

И. В. Герасимов, В. С. Олешко, Д. П. Ткаченко,
А. П. Кирпичников

КОНТРОЛЬ ПРИЖОГОВ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки компрессора, прижоги, неразрушающий контроль, работа выхода электрона, контактная разность потенциалов.

Рассмотрена проблема прижогов лопаток из титановых сплавов компрессора газотурбинного двигателя. Рассмотрены методы контроля прижогов. Разработан автоматизированный прибор измерения контактной разности потенциалов. Разработана методика неразрушающего контроля прижогов лопаток по изменению работы выхода электрона, измеряемой методом контактной разности потенциалов.

Key words: gas turbine engine, compressor blade, burns, nondestructive testing, electron work function, contact potential difference.

The problem occurrence of burns of titanium compressor blade are considered. The methods of burns-control is considered. The automated device of measurement of a contact potential difference is developed. The technique of not destroying burns-control of blade on change of electron work function, a contact potential difference measured by a method is developed.

Исходные данные и цель работы

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) работают в тяжелых условиях — подвергаются воздействию высокочастотных знакопеременных нагрузок и центробежных сил, эрозионному воздействию, соударению с посторонними предметами. Поэтому актуальной задачей является обеспечение высоких прочностных характеристик материала лопаток компрессора ГТД, на которые в значительной степени влияет технология их изготовления или ремонта. При производстве и ремонте ГТД важнейшим является контроль качества готовых изделий.

Лопатки первых ступеней компрессоров отечественных ГТД изготавливают из титановых сплавов. В процессе производства и капитально-восстановительного ремонта ГТД лопатки компрессоров обрабатывают машинным и ручным шлифованием, полированием, глянцеваанием. Так, к примеру, шлифование лопаток из сплавов ВТ3-1, ВТ5-1, ВТ9 производят на станках ШКР-2Б, СК-100-2, 3Е711В с применением кругов из карбида кремния или оксида алюминия. Полирование и глянцеваание лопаток производят на ленточно-полировальных станках ЛВП-3, полировальных бабках ОС-212, С-86 с помощью войлочных полировальников, накатанных шлифовальным зерном и полировальной пастой.

Процесс микрорезания характеризуется повышенным тепловыделением, образованием значительных контактных температур в зоне резания, очень высокой (почти мгновенной) скоростью нагрева и высокой концентрацией теплоты в тончайших поверхностных слоях обрабатываемой лопатки. Температура в зоне микрорезания колеблется в широких пределах, в среднем, от 250 до 1500 °С. При этом, в среднем, у 11 % лопаток из титановых сплавов возникают прижоги. Прижогами (или ожогами) называются местные изменения структуры и фазового состава металла в результате локального перегрева поверхности в зоне обработки. Прижоги могут появ-

ляться и в процессе эксплуатации ГТД при касании торцов рабочих лопаток об уплотнительный материал статора компрессора.

Основными причинами прижогов лопаток из титановых сплавов являются:

- свойства титана: низкая теплопроводность (в 13 раз ниже, например, чем у алюминия), высокая удельная прочность, высокая физико-химическая активность к окислительным процессам, высокий коэффициент трения;

- специфические условия, возникающие при резании титановых сплавов: большая энергия резания, импульсное приложение сил резания, налипание металла на вершины зерен шлифовальных кругов.

Кроме того, появление прижогов в большой степени зависит от строгого соблюдения шлифовальщиком технологии обработки лопаток. Процент возникновения прижогов лопаток увеличивается при выполнении шлифования исполнителем с низкой квалификацией, при освоении производства или ремонта новых ГТД. Также количество прижогов увеличивается при шлифовании лопаток компрессоров, имеющих малые размеры, из-за худших условий отвода тепла из лопатки.

Прижоги сопровождаются изменением механических свойств обработанной поверхности, возникновением поверхностных остаточных напряжений растяжения, которые могут привести к образованию трещин. Выявленные прижоги подлежат удалению полированием лопатки. Однако появление новых прижогов на поверхности лопатки в настоящее время более не контролируется, что также является недостатком.

Слабые прижоги невооруженным глазом увидеть невозможно. По принятой в настоящее время в моторостроении и на авиаремонтных предприятиях технологии прижоги лопаток из титановых сплавов контролируют методом химического травления в водных растворах кислот, например, азотной и плавиковой. Прижоги выявляются в виде белых пятен и полос, которые появляются из-за различных

скоростей травления в месте прижога по сравнению с неповрежденной поверхностью лопатки.

Контроль прижогов химическим травлением имеет недостатки. Данный метод контроля прижогов трудоемок, требует больших затрат, экологически опасен. Кроме того, по внешнему виду пятен выявленных прижогов невозможно оценить глубину прижога и целесообразность его удаления. При химическом травлении повышается чувствительность к концентраторам напряжений, чему способствует более быстрое растравление металла по границам зерен. Продукты же травления являются катализаторами межзеренной коррозии.

В литературе встречается информация о возможности выявления прижогов деталей из титановых сплавов также вихретоковым и ультразвуковым методами неразрушающего контроля, измерением микротвердости, посредством проведения металлографических исследований лопатки. Известен также способ выявления прижогов, заключающийся в нанесении на поверхность объекта контроля (ОК) вещества, электризующегося при растирании и светящегося в ультрафиолетовом свете. Однако все перечисленные методы, кроме металлографического, имеют те или иные недостатки, а главное не позволяют определить глубину прижогов. Таким образом, требуется разработка оперативного метода контроля прижогов — неразрушающего, недорогого, позволяющего определять глубину прижога и безопасного.

Экспериментальная часть

В целях выяснения природы прижогов авторами проведены металлографические исследования лопаток из $(\alpha+\beta)$ -титанового сплава ВТ3-1 компрессоров двигателей РД-33 2-й серии и РД-93 с применением инвертированного металлографического микроскопа «Axiovert 40 MAT», сканирующего электронного микроскопа «Tesla BS 301». Перед металлографическими исследованиями микрошлифы травились в течение 15 с в растворе состава: вода 650 см³, HCl 350 см³, HF 150 см³. На рис. 1 представлена фотография (с 200-кратным увеличением) прижога лопатки из сплава ВТ3-1.

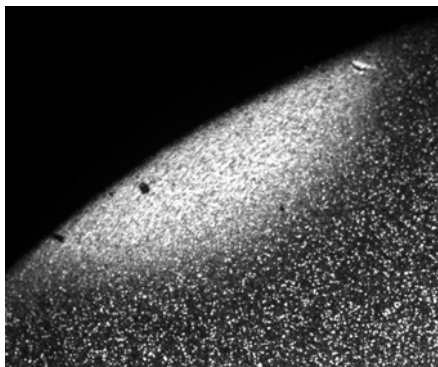


Рис. 1 - Прижог лопатки из сплава ВТ3-1

При прижогах в сплаве ВТ3-1 изменяется структура — уменьшается размер зерен и изменяет-

ся фазовый состав — исчезает β -фаза титана (на рис. 1 показана темным цветом). При этом микротвердость в месте прижога, измеренная на установке ПМТ-3, увеличивалась на 17–32 %. Исследованные нами прижоги имели глубину от 0,5 до 4 мм.

Нами предлагается для выявления прижогов применять определение флюктуаций работы выхода электрона (РВЭ) на поверхности лопаток. Прижоги возникают в поверхностных слоях лопаток, явления в которых обусловлены технологией изготовления или ремонта, влиянием окружающей среды, характеризуются взаимным переплетением множества физических и химических процессов. Большое влияние на протекание данных процессов оказывает величина свободной поверхностной энергии твердого тела на границе раздела сред. Важнейшей характеристикой поверхностной энергии является РВЭ — энергия, необходимая для удаления электрона из сферы влияния атомов твердого тела. Знание величины РВЭ позволяет с большой точностью определить поверхностную энергию металлических деталей, проследить за изменением состояния их поверхностных слоев, выявлять зарождение и развитие дефектов [1].

Распространенным методом определения РВЭ является метод контактной разности потенциалов (КРП), в котором РВЭ определяется посредством измерения КРП между электродом сравнения (с известной РВЭ) и исследуемым металлом. КРП возникает между двумя различными металлами при их сближении или соприкосновении. КРП возникает из-за наличия в металлах электронов проводимости, находящихся в непрерывном движении. При приближении к границе металла наиболее быстрые из них, то есть обладающие достаточной кинетической энергией, проникают через границу в соседний металл. Аналогичный переход совершается и в обратном направлении (рис. 2).

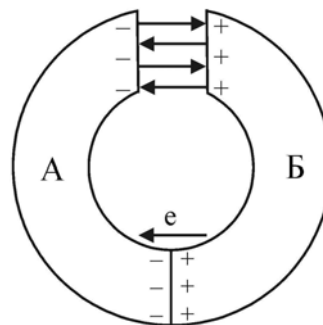


Рис. 2 - Схема возникновения КРП

Количество электронов, совершающих переход из металла А в металл Б (рис. 2), зависит от концентрации в них электронов и от сил, удерживающих электроны в данном металле, то есть от РВЭ ϕ . В том случае, когда от первого металла А ко второму Б переходит электронов меньше, чем обратно ($\phi_A > \phi_B$), то прилегающие к границе слои первого металла А заряжаются отрицательно, а слои второго металла Б — положительно. Возникающая при этом разность потенциалов между двумя металлами препятствует выходу электронов из первого и

способствует выходу их из второго. В результате этого количество электронов, проходящих через границу в том и другом направлении, становится одинаковым. При этом по обе стороны контакта устанавливается КРП U_k :

$$U_k = (\varphi_A - \varphi_B) / e, \quad (1)$$

где φ_A — РВЭ металла А;
 φ_B — РВЭ металла Б;
 e — заряд электрона.

Если же вместо металла А подставить металл измерительного электрода с известной РВЭ φ_A , а вместо металла Б — металл ОК, измерить КРП U_k , то, преобразовав формулу (1), можно вычислить искомую φ_B :

$$\varphi_B = \varphi_A - U_k \cdot e. \quad (2)$$

Преимуществами измерения РВЭ методом КРП являются достаточно высокая чувствительность (до 0,1 мВ), простота и высокая производительность измерения, то, что данный метод измерений является неразрушающим и косвенным, то есть не оказывающим влияния на ОК.

Авторами под руководством кандидата технических наук, доцента, Заслуженного изобретателя России Э.А. Кочарова разработан прибор измерения КРП «Поверхность-11», функциональная схема которого показана на рис. 3.



Рис. 3 — Функциональная схема прибора «Поверхность-11»

Разработанная схема прибора «Поверхность-11» обеспечивает достаточно малую погрешность — не более 1,5 мВ и производительность (продолжительность одного измерения составляет 4 с, что для измерителей КРП является хорошим показателем). Датчик прибора «Поверхность-11» с выносным щупом длиной 35 мм разрабатывался специально для выявления прижогов, расположенных на лопатках компрессоров, имеющих достаточно сложную для измерения КРП форму. Измерительный электрод датчика диаметром 4 мм изготовлен из никеля с РВЭ 4,5 эВ.

Габариты прибора без датчика 180×160×125 мм, масса 700 г. Датчик прибора имеет максимальные габариты 207×60×18 мм, массу около 150 г.

Имеется возможность документирования и передачи результатов измерений КРП на компьютер для последующей обработки.

Наличие и границы прижогов определяются по изменению КРП на границе перехода от неповрежденной части к прижогу при сканировании поверхности лопатки датчиком прибора «Поверхность-11». В месте прижога, по мере увеличения его интенсивности и глубины, КРП уменьшается более чем на 90 мВ, соответственно РВЭ на эту же величину увеличивается. В настоящее время авторами проводятся исследования по определению зависимости РВЭ от интенсивности и глубины прижога, разрабатывается методика применения прибора «Поверхность-11» в целях неразрушающего контроля прижогов лопаток из титановых сплавов. По результатам проводимой работы выдан патент на изобретение [2].

Необходимо отметить, что метод КРП очень чувствителен к чистоте поверхности металла, на которой производятся измерения. Так как все металлы электроположительны, то есть легко отдают электроны, то адсорбированные поверхностью металлических деталей загрязнения, обладающие дипольным моментом, отрицательным зарядом диполя притягиваются к металлу и образуют двойной электрический слой, который увеличивает РВЭ. Двойной электрический слой на межфазной границе «Металл — Загрязнение» образуется самопроизвольно в результате стремления системы уменьшить энергию Гиббса поверхностного слоя. Неполарные молекулы поляризуются под действием электростатического поля металлов и, притягиваясь к их поверхности, увеличивают РВЭ по формуле:

$$\Delta\varphi = 4\pi \cdot e \cdot N \cdot \theta \cdot \mu,$$

где $\Delta\varphi$ — изменение РВЭ;
 e — заряд электрона;
 N — число мест с высокой энергией адсорбции на 1 см² поверхности;
 θ — доля занятых электронами мест;
 μ — дипольный момент адсорбата.

Наибольшими дипольными моментами μ обладают жиры, углеводы, вода. Доля занятых мест электронами θ зависит от плотности мест с высокой энергией адсорбции (ступени Френкеля, ребра кристаллов, дислокации и др.). Поэтому с увеличением дефектности поверхности адсорбция интенсифицируется и очищать такую поверхность сложнее. Поэтому важной задачей является выбор способа очистки поверхности ОК перед непосредственным измерением РВЭ методом КРП в целях оперативного диагностирования их состояния.

Наиболее доступным и достаточно эффективным здесь является применение жидких растворителей. В целях разработки способа подготовки поверхности металлических деталей перед измерением РВЭ проведены экспериментальные на деталях (лопатках компрессоров ГТД) из сплавов ВТ3-1, ВТ5-1, ВТ9 и ОТ4-1. Из лопаток, изготовленных из указанных сплавов, были вырезаны образцы с плоской поверхностью. Поверхность образцов была

последовательно обработана наждачной бумагой, затем притиркой с применением микропорошков зернистостью М5 для получения одинаковой шероховатости. Шероховатость поверхности образцов контролировалась с помощью профилометра модели 283. Для исключения влияния на РВЭ механической обработки образцы были выдержаны в течение 15 суток на воздухе при комнатной температуре. Затем образцы были промыты в растворе состава: вода — 85 мас. %, сода кальцинированная Na_2CO_3 — 15 мас. %. Сушкой после промывки в течение 10 ч при комнатной температуре подготовка образцов к исследованиям была закончена.

Непосредственно при проведении экспериментальных исследований поверхность образцов очищалась: ацетоном техническим ГОСТ 2768-84, или бензолом чистым для анализа ГОСТ 5955-75, или петролевым эфиром 70-100 ТУ 6-02-1244-84, или этанолом медицинским 95 мас. %. Критерием величины активной растворяющей способности жидкости было принято увеличение КРП (уменьшение РВЭ). Измерения КРП проводились с помощью прибора с динамическим конденсатором до и после протирки образцов тампоном, смоченным растворителем, при комнатной температуре.

Продолжительность испарения жидкостей с поверхности образцов оценивалась по стабилизации КРП.

Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица — Результаты исследований

Растворитель	ΔU , мВ	Время испарения t , мин	Уравнение, описывающее $\Delta U(t)$
Ацетон	51	100	$\Delta U = 67,935 \cdot \ln(t) - 261,84$
Бензол	49	200	$\Delta U = 60,832 \cdot \ln(t) - 273,29$
Петроле- вый эфир	76	10	$\Delta U = 99,014 \cdot \ln(t) - 151,93$
Этанол	27	70	$\Delta U = 82,925 \cdot \ln(t) - 239,21$

По результатам проведенных исследований сделан вывод о том, что наибольшее увеличение

КРП $\Delta U = 76$ мВ, свидетельствующее о большей активной растворяющей способности, обеспечивает очистка образцов петролевым эфиром. Петроле-
вый эфир имеет наименьшее время испарения $t = 10$ мин с поверхности образцов. Петроле-
вый эфир испаряется с поверхности практически полностью, относительно дешев, мало токсичен [3].

Результаты исследований

Автоматизированный прибор измерения КРП «Поверхность-11» может применяться также для определения состояния поверхности деталей машин (определении степени поверхностно-пластического деформирования, шероховатости, чистоты, активации поверхности, выявлении дефектов), в контроле физико-химических свойств веществ (скорости испарения жидкости, качества горюче-смазочных материалов), в контроле линейных размеров покрытий и др. [4].

При подготовке лопаток компрессоров ГТД к контролю прижогов методом КРП рекомендуется очищать их поверхность, а также измерительный электрод датчика прибора «Поверхность-11» петро-
левым эфиром.

Применение разработанного прибора «По-
верхность-11» в процессе изготовления и ремонта лопаток компрессоров позволит увеличить эффек-
тивность выявления прижогов, и, тем самым, повы-
сить надежность ГТД, экономическую эффектив-
ность их производства, эксплуатации и ремонта.

Литература

1. Э.А. Кочаров, В.С. Олешко, *Наукоемкие технологии*, 10, 2, 73–76 (2010).
2. Пат. РФ на изобретение 2407996 (2010).
3. В.В. Кузнецов, В.С. Олешко, Н.П. Сметанников. *XXIII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Электрохимические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»* (Ка-
зань, 15–18 мая 2011), «Отечество», Казань, 2011, Часть 1, 184–185 с.
4. В.М. Самойленко, В.С. Олешко, *Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России*, 2, 3–6 (2011).

© **И. В. Герасимов** - нач. отд. Военного института, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), iv-gerasimov@mail.ru; **В. С. Олешко** - канд. техн. наук, препод. Военного института, v-oleshko@yandex.ru; **Д. П. Ткаченко** - канд. техн. наук, нач. цикла Военного института, tdp@list.ru; **А. П. Кирпичников** - д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами КНИТУ, kirpichnikov@kstu.ru.