

В. М. Симановский, Т. Д. Денисюк*, Г. В. Волков*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОЧИСТКИ ЛОПАТОК ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Предложены пути повышения качества очистки лопаток газовой турбины. Приведены данные, подтверждающие повышение эффективности электроразрядной очистки лопаток в активных разрядных средах, обеспечивающих разупрочнение стержневых смесей повышенной прочности. Предложен метод комплексной обработки литья.

Ключевые слова: лопатка газовой турбины, электроразрядная очистка литья, поверхностно-активные вещества, рабочая активная среда, поверхностное натяжение.

Запропоновано шляхи підвищення якості очищення лопаток газової турбіни. Наведено дані, що підтверджують підвищення ефективності електророзрядного очищення лопаток в активних розрядних середовищах, що забезпечують розміщення стрижневих сумішей підвищеної міцності. Запропоновано метод комплексної обробки литва.

Ключові слова: лопатка газової турбіни, електророзрядне очищення лиття, поверхнево-активні речовини, робоче активне середовище, поверхнєве натягання.

The ways of upgrading cleaning of shoulder-blades of gas turbine are offered. Information, confirmative the increase of efficiency of cleaning of shoulder-blades by electric impulses in bit lasagnes, providing lowering of durability of ceramic bars, is resulted, the method of complex treatment is offered.

Keywords: shoulder-blade of gas turbine, electric discharge cleaning of casting, surface – active material, active medium, surface tension.

Мощность газотурбинной установки определяет температура рабочего тела – газа, вытекающего из камер сгорания. Чем выше температура газа, тем мощнее двигатель, больше его тяга, выше экономичность и лучше весовые характеристики.

К числу факторов, которые определяют выбор конструкции и материалов для элементов турбомашин, относятся рабочая температура деталей, уровень ее неравномерности, характеристики видов топлива. В первую очередь, это относится к лопаткам турбины, работающим в особо тяжелых условиях, подвергающихся воздействию высоких термоциклических нагрузок. Лопатки турбины в течение многих часов воспринимают поток раскаленных газов, нагретых до температур 1950 К, а в новых двигателях – до 2000-2200 К [1]. Кроме того, изменение температуры газа при пуске, остановке и переходных процессах, нестандартных режимах эксплуатации вызывает в них рост термомеханической напряженности, что способствует образованию термоусталостных трещин. От надежности этих элементов в наибольшей степени зависят прочность и ресурс газотурбинных двигателей. Повышение эксплуатационной надежности лопаток в условиях воздействия газового потока и высоких термомеханических нагрузок является одним из основных направлений улучшения эксплуатационных характеристик газовых двигателей. Весьма важно, чтобы лопатка эффективно охлаждалась, не снижая температуру рабочего газа, и обладала высокой длительной прочностью.

Для решения этой задачи используют защитные газоциркуляционные покрытия в комбинации с охлаждением направленным потоком и пленочным охлаждением, создав сложный лабиринт внутренних каналов в теле лопатки, совместив их с выходными отверстиями так, чтобы вокруг лопатки возникала тонкая воздушная пленка (рис. 1). Внутреннее покрытие выполняет роль термического барьера и защищает материал от коррозионного повреждения. При этом раскаленные газы не соприкасаются с материалом лопатки, следовательно, не перегревают ее и сами не охлаждаются, то есть турбина не теряет мощность. Коэффициент эффективности охлаждения (отношение температуры металла лопатки и рабочего газа) зависит от конфигурации и сложности полости для охлаждения [2].

■ ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХОМ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
■ МНОГОКАНАЛЬНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОХЛАЖДЕНИЕ С ПЛЕНОЧНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

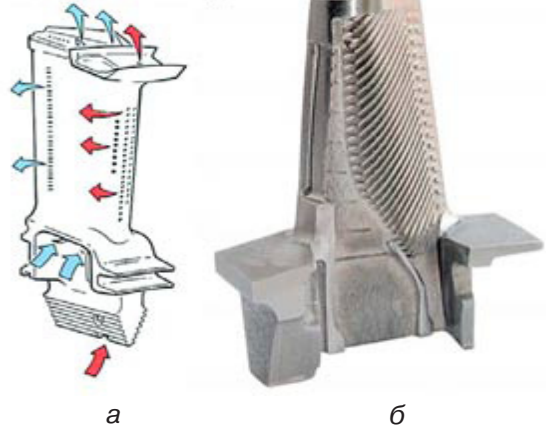


Рис. 1. Схема системы охлаждения лопатки: а – схема движения охлаждающего воздуха вокруг лопатки; б – стержень отливки, формирующий сложную конфигурацию внутренней полости

Получение лопаток методом литья по выплавляемым моделям позволяет получить сложнопрофильную отливку с высоким качеством поверхностного слоя. Однако создание наиболее эффективной конструкции охлаждающей полости ограничено технологическими возможностями разрушения и удаления сложных по геометрии высокопрочных стержней из отливки лопатки. Для разрушения и удаления стержней и формовочных смесей применяются вибрационные и химико-термические средства очистки с использованием специальных растворов, расплавов щелочей, кислот и солей [3]. Кроме высокой энергоемкости (до 1200 кВт·ч/т) и значительной длительности процесса (до 48 ч) – это производство с вредными условиями труда, которые загрязняют окружающую среду. Применяемые традиционные многооперационные технологии очистки и агрессивные среды создают в поверхностном слое высоконагруженной детали сложную, нестабильную по качеству наследственность, отрицательно влияющую на чистоту поверхностного слоя отливок, являются причиной возникновения микротрещин в местах максимального сосредоточения внутренних напряжений [4]. Помимо этого, плохая очистка внутренних каналов приводит к снижению качества внутреннего газоциркуляционного покрытия. Остатки стержневой смеси на внутренней поверхности лопатки формируют цепочки крупных окислов Al и Ti, нарушающих защитное свойство покрытия (рис. 2).

Решением проблемы может стать усовершенствование существующих и разработка новых технологий очистки лопаток, позволяющих использовать освоенные конструктивные решения и материалы.

Альтернативой применяемым методам очистки может служить электроразрядный способ разрушения и удаления стержней. Электроразрядный способ очистки выгодно отличается от других известных методов сравнительно простой управляемостью процесса, возможностью легкого дозирования энергии, высокой экономической эффективностью и экологичностью.

Целью настоящей работы является обобщение результатов исследований по расширению возможности электроразрядного способа очистки точного литья, в частности, лопаток газовых турбин, за счет активации разрядных сред, способствующих разупрочнению форм и стержней в процессе их электроразрядного разрушения.

Наиболее эффективное воздействие на различные дисперсные системы (стерж-

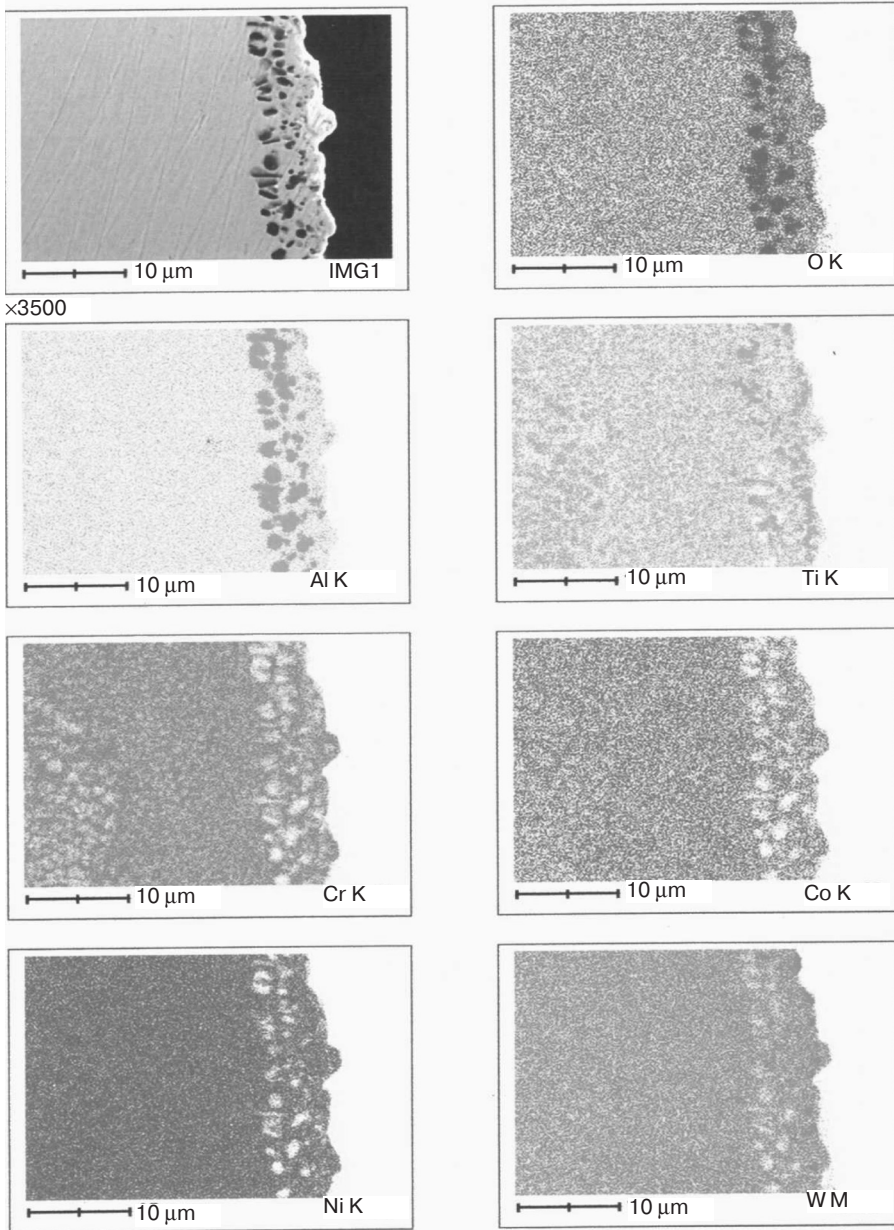


Рис. 2. Микроструктура внутреннего покрытия и распределение легирующих элементов по результатам микрорентгеноспектрального анализа

новые смеси и конденсированная среда) с целью изменения их свойств оказывают физико-химические методы. Эти методы сочетают различные виды воздействий (гидроимпульсное, электроразрядное, гидроакустическое, электромагнитное) с химическими за счет применения различных поверхностно-активных веществ (ПАВ) [5, 6]. Применение ПАВ обусловлено свойствами их адсорбции на границах раздела фаз и способностью понижать поверхностное натяжение, вызывающее понижение прочности стержневых и формовочных смесей.

Влияние адсорбционных явлений на разрушение стержней и форм связано с двумя процессами, приводящими к образованию и росту трещин [7]: доставкой ПАВ от наружной поверхности в глубь трещины; влиянием молекул ПАВ на развитие трещины.

Основным свойством ПАВ, определяющим эффективность его действия как

диспергатора, является способность смачивать твердую поверхность. Основным экспериментальным показателем этой характеристики является поверхностное натяжение [8], с понижением которого облегчается диспергируемость гетерогенных систем. Оценкой диспергирующего действия ПАВ служит снижение поверхностного натяжения

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_A,$$

где σ_A и σ_0 – поверхностное натяжение с ПАВ и без него, эрг/см².

К поверхностным явлениям относятся и электрические явления. В процессе электроразрядов (ЭР) в поверхностных слоях возникают скачки потенциалов на поверхностях раздела фаз. Эти явления в значительной степени связаны с адсорбцией ионов и дипольных молекул.

Высоковольтные электрические разряды в растворах ПАВ влияют на поверхностные явления и обменные процессы на межфазных границах. При снижении поверхностного натяжения уменьшается краевой угол смачивания и увеличивается коэффициент растекания, то есть в результате ЭР система переходит в состояние с меньшей энергией Гиббса.

Экспериментально установлено [9], что модифицирующее действие ЭР на активность растворов ПАВ зависит от их типа по ионной характеристике. Понижение поверхностной энергии наиболее эффективно происходит в растворах анионных ПАВ. Использование в качестве рабочей среды при высоковольтном электрическом разряде растворов анионных ПАВ способствует созданию синергетического эффекта в способности ПАВ удалять отложения с твердых поверхностей.

Механизм электроразрядной очистки точного литья в активных разрядных средах заключается в следующем. При действии волны сжатия, генерируемой электроразрядом, на обрабатываемый объект за счет разницы амплитуд колебаний материала отливок и формовочных смесей на границе их раздела возникают напряжения растяжения и сдвига, в результате в материале зарождаются микротрещины, в которые под действием капиллярных сил проникает жидкость. При этом ПАВ еще до заполнения трещин жидкой фазой проникают в глубь трещин и мигрируют по их стенкам. Такое адсорбционное проникновение ПАВ внутрь трещин происходит с достаточно высокими скоростями, значительно большими, чем скорость всасывания жидкости. Адсорбция ПАВ на стенках трещин в процессе их развития приводит к снижению поверхностной энергии и экранированию сил сцепления, действующих между противоположными поверхностями микротрещин, и облегчает дальнейшее развитие деформации.

Волны, отраженные от свободных поверхностей, интерферируют и воздействуют дополнительно на трещины, доводя их до критических размеров. Кроме того, при знакопеременном воздействии волн сжатия, генерируемых разрядом, стенки отливки начинают обратное перемещение, что может вызвать образование вторичных волн на периферии зоны действия разряда. Такие волны и адсорбционные слои ПАВ разрывают трещины. Образующиеся в результате этого процесса частицы диспергируются в объеме раствора, а вновь образовавшиеся трещины проходят такую же стадию.

В качестве разрядной среды, способствующей разупрочнению форм и стержней, были исследованы водные растворы ряда ПАВ, имеющих, с одной стороны, эффективное воздействие на свойства адсорбции с материалами форм и стержней, а с другой – минимальное влияние на предпробойные потери, которые снижают эффективность разрядных процессов.

Анализируя результаты проведенных экспериментальных исследований по электроразрядному разрушению высокопрочных форм и стержней, используемых при литье по выплавляемым моделям, в частности, изделий турбостроения, установили, что в качестве активной разрядной среды, способствующей наибольшей

Новые литые материалы

эффективности их разупрочнения, используют водный раствор адипиновой кислоты $(\text{CH}_2)_4(\text{COOH})_2$, относящейся к классу ПА-диспергаторов. При температуре 60°C установлена максимальная активность среды, что позволило в комплексе выполнить все операции разупрочнения формовочных смесей и очистку отливок электроразрядом [10].

Экспериментальные исследования по очистке лопатки газовой турбины в активных разрядных средах проводились с энергией электроразряда, не превышающей критических нагрузок для конструкции отливок, установленных экспериментально. Для сравнения была проведена электроразрядная очистка лопатки газовой турбины, прошедшей предварительную обработку в растворе щелочи – NaOH при температуре 185°C в течение 1,5 ч. Результаты сравнений представлены в таблице и на рис. 3.

Результаты электроразрядной очистки лопатки газовой турбины в различных средах

Разрядная среда	Энергия разряда, кДж	Время обработки, с	Полнота очистки, %
ЭР очистка в воде с предварительным выщелачиванием	1,25	240	92
	1,25	300	98
ЭР очистка в адипиновой кислоте	1,25	240	85
	1,25	300	99

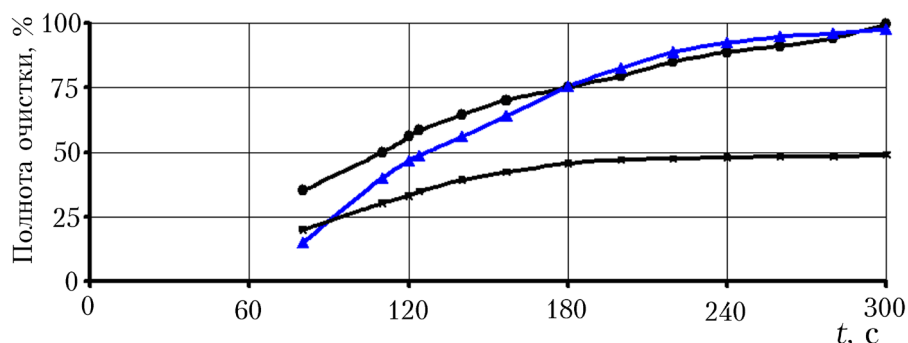


Рис. 3. Зависимость максимально полученной полноты очистки отливок от времени их электроразрядной обработки в различных разрядных средах: 1 – ЭР очистка в воде с предварительным выщелачиванием; 2 – ЭР очистка в адипиновой кислоте; 3 – ЭР очистка в воде без разупрочнения

Удельные затраты электроэнергии для получения качественной очистки лопатки комплексным электроразрядным способом в лабораторных условиях составляют 0,317 кВт·ч. Полученные удельные энергетические затраты на одну отливку в процессе электроразрядной очистки могут быть значительно снижены за счет конструктивного решения специальных устройств при создании оборудования.

Экспериментально установлено, что комплексирование электроразрядной обработки в водном растворе адипиновой кислоты в качестве активной разрядной среды позволяет получить качественную очистку изделий точного литья сложной конфигурации с большим количеством внутренних полузакрытых полостей и каналов при значительном сокращении удельных затрат энергии и времени очистки. Отработанные шламы и растворы адипиновой кислоты не требуют сложных и дорогостоящих технологий утилизации и обезвреживания.

Таким образом, найдено новое решение актуальной научно-технической пробле-

мы, которое состоит в комплексировании электроразрядной обработки с активными разрядными средами, разупрочняющими формовочные и стержневые смеси, на режимах, обеспечивающих высокую полноту очистки без опасности нарушения конструктивной прочности изделия. Кроме того, метод комплексной электроразрядной очистки открывает пути создания наиболее эффективных конструкций сложных литых деталей, например охлаждаемых лопаток газовой турбины, которые в настоящее время ограничены из-за технологических возможностей разрушения и удаления сложных по геометрии стержней.



Список литературы

1. Демонис И. Р. Во все лопатки // Наука и жизнь. – 2007. – № 6. – С. 42-44.
2. Спицин В. Е., Филоненко А. А., Дашевский Ю. Я., Письменный Д. Н. Система охлаждения перспективного двигателя ГТД – 45/60 [Электронный ресурс] // Электронная библиотека. – Режим доступа: <http://www.nbuu.gov.ua/issues/17/page04.html>.
3. Специальные способы литья / Под ред. В. А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 734 с.
4. Елисеев Ю. С. Перспективные технологии производства лопаток ГТД [Электронный ресурс] // Там же. – Режим доступа: <http://engine.aviaport.ru/issues/17/page04.html>.
5. Круглицкий Н. Н., Горovenko Г. Г., Малюшевский П. П. Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях. – Киев: Наук. думка, 1983. – 154 с.
6. Влияние высоковольтного электрического разряда в растворах ПАВ на их моющие и ингибирующие свойства / О. Н. Сизоненко, Р. П. Колмогорова, Э. И. Тафтай // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 2. – С. 53-55.
7. Денисюк Т. Д., Ризун А. Р. Электроразрядная очистка точного литья // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 3. – С. 83-85.
8. Ребиндер П. А. Поверхностно-активные явления в дисперсных системах // Коллоидная химия. – М.: Наука, 1978. – 386 с.
9. Влияние высоковольтных импульсных разрядов в растворах поверхностно-активных веществ на их основные свойства / О. Н. Сизоненко, Э. И. Тафтай, Р. И. Малая // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 3. – С. 110-112.
10. Пат. 20898 Украины, МПК В22D29/00. Способ очистки отливок точного литья / Т. Д. Денисюк, А. Р. Ризун, И. С. Швец, Ю.В. Голень. – Опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

Поступила 28.03.2011

Уважаемые подписчики!

Подписаться на журнал «Процессы литья»
через Интернет
можно на сайте ГП «Пресса» www.presa.ua
с помощью сервиса «Подписка On-line».
