

УДК 621.45.0.002

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ**

© 2017 Г. В. Смирнов, Н. Д. Проничев, М.В. Нехорошев, Е.М. Добрышкина

Самарский национальный исследовательский университет им. С. П. Королёва

Статья поступила в редакцию 20.12.2017

В статье приведена методика комплексного исследования качества поверхностного слоя сталей и сплавов после электрохимической обработки. Также показана методика усталостных испытаний лопаток и анализа влияния отдельных факторов на сопротивление усталости.

*Ключевые слова:* шероховатость поверхности, электрохимическая обработка, корреляционный анализ, коэффициент концентрации напряжений, предел длительной прочности.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Газотурбинные двигатели (ГТД) отличаются высокой сложностью конструкции и значительной трудоемкостью изготовления [1-2]. К двигателю предъявляются жесткие требования в процессе эксплуатации. Это диктует повышенное внимание при производстве ГТД вопросам повышения качества изготовления всех составляющих его элементов с целью увеличения надежности и ресурса. Одними из наиболее ответственных деталей, определяющих его надежность и ресурс в процессе эксплуатации, являются компрессорные лопатки [3]. К параметрам, влияющим на надежность и ресурс лопаток компрессора ГТД, относится качество поверхностного слоя, формирование которого определяется целым рядом факторов. В технологию изготовления компрессорных лопаток часто включают электрохимическую размерную обработку (ЭХО) для формообразования профиля пера. ЭХО обладает рядом преимуществ по сравнению с механической, обработкой профиля, так как не создает в обработанной поверхности значительных остаточных напряжений. В то же время, электрохимическое растворение припуска в процессе обработки пера формирует на обработанной поверхности определенную микрогеометрию, которая будет зависеть от свойств обрабатываемого материала, состава электролита, электрических, гидродинамических и других параметров режима обработки.

*Смирнов Геннадий Владиславович, доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей. E-mail: GVSmirnoff@yandex.ru*

*Проничев Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей. E-mail: pronichev2008@rambler.ru*

*Нехорошев Максим Владимирович, старший преподаватель кафедры ТПД. E-mail: maxnogoood@gmail.com*

*Добрышкина Елена Михайловна, аспирант. E-mail: dobryshkina3@mail.ru*

Наличие этих факторов и изменение их соотношения существенно меняет механизм формирования микрогеометрии.

В связи с этим возникает необходимость разработать методику комплексного исследования микрогеометрии поверхностного слоя сталей и сплавов после ЭХО в различных электролитах.

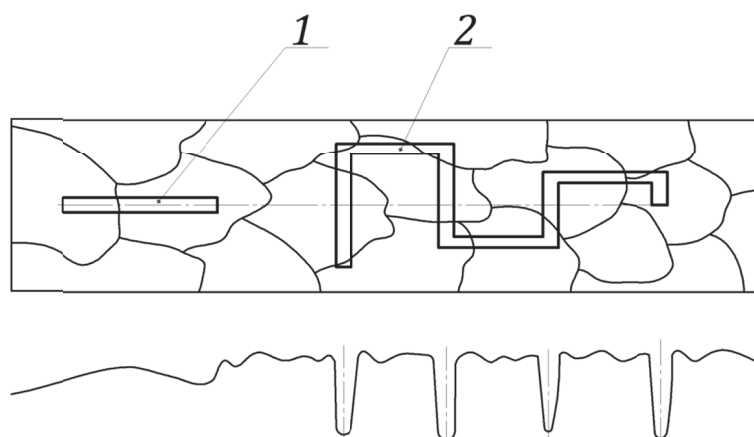
**2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

С целью количественной оценки микронеровностей в зависимости от изменения указанных факторов предлагается использование совместного анализа профилограмм и фотоизображений одноименных участков обработанной поверхности. Для этого снимают профилограмму поверхности после ЭХО. При этом строго фиксируют трассу щупа измерительного прибора на образце. Затем фотографируют этот участок поверхности и совмещают полученную профилограмму с фотографией микроструктуры. Однако, важным условием успешности совместного анализа является выбор таких режимов ЭХО, при которых на обработанной поверхности отсутствует окисная пленка и хорошо видна микроструктура сплава без дополнительного протравливания.

С помощью профилограмм, полученных на профилографе-профилометре производится измерение микронеровностей. Масштаб увеличения выбирается из условия точного описания поверхности исходя из ожидаемой величины зерна, высоты неровностей, ширины границ и др. Для точного совмещения профиля микронеровностей и фотографии микроструктуры на поверхности наносятся реперные риски, которые позволяют точно идентифицировать анализируемую область.

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

Направляющая риска определяет трассу перемещения щупа, а контрольные риски иден-



**Рис. 1.** Схема нанесения рисок и трассирования профилограммы: 1 – направляющая риска; 2 – контрольная риска. Внизу – профилограмма поверхности

тифицируют анализируемый участок поверхности.

Риски наносятся с помощью алмазной пирамидки на приборе ПМТ. Длина контрольных рисок и расстояние между ними выбирают из условий возможности точной установки алмазной иглы прибора для записи профилограммы, а также с учетом принятого горизонтального масштаба.

При формировании микрогеометрии поверхностного слоя в процессе электрохимической обработки действуют как случайные факторы (например, пробой окисной пленки), так и закономерно изменяющиеся (например, преимущественное травление границ зерен). Поэтому профилограмма шероховатости поверхности будет отражать весь комплекс случайных и систематических воздействий. То есть, в ее составе будут две составляющие: систематическая  $u\beta(\chi)$  и случайная  $u\gamma(\chi)$ . Периодичность профиля поверхностей, обработанных точением, фрезерованием, сверлением и другими видами механической обработки на металлорежущих станках, объяснима и принципиально не вызывает

сомнений. Однако периодичность профиля поверхности, обработанной электрохимическим методом объяснить затруднительно.

Известен и широко используется математический аппарат, позволяющий оценить величины систематической и случайной составляющих [4-8].

Анализируя различные методы обработки поверхностей можно заключить, что уровень случайной составляющей в профиле поверхностей, обработанных абразивным инструментом, значительно выше, чем в профиле поверхностей, обработанных лезвийными инструментами, и близок к единице (табл. 1).

Обычно для оценки случайной стационарной функции используют корреляционную функцию. 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  $\tau$ . Величину  $\tau_{кор}$ , при которой корреляционная связь внутри случайной функции совершенно исчезает, называют шагом корреляции. На практи-

**Таблица 1.** Коэффициент случайности  $\gamma$  (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
Зенкерование		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

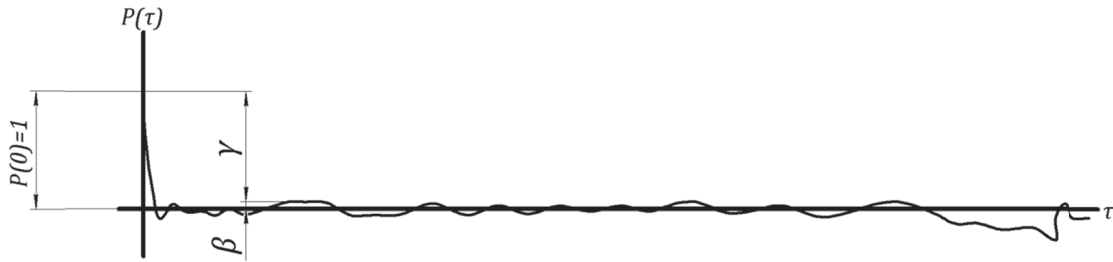


Рис. 2. Коррелограмма поверхности

ке вместо корреляционной функции  $K(\tau)$  часто пользуются нормированной корреляционной функцией (рис. 2).

Структурная формула коррелограммы профиля, содержит 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 и состоит из следующих шагов.

Полученные экспериментально профилограммы обрабатываются с использованием ЭВМ для получения коррелограмм.

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

Затем определяется коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_T$ :

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

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

шероховатости нулевого уровня;

$T$  – шаг микронеровностей;

$R_g$  – среднее квадратичное отклонение высоты шероховатости. Затем определяется шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ .

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

В табл. 2 приведены значения коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_T$  для поверхностей, подвергнутых различным видам механической обработки.

Для определения коэффициента концентрации напряжений была составлена и отлажена оригинальная программа расчета.

За счет существенного сокращения времени обработки результатов в автоматизированном режиме наиболее трудоемкой ее части она открывает возможности моделирования процесса формирования шероховатости в зависимости от изменения различных факторов, влияющих на случайные и систематические составляющие шероховатости профиля. Использование данной программы позволяет существенно ускорить обработку результатов, повысить их точность. Кроме того, путем последовательных приближений можно решать обратную задачу: моделировать профиль, обеспечивающий минимальный коэффициент концентрации напряжений и, таким образом, формировать требования к режимам обработки.

Таблица 2. Значения коэффициента концентрации напряжения  $\alpha_T$

Вид обработки	$\alpha_T$
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+NH4NO3+H2O	1,03
NaCl+KBr+H2O	1,28
NaCl +H2O	1,31

Еще одним важным аспектом оценки качества поверхности является исследование количественного влияния состояния поверхностного слоя после ЭХО на сопротивление усталости материалов, из которых изготавливают лопатки компрессоров ГТД. С этой целью была разработана методика исследования влияния качества поверхностного слоя, сформированного в процессе ЭХО пера лопаток, на сопротивление усталости лопаток компрессора ГТД.

Для этого проводится электрохимическая обработка исследуемой поверхности на специальной установке на заранее изготовленных образцах. Для уменьшения влияния погрешности формы образца ему придается вращение. Прошедшие электрохимическую обработку образцы проходят усталостные испытания. Т.е. определяется величина  $\sigma_{-1}$  при базовом числе циклов нагружения.

Далее проводятся усталостные испытания лопаток, перо которых предварительно обрабатывается методом ЭХО на сравниваемых режимах. Установка усталостных испытаний лопаток включает электродинамический вибростенд, имеющей системы крепления испытываемой лопатки, системы 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. Изменения частоты регистрируются системой управления и при снижении частоты на 2% от исходного значения (это 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 проводят с использованием методов математической статистики [9].

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  $\sigma_a$  [9].

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

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

где  $N_p$  – долговечность (число циклов нагружения) для вероятности разрушения  $P$ ;

$Z_p$  – квантиль нормального распределения для вероятности разрушения  $P$ ;

$S$  – дисперсия;

$y$  – значение, определяемое линией регрессии [9].

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  $F$ .

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полный цикл исследования поверхности, предварительно обработанной методом ЭХО, проведенный по данной методике позволяет сделать надежное заключение о ее качестве и сделать определенные выводы о влиянии параметров ЭХО на сопротивление усталости. Тем самым, оказать влияние на качество компрессорных лопаток, которые в значительной степени определяют качество изделия.

### 4. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гречников Ф.В., Бобровский И.Н., Ерисов Я.А., Хаймович А.И.* Инициатива «геном материала» в мире и Российской Федерации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. №1(3). С. 563-573
2. *Костышев В.А., Ерисов Я.А.* Изготовление колец для газотурбинных двигателей горячей раскаткой сварных заготовок // Вестник машиностроения. 2017. №3. С. 53-56.
3. *Нехорошев М.В., Пронищев Н.Д., Смирнов Г.В.* Автоматизированное профилирование электродов-инструментов при импульсной электрохимической обработке // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2014. № 5-3 (47). С. 158-166.
4. *Хусу А. П., Виттенберг Ю. Р., Пальмов В. А.* Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 344 с.
5. *Виттенберг Ю.Р.* Шероховатость поверхности и методы ее оценки. Л.: Судостроение, 1971. 105 с.
6. *Фетисов М.Д., Шакуров Н.Г.* Формирование системы оценки шероховатости поверхности на основе математических методов анализа качества // В сборнике: Материалы Всероссийской 40-й научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в 3-х томах. Ответственный редактор К.Т. Тынчеров; Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2013. С. 181-184.
7. *Безъязычный В.Ф., Тимофеев М.В., Елкин М.С.* Методика комплексного экспериментального исследования параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных концевыми фрезами // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2015. № 3(34). С. 63-68.

8. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Мониц С.Г. Влияние электродоконтантной и последующей электрохимической обработки поверхности металлических имплантов на ее шероховатость и прочность соединения с имитатором костной ткани. // Вестник Белорусско-Российского университета. 2014. № 4. С. 21-29.
9. Степанов М. А. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972. 229 с.

#### DEVELOPMENT OF THE METHOD OF COMPLEX RESEARCH OF QUALITY OF SURFACE LAYER AFTER ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF STEELS AND ALLOYS

© 2017 G.V. Smirnov, N.D. Pronichev, M.V. Nekhoroshev, E.M. Dobryshkina

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

In the article the technique of complex research of quality of a surface layer of steels and alloys after electrochemical processing is resulted. Also shown is the fatigue test procedure for loach bags and an analysis of the influence of individual factors on fatigue resistance.

*Keywords:* Surface roughness, electrochemical processing, correlation analysis, stress concentration factor, ultimate strength limit.

---

*Gennady Smirnov, Doctor of Technics, Professor at the Engine Technology Department. E-mail: GVSmirnoff@yandex.ru*

*Nicholay Pronichev, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Engine Theory Department.*

*E-mail: pronichev2008@rambler.ru*

*Maksim Nekhoroshev, Senior Lecturer.*

*E-mail: maxnogood@gmail.com*

*Elena Dobryshkina, Postgraduate Student.*

*E-mail: dobryshkina3@mail.ru*