

Технология электроискрового легирования для повышения ресурса рабочих лопаток паровых турбин и оборудование для её реализации¹

- **Беляков А. В.**², канд. техн. наук, ОАО “Всероссийский теплотехнический институт”, г. Москва
- **Саранцев В. В.**, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, г. Минск
- **Горбачев А. Н.**, ОАО “Всероссийский теплотехнический институт”, г. Москва
- **Пантелеенко Ф. И.**, доктор техн. наук, Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, г. Минск
- **Азаренко Е. Л.**, доктор техн. наук, Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, г. Минск
- **Реутов Б. Ф.**, канд. техн. наук, ОАО “Всероссийский теплотехнический институт”, г. Москва

Статья посвящена развитию технологии формирования эрозионно стойких покрытий методом электроискрового легирования для рабочих лопаток паровых турбин. Дан сравнительный анализ существующих на практике методов упрочнения и ремонта лопаток паровых турбин. Показано, что формирование электроискровых покрытий на входных кромках является актуальным, а развитие технологии формирования связано с поиском новых материалов. Найдены новые технические решения по формированию покрытий из кобальтовых стеллитов, изучены свойства электроискровых покрытий из кобальтового стеллита и металлокерамического твёрдого сплава ВК8, показано влияние параметров работы установок на формирование покрытий. Разработаны новые конструкции вибраторов для формирования электроискровых покрытий, позволяющих расширить диапазон вибрации электродов до 260 Гц, и изготовлены образцы для их тестирования при формировании покрытий.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электроискровые покрытия, эрозионно стойкие покрытия, лопатки паровых турбин, выходная кромка лопатки, входная кромка, тепловая электростанция, электромеханический вибратор, энергия единичного импульса.

Эрозия рабочих лопаток (РЛ) последних ступеней паровых турбин является одной из серьёзных проблем паротурбостроения.

Для разнообразных методов защиты от эрозионного разрушения входных и выходных кромок РЛ последних ступеней характерны свои достоинства и недостатки. Они суммированы в таблице.

Одним из перспективных способов защиты от эрозии является формирование защитно-упрочняющих покрытий, основанных на использовании технологии электроискрового легирования (ЭИЛ) [1 – 3]. Этот способ является наиболее экономичным и перспективным по применению новых материалов, развитию оборудования и технологического процесса. Он основан на физическом явлении электрической эрозии и униполярного переноса материала анода (инструмента) на катод (деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде (рис. 1). При формировании защитно-упрочняющих покрытий на поверхности лопа-

ток обрабатываемые лопатки являются катодом, расходуемый электрод-инструмент – анодом.

Между обрабатываемой (легируемой) поверхностью и легирующим электродом протекают импульсы электрического тока с энергией от 0,5 до 50 Дж длительностью $1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-5}$ с, raising локальную температуру материала в межэлектродном промежутке от 4000 до 12 000 К. Благодаря относительно невысокой (обычно 100 Гц) частоте следования разрядов, неболь-

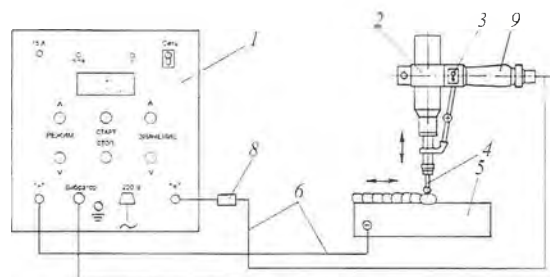


Рис. 1. Оборудование для ЭИЛ:

1 – панель управления источника; 2 – вибратор; 3 – выключатель; 4 – электрод; 5 – деталь; 6 – сварочный кабель; 7 – водопитание электродвигателя; 8 – добавочное сопротивление; 9 – рукоятка

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, идентификационный номер: RFMEFI57614X0035.

² Беляков Анатолий Васильевич: proprotect@mail.ru

Результаты оценки способа ЭИЛ в сравнении с другими известными способами упрочнения изнашиваемых элементов точной части паровых турбин

Способ формирования защиты	Стойкость			Объекты упрочнения	КИМ	Экологичность	Применимость в ремонтном производстве	Примечание
	эрозионная	абразивная	коррозионная					
Припойка пластин толщиной 2 мм из стеллита ВЗК припоем ПСр-45 на стали 15Х11МФ-Ш	Высокая, 1,0 – принята за эталон	Высокая	Средняя	Только входные кромки РЛ последних ступеней	Высокий	Чистая	Применяется	Используется дорогостоящий припой ПСр-45. Ко второму ремонту отслаивается 50 – 90% пластин
Закалка ТВЧ стали 15Х11МФ-Ш толщиной 2 мм	Низкая, 0,25 – 0,3	Низкая	Низкая	Только входные кромки РЛ последних ступеней	Высокий	Чистая	Не применяется	Большая дефектность закалочного слоя ТВЧ
ГТС нанесения порошкового стеллита ВЗК:								
газоплазменный – 0,3 мм	Низкая, 0,01	Низкая	Средняя	Входные и выходные кромки РЛ и НЛ	Низкий	Требуется экологическая защита	Применяется	ГТП с низкими адгезионными и когезионными свойствами, высокой пористостью. Целесообразно применять только с последующим оплавлением
плазменный – 0,3 мм	Низкая, 0,01	Низкая	Средняя	Входные и выходные кромки РЛ и НЛ	Средний	Требуется экологическая защита	Применяется	
детонационный – 0,2 мм	Низкая, 0,01	Низкая	Средняя	Только входные кромки РЛ последних ступеней	Средний	Требуется экологическая защита	Применяется	
Лазерная наплавка	Средняя	Высокая	Высокая	Только входные кромки РЛ последних ступеней	Средний	Требуется экологическая защита	Применяется	
Ионно-плазменные покрытия с чередованием слоев Ti и TiN – до 60 мкм	Высокая	Низкая	Высокая	Входные и выходные кромки РЛ и НЛ (Лопатка покрывается целиком)	Высокий	Чистая	Не применяется	Технологический процесс в 2 раза удорожает себестоимость детали. Низкая производительность процесса
ЭИЛ-покрытие – 180 – 250 мкм (Технология АО “Турбоатом”) Ti5K6	Средняя, 0,6	Высокая	Средняя	Только входные кромки РЛ последних ступеней	Высокий	Чистая	Применяется	Достаточно простая технология. Стоимость проведения работ по формированию покрытия составляет менее 10% стоимости детали
ЭИЛ-покрытие: 250 – 300 мкм ВК60М (ВК6, ВК8); 300 – 350 мкм стеллит ВЗК (Технология ОАО “ВТИ”)	Высокая 0,95 – 0,98	Высокая	Средняя	Входные и выходные кромки РЛ и НЛ	Высокий	Чистая	Применяется	Возможность применения технологии непосредственно при ремонте лопаток РВД, РСД и РНД на станциях при положениях роторов: на козлах ремонтной площадки; в подшипниковых опорах при вскрытой крышке цилиндра; без снятия крышек цилиндров через конденсатор турбины (только для рабочих лопаток последних ступеней турбин мощностью более 50 МВт)

Примечание: КИМ – коэффициент использования материала; ГТС – газотермические способы формирования покрытий.

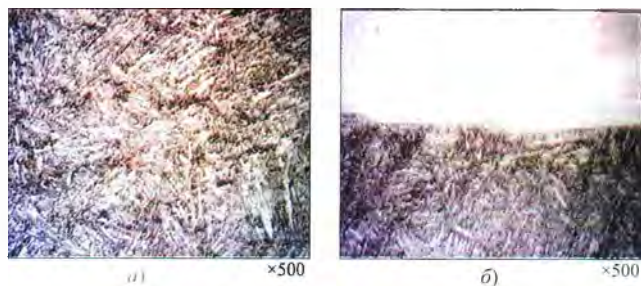


Рис. 2. Микроструктура образца (сталь 12X13-Ш) до (а) и после (б) нанесения стеллитового покрытия (травитель 4%-ный спиртовой раствор HNO_3)

по времени протекания импульса и высокой теплопроводности подложки деталь (лопатка) не нагревается и имеет температуру не выше 200°C .

Методика проведения исследований. Изготовление образцов для проведения исследований осуществлялось из заготовок, которые, в свою очередь, получались вырезкой из различных частей рабочих лопаток из коррозионно-стойкой стали 12X13-Ш, демонтированных с РНД турбины ПТ-65/75-130 ЛМЗ. Использование материала лопаток (сталь 20X13-Ш) было обусловлено тем, что материал лопатки подвергался закалке в масле на мартенсит с последующим высоким отпуском при температуре $650 - 700^\circ\text{C}$, экспериментальные образцы имели стандартную (заводскую) термообработку, а микроструктура стали 20X13-Ш соответствовала приёмосдаточной структуре лопатки. Для исследований использовались образцы с размерами $20 \times 20 \times 8$ мм и с шероховатостью R_a 0,8 мкм.

Исследование микроструктуры и толщины покрытия осуществляли на изготовленных поперечных микрошлифах с использованием оптического инвертированного микроскопа DMI 5000M (Leica, Германия).

Микрорентгеноспектральный анализ содержания элементов в покрытии и основе определяли с

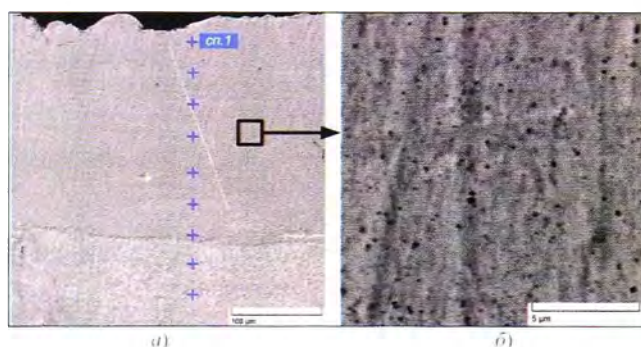


Рис. 3. Микроструктура покрытия ЭИЛ электродом из стеллита марки ВЗК без травления при разных масштабах увеличения электронного микроскопа (+сп.1 — первая точка химического состава покрытия, полученного микрорентгеноспектральным способом, последующие точки обозначены "+")

помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega с приставкой для проведения микроанализа OXFORD instruments X-Max с ускоряющим напряжением до 30 кВ.

Определение шероховатости поверхности образцов до и после формирования покрытия определяли с помощью контурографа модели 220 в режиме профилометрии.

Формирование покрытий на образцах осуществлялось на установках Spark-1000 (разработка Белорусского национального технического университета) и ГБФ-3 (разработка ОАО "ВТИ"). Их характеристики приведены далее:

	Spark-1000	ГБФ-3
Потребляемая мощность, кВт	1,0	0,5
Напряжение питания, В	220	60 – 90*
Габаритные размеры, мм		
длина	500	500
ширина	250	480
высота	250	120
Масса, кг	20,5	15

* От сварочной сети выпрямленного тока.

Формирование покрытия осуществлялось электродами (диаметром 5 мм, длиной 60 мм) из металлокерамического твёрдого сплава ВК60М литого стеллита марки ВЗК и стеллита-6.

Исследования износостойкости покрытий проводили на машине трения МСЦ-2 с использованием пар трения "ролик – колодка" с покрытием ролика.

Результаты исследований. ЭИЛ-покрытия полученные с использованием электрода ВЗК сплошные и равномерные; лишь на отдельных участках наблюдается незначительное количество пор. Металлографическими исследованиями установлено, что микроструктура материала основы (высоко отпущенный мартенсит) в процессе ЭИЛ не меняется (рис. 2). Это даёт возможность формировать покрытия на лопатках турбин из металлических и металлокерамических материалов без термического влияния, без риска получения закалённой микроструктуры или зарождения усталостной трещины.

Толщина покрытия в среднем при энергии единичного импульса 30 – 32 Дж составляет 200 мкм (рис. 3, а). Покрытия хорошо связаны с основой, инородные включения и поры на границе раздела покрытие – основной металл отсутствуют. На рис. 3, б представлена увеличенная микроструктура типичного участка покрытия без травления. Увеличение позволило обнаружить в микроструктуре рассредоточенные фазы чёрного цвета размерами от 0,05 до 0,25 мкм. Предположительно фазы железа, которое почти равномерно насыщает материал покрытия и распределяется в его объёме.

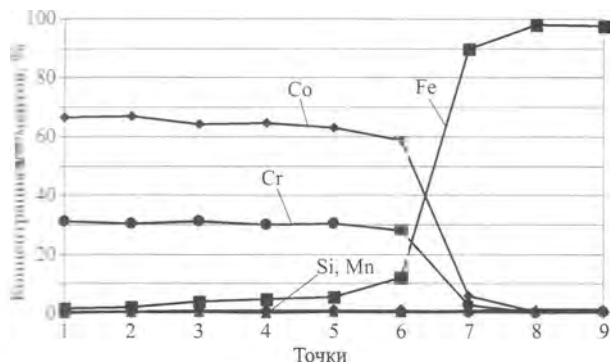


Рис. 4. Концентрационные кривые распределения элементов в покрытии ЭИЛ на глубину 270 мкм

Микрорентгеноспектральный анализ в девяти точках покрытия и основы (рис. 4) позволил выявить распределение химических элементов в покрытии. Расстояния между точками составляют примерно 30 мкм.

Распределение элементов типично для основы и покрытия. Оно обусловлено протеканием процессов электроэрозии электрода и подложки и металлургическому перемешиванию до 180 мкм (1 – 5 точки); в зоне 6 – 8-й точек (60 мкм – переходная зона) изменение концентрации железа, кобальта и хрома наиболее заметно.

Энергетические параметры следующим образом влияют на свойства покрытий:

- увеличение длительности генерирующих импульсов установки Spark-1000 от 100 до 250 мкс с применением электродов (стеллитов марки ВЗК и стеллит-6) увеличивает толщину покрытия не менее чем на 25%;

- увеличение частоты генерирующих импульсов от 500 до 6000 Гц при использовании тех же стеллитных электродов приводит к увеличению шероховатости поверхности с 5,68 до 25,7 мкм;

- увеличение длительности импульсов от 60 до 120 мкс с теми же электродами приводит к увеличению шероховатости поверхности формируемого покрытия с 3,67 до 11,7 мкм;

- увеличение длительности импульсов при приращении электрода из спечённого металлокерамического твёрдого сплава ВК8 привело к разбросу шероховатости и микротвёрдости. Его можно объяснить неравномерным распределением карбидов в сечении покрытия, искажавшим результаты измерений;

- все покрытия, полученные с использованием электрода ВК8, имеют практически одинаковую толщину и шероховатость вне зависимости от изменения частоты импульсов; при этом с увеличением частоты импульсов количество и размер пористых включений уменьшается;

- формируемые при частоте импульсов порядка 1000 Гц покрытия имеют наибольшую износостойкость: при их испытаниях на трение и износ



Рис. 5. Внешний вид рабочей лопатки последней ступени паровой турбины с ЭИЛ со стеллитовым покрытием на входной кромке

явного отслоения и разрушения покрытия не наблюдалось;

- для всех покрытий пористость на границе раздела основа – покрытие отсутствует.

Процесс формирования ЭИЛ-покрытия из стеллитов (стеллит ВЗК и стеллит-6) и из спечённого металлокерамического твёрдого сплава ВК8 не одинаков. Основой сплава ВК8 является карбид вольфрама, плавящийся при более высокой температуре по сравнению со стеллитами, основой которых является кобальт. Во время единичного разряда ($10^{-5} - 10^{-5}$ с) количество материала ВК8, переносимого с анода на катод, меньше, чем стеллитных материалов. Время кристаллизации жидкой фазы сплава ВК8 много меньше, чем жидкой фазы стеллитных сплавов. Вследствие этого уже при частоте импульсов 100 Гц очередная порция покрытия из сплава ВК8 наносится на закристаллизованную массу слоя этого покрытия. Микросваривания электрода и подложки при этом не происходит (“эффект залипания электрода”). При нанесении стеллитных сплавов каждая новая порция покрытия попадает на слой, находящийся в полужидком состоянии с большим количеством не успевшей закристаллизоваться жидкой фазы. В результате этого происходит микросваривание переносимого при каждом импульсе материала со слоем, уже находящимся на подложке в полужидком состоянии. Установка ГБФ-3, у которой частота вибрации составляет 15 – 25 Гц в зависимости от энергии единичного импульса, обеспечивает формирование стеллитового покрытия до 500 мкм без “эффекта залипания электрода”.

С учётом этого стеллитовые материалы в настоящее время являются наиболее перспективными для создания эффективного эрозионно стойкого покрытия на входных кромках лопаток последней ступени паровых турбин. Технологии и оборудование для электроискрового формирования покрытий активно развиваются.

Для предотвращения “схватывания” разработан процесс с применением подслоя толщиной 0,2 мм, состоящего из порошковых реагентов на

основе карбида титана, по которому формировали стеллитовое покрытие с увеличенной частотой вибрации электрода [5 – 7]. Производительность формирования покрытия увеличилась на 30%; “эффект залипания электрода” не наблюдался.

Для предотвращения “схватывания” разработаны также электромеханические вибраторы (аппликаторы), осуществляющие вибрацию электрода кулачками, приводящимися от электродвигателя постоянного тока, который может устанавливаться как вне, так и внутри корпуса вибратора.

Вибрация осуществляется с частотой до 260 Гц. Повышенная частота снижает шероховатость покрытий и уменьшает эффект “схватывания” электрода с основой.

На рис. 5 показана РЛ из стали 15Х11МФ-Ш с электроискровым покрытием из стеллита ВЗК на входной кромке, сформированным на подслое из реагентов с помощью установки Spark-1000, укомплектованной электромеханическим вибратором, обеспечивающим частоту вибрации 260 Гц. Толщина слоя покрытия 320 мкм.

Выводы

1. Электроискровое формирование защитных покрытий является эффективным и экономичным способом уменьшения эрозии лопаток последних ступеней паровых турбин и восстановления работоспособности подвергшихся эрозии лопаток.

2. Его отличает локальность формирования покрытий, отсутствие термического влияния на обрабатываемую деталь, высокий коэффициент использования материала, возможность нанесения покрытия без разлопачивания турбины или даже без вскрытия цилиндра. Исследования и имеющийся опыт показывают, что:

при использовании электродов из спечённого металлокерамического твёрдого сплава ВК8 и стеллитов (марки ВЗК и стеллит-6) увеличение длительности генерирующих импульсов от 100 до 250 мкс увеличивает толщину покрытия не менее чем на 25% при отсутствии пористости на границе раздела основа – покрытие и высокой прочности сцепления покрытия с основой;

для формирования покрытий методом электроискрового легирования предпочтительно использование кобальтового стеллита марки ВЗК в качестве электродного материала;

микроструктура покрытия из стеллита ВЗК сформированного на стали 12Х13-Ш, не содержит дефектов в виде микрогребней, пустот и равномерно по толщине покрытия;

избежать “эффекта залипания электрода” можно применением подслоя реагентов, наносимых на поверхность перед формированием покрытия увеличением частоты вибрации электрода.

3. Создано оборудование, состоящее из вибраторов и импульсных источников, которое позволяет варьировать параметры в широком диапазоне создавать качественные покрытия: источник с импульсами частотой от 500 до 12000 Гц и длительностью от 10 до 250 мкс. Разработаны вибраторы с частотой вибрации электрода до 260 Гц.

4. Получены покрытия из стеллита толщиной до 320 мкм, обеспечивающие высокий ресурс покрытия в эрозионной среде влажного пара.

Список литературы

1. *Иванов, Г. П.* Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин [Текст] / Г. П. Иванов. М.: МАШГИЗ, 1961. – 303 с.
2. *Шкляр, А. И.* Опыт повышения надёжности и износостойкости элементов проточной части паровых турбин [Текст] / А. И. Шкляр, Л. А. Жученко, В. В. Ермолаев, А. В. Беляков // Теплоэнергетика. – 2007. – № 4. – С. 4 – 7.
3. *Беляков, А. В.* Практика формирования электроискровых покрытий для упрочнения и восстановления лопаточного аппарата проточной части паровых турбин тепловых атомных электростанций [Текст] / А. В. Беляков, В. И. Шпун, А. Н. Горбачев // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. – С. 1 – 9.
4. *Гитлевич, А. Е.* Электроискровое легирование металлических поверхностей [Текст] / А. Е. Гитлевич, В. В. Милолов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревуцкий – Кишинев: Штиинца, 1985. – 196 с.
5. *Sarantsev, V. V.* Study of Composite Spark-Alloyed Coatings Based on Titanium Carbide Using Self-Propagating High-Temperature Synthesis [Text] / V. V. Sarantsev, L. V. Markov, E. L. Azarenko // Surface engineering and applied electrochemistry. – 2012. – Vol. 48. – № 2. – P. 43 – 49.
6. *Panteleenko, F. I.* Formation of Composite Coatings Based on Titanium Carbide via Electrospark Alloying [Text] / F. I. Panteleenko, V. V. Sarantsev, A. M. Stolin, P. M. Bazhenko, E. L. Azarenko // Surface engineering and applied electrochemistry. – 2011. – Vol. 47. – No. 4. – P. 336 – 348.
7. *Пантелеенко, Ф. И.* Влияние материала основы на свойства композиционных покрытий, формируемых при ЭИ. СВС / Ф. И. Пантелеенко, В. С. Ивашко, Б. Б. Христенко, А. В. Беляков, В. В. Саранцев, Е. Л. Азаренко // Изобретения. 2011. – № 7 – 8. – С. 7 – 21.