

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОЧИСТКИ ЛОПАТОК ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Т.Д. Денисюк, Г.В. Волков

Институт импульсных процессов и технологий НАНУ,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua

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, создавая сложный лабиринт внутренних каналов в теле лопатки, совмещая их с выходными отверстиями так, чтобы вокруг лопатки возникла тонкая воздушная пленка (рис. 1). Коэффициент эффективности охлаждения (отношение температуры металла лопатки и рабочего газа) зависит от конфигурации и сложности полости для охлаждения.

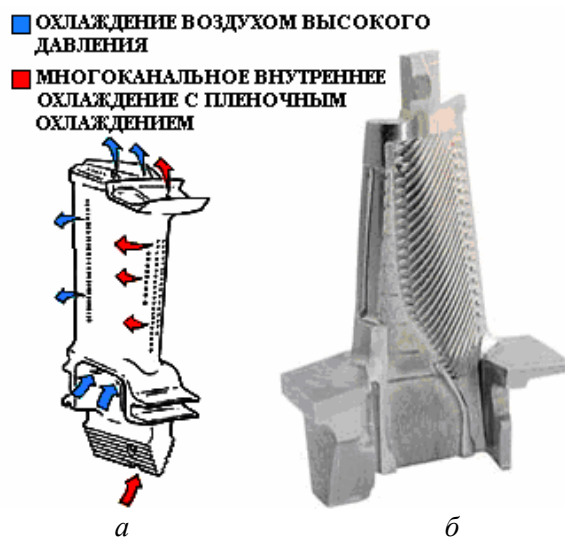


Рис. 1. Схема системы охлаждения лопатки: а) схема движения охлаждающего воздуха вокруг лопатки; б) стержень отливки, формирующий сложную конфигурацию внутренней полости

Изготовление 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. Кроме высокой энергоемкости и значительной длительности процесса, это производство характеризуется 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 сказываются на чистоте поверхностного слоя отливок, являются причиной возникновения микротрещин в местах максимального сосредоточения внутренних напряжений [1]. Помимо этого, обработка отливок лопаток в щелочном растворе с наложением ультразвуковых колебаний приводит к формированию на их внутренней поверхности цепочки крупных частиц окислов Al и Ti, нарушающих микроструктуру поверхностного слоя, что затем (при нанесении на поверхность внутренних каналов защитного газоциркуляционного покрытия) приводит к нарушению его сплошности.

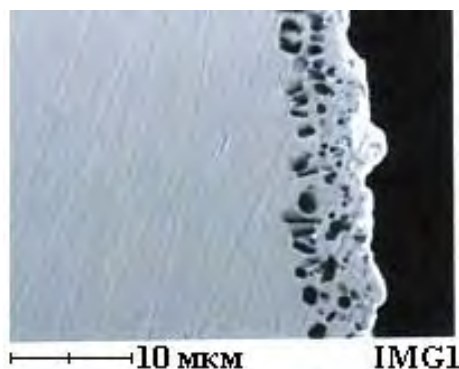


Рис. 2. Микроструктура внутреннего покрытия по результатам микрорентгеноспектрального анализа

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

Для снижения силового воздействия параметров электроразряда на тонкостенную отливку требуются дополнительные факторы, способствующие разупрочнению форм и стержней. Например комплексирование электроразрядной очистки с активными разрядными средами, так как наиболее эффективное воздействие на различные дисперсные системы (стержневые 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) [2].

Цель настоящей работы – обобщение результатов исследований механизмов воздействия активных разрядных сред на процессы электроразрядного разрушения и удаления керамических стержней из отливок лопаток газовой турбины и расширения возможности электроразрядного способа очистки точного литья.

Процесс электроразрядной очистки отливок моделируется как процесс трещинообразования, в котором прочность стержня определяется особенностями возникновения и движения трещин, появляющихся под действием волн сжатия, генерируемых электроразрядом, и за счет разницы колебаний материала отливки и стержня на границе их раздела.

Анализ механизма отделения объема хрупких неметаллических материалов (керамических стержней) при электроразрядном разрушении позволяет следующим образом описать этот процесс. Инструментом воздействия на разрушаемые стержни являются ударные волны, гидротоки, кавитационные процессы. В момент разряда под действием волн сжатия в зоне, прилегающей к каналу разряда, происходит раздавливание материала стержня, а также за счет разницы амплитуд колебаний материала отливки и материала стержня на границе их раздела возникают напряжения растяжения и сдвига, в результате в стержне зарождаются и развиваются микротрещины, в которые под действием капиллярных сил проникает жидкость. Отраженные от свободных поверхностей волны 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 разрывают трещины. Образующиеся в результате этого процесса частицы диспергируются в объеме раствора, а вновь образовавшиеся трещины проходят такую же стадию.

При прочих равных условиях разрушение зависит от значения удельной поверхностной энергии твердого тела (керамического стержня) или от величины его свободной энергии.

При хрупком разрушении свободная поверхностная энергия определяет работу A_δ , затрачиваемую на диспергирование материала, то есть

$$A_\delta = A_\delta(E_{нов}). \quad (1)$$

Согласно соотношению Гриффитса связь между прочностью P_C и работой на диспергирование A_δ аппроксимируется зависимостью

$$P_C = \sqrt{A_\delta}. \quad (2)$$

Так как A_δ может быть отождествлена с $E_{нов}$, то

$$P_C = (E_{нов})^{1/2}. \quad (3)$$

Как известно [3], диспергирование твердых тел в присутствии поверхностно-активных веществ приводит к снижению их удельной свободной поверхностной энергии за счет адсорбционных взаимодействий атомов среды и разрушаемого тела, то есть к соответствующему изменению его прочностных свойств. Облегчение развития новых поверхностей, сопровождающее процесс разрушения хрупких тел в присутствии поверхностно-активных веществ, связано с проявлением адсорбционного эффекта понижения прочности хрупких тел (эффект Ребиндера). Это позволяет производить электроразрядную очистку с меньшей энергией разряда, не оказывающей вредного воздействия на отливку.

При выборе ПАВ-диспергаторов необходимо учитывать родственность химического состава, структуры и строения разрушаемого твердого тела (стержня отливки) и активной разрядной среды. Химический состав стержня отливки определяет характер взаимодействия между атомами (ионами, молекулами) на межфазной границе, от которого зависит принципиальная возможность влияния среды на его прочность. Эффективное понижение прочности компонентов керамических стержней отливок с типично гидрофильной поверхностью (то есть полярных по своей химической природе), с минимальным воздействием на основной металл (неполярная поверхность) происходит в растворе ПАВ, обладающих высокой полярностью.

С другой стороны, активные разрядные среды не должны оказывать негативного влияния на металл отливки, иметь минимальное воздействие на предпробойные потери, которые снижают эффективность разрядных процессов.

Кроме того, высоковольтные электрические разряды в растворах ПАВ влияют на поверхностные явления и обменные процессы на межфазных границах. Установлено, что модифицирующее действие ЭР на активность растворов ПАВ зависит от их типа по ионной характеристике [4]. Использование в качестве рабочей среды при высоковольтном электрическом разряде растворов анионных ПАВ способствует созданию синергетического эффекта в способности ПАВ удалять отложения с твердых поверхностей.

Таким образом, в качестве разрядной среды, способствующей разупрочнению стержней, были исследованы водные растворы ряда анионных ПАВ, имеющих, с одной стороны, эффективное воздействие на свойства адсорбции с материалами форм и стержней, а с другой стороны – имеющих минимальное влияние на предпробойные потери, которые снижают эффективность разрядных процессов и не оказывают негативного влияния на металл отливки. Установлено, что активной разрядной средой наиболее эффективно может служить водный раствор адипиновой кислоты $(\text{CH}_2)_4(\text{COOH})_2$, относящейся к классу ПАВ-диспергаторов [5].

Давление в импульсе волны сжатия, достаточное для разрушения сложнопрофильных керамических стержней и безопасное для отливки, определяли через параметры электроразряда, связанные с прочностью стержней и степенью их разупрочнения в активной разрядной среде согласно следующему выражению:

$$P = \frac{R^4 \cdot \rho \cdot l}{2(\gamma - 1)\pi^2 \cdot L \cdot C \cdot r^2} = \frac{\sigma_{сж}}{k}, \quad (4)$$

где P – давление в импульсе волны сжатия, кДж; R – радиус канала разряда, м; ρ – плотность разрядной среды, кг/м³; l – длина разрядного промежутка, м; γ – эффективный показатель адиабаты, равный 1,26; L – индуктивность разрядного контура, мкГн; C – емкость разрядного контура, мкФ; r – радиус зоны эффективного действия волны сжатия, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности стержня на сжатие, МПа; k – коэффициент разупрочнения керамических стержней в активных разрядных средах.

Экспериментальные исследования по очистке лопатки газовой турбины в активных разрядных средах проводились с энергией электроразряда, не превышающей критических нагрузок для конструкции отливок, установленных экспериментально.

Расчетным путем определены радиус полного разрушения керамических стержней отливки и требуемое количество импульсов, обеспечивающее их разрушение и удаление [6]. По количеству импульсов, радиусу разрушения и допустимым значениям энергии разряда составлена схема обработки отливок. Чтобы увеличить эффективность электроразрядной обработки и исключить вредное воздей-

ствие электроразряда на материал детали, отливки помещались в специально разработанную оснастку (кассеты), обработка производилась параллельным разрядом.

Для сравнения была проведена электроразрядная очистка лопатки газовой турбины, прошедшей предварительную обработку в растворе щелочи NaOH при температуре 185°C в течение полутора часов. Результаты сравнений представлены в таблице и на рис. 3.

Результаты электроразрядной очистки лопатки газовой турбины в различных средах

Разрядная среда	Энергия разряда, кДж	Частота следования импульсов, Гц	Время обработки, с	Полнота очистки, %
ЭР очистка в воде с предварительным выщелачиванием	1,25	2	240	92
	1,25	2	300	98
ЭР очистка в адипиновой кислоте	1,25	2	240	85
	1,25	2	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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеев Ю.С. Перспективные технологии производства лопаток газотурбинных двигателей. *Двигатель*. 2001, (5), 4–8.
2. Круглицкий Н.Н., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П. *Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях*. Киев: Наукова думка, 1983. 154 с.
3. Ребиндер П.А. *Избранные труды. Поверхностно-активные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия*. М.: Наука, 1978. 386 с.

4. Сизоненко О.Н., Тафтай Э.И., Малая Р.И. и др. Влияние высоковольтных импульсных разрядов в растворах поверхностно-активных веществ на их основные свойства. *Вестник Национального технического университета "ХПИ"*. Харьков: НТУ "ХПИ". 2008, (3), 110–112.
5. Патент Украины № 20898. МПК (2007) B22D29/00. *Способ очистки отливок точного литья*. Денисюк Т.Д., Ризун А.Р., Швец И.С., Голень Ю.В. № u200609489; заявл. 01.09.2006; опубл. 15.02.2007. Бюл. № 2.
6. Денисюк Т.Д., Ризун А.Р. Методика определения зон и объемов электроразрядного разрушения форм и стержней. *Электронная обработка материалов*. 2005, **41**(6), 83–85.

*Поступила 23.12.10
После доработки 17.06.11*

Summary

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.
