - значение, определяемое линией регрессии [4].

Далее проводится дисперсионный анализ результатов испытаний для оценки влияния отдельных факторов на усталость лопаток. Проверка значимости влияния на сопротивление усталости прочности лопатки компрессора производится при помощи критерия Фишера  $F$  [6].

#### Список литературы

1. Хусу А. П., Виттенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. - М.: Наука, 1975. - 344 с.
2. Виттенберг Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. - Л.: Судостроение, 1971 - 105 с.
3. Виттенберг Ю. Р. Система характеристик шероховатости поверхностей. - "Вестник машиностроения", 1970. №11 - с 56 - 58.
4. Степанов М. А. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972. - 229 с.
5. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. - 511 с.
6. Саушкин Б. П., Петров Ю. Н., Нистрян А. З., Маслов А. В. Электрохимическая обработка изделий из титановых сплавов.