

# Оборудование и технология электроискрового легирования для продления срока службы энергооборудования

В. В. Саранцев<sup>а</sup>, А. В. Беляков<sup>б</sup>, Ф. И. Пантелеенко<sup>а</sup>, Е. Л. Азаренко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, e-mail: [BNTU.MTF@mail.ru](mailto:BNTU.MTF@mail.ru)

<sup>б</sup>ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени  
теплотехнический научно-исследовательский институт»,  
ул. Автозаводская, д. 14, г. Москва, 115280, Российская Федерация, e-mail: [belal@progtech.ru](mailto:belal@progtech.ru)

Представлены сведения о проблеме увеличения срока службы лопаток паровых турбин последних и предпоследних ступеней. Разработаны технология и современное оборудование для нанесения композиционных покрытий посредством электроискрового легирования. Установлено, что при использовании технологии электроискрового легирования для нанесения защитных покрытий не происходит объемного нагрева лопатки выше 200°C, что не требует проведения термообработки. Создано оборудование, состоящее из вибраторов (вибрирующих электродов-инструментов) и импульсных источников питания, которое дает возможность варьировать параметры в широком диапазоне, что позволяет создавать качественные покрытия. Изготовлены источник с импульсами частотой от 500 до 12000 Гц и длительностью от 10 до 250 мкс, а также вибраторы с частотой вибрации электрода до 260 Гц. Целесообразность применения разработанной технологии нанесения защитных композиционных покрытий заключается в снижении цены на расходуемые материалы по сравнению с защитой в виде стеллитовых пластин.

*Ключевые слова:* электроискровое легирование, композиционное покрытие, микроструктура, оборудование, источник питания, вибратор, импульс, частота.

УДК 621.793

## ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация энергетического оборудования предопределяет воздействие различных факторов, приводящих к износу его элементов, что в свою очередь определяет ресурс и надежность энергетического оборудования в целом. В этой связи затраты на замену изношенных и малонадежных элементов не только неизбежны, но и так велики, что проблема повышения их ресурса и надежности является весьма важной и актуальной.

Во многом выбор технологии упрочнения или восстановления зависит от материала, габаритов и условий работы детали. Каждый из существующих методов нанесения покрытий имеет свою область применения [1].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Высокая степень износа основного оборудования в энергетической отрасли ставит перед энергетиками задачу повышения срока его эксплуатации. Особенно значимой является проблема увеличения срока службы лопаток паровых турбин последних и предпоследних ступеней, которые в процессе эксплуатации подвергаются капельно-эрозионному износу, возникающему в результате ударов капель влаги, конден-

сирующей в турбине. Надо отметить, что в связи с высокой окружной скоростью рабочих лопаток паровой турбины на их периферии (до 660 м/с) и с ухудшением водного режима на электрических станциях из-за неравномерного потребления электрической и тепловой энергии в течение суток последнее время степень эрозионного износа рабочих лопаток возрастает. Это явление необходимо рассматривать в сочетании с проблемой коррозии металла, возникающей под воздействием агрессивных сред, содержащихся в паре. В таких условиях срок службы комплекта лопаток паровых турбин может составлять менее пяти лет.

В настоящее время существует ряд технологических решений – эксплуатационных, или конструктивных, позволяющих повысить эрозионную стойкость рабочих кромок лопаток паровых турбин. Эти решения связаны с изменением свойств рабочих лопаток путем:

- напайки или приварки стеллитовых пластин марки ВЗК;
- диффузионного никель-борирования;
- нанесения многослойного вакуумно-плазменного покрытия высокотвердых нитридных соединений: Ti-TiN, Zr-ZrN;
- наплавки рабочих кромок кобальтовым стеллитом марки ВЗК;
- дозвукового и сверхзвукового плазменного напыления износостойких покрытий.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Опыт эксплуатации паровых турбин показывает, что наиболее эффективный способ защиты от эрозии – это стеллитовая защита. Однако данная технология требует разлопачивания турбины, а стеллитовые пластины – дорогой и дефицитный материал [2].

Для защиты лопаток турбин предложено использование технологии электроискрового легирования (ЭИЛ) [3–4]. Технология основана на явлении электрической эрозии и полярного переноса материала анода (инструмента) на катод (деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде [5]. При формировании защитно-упрочняющих покрытий на поверхности лопаток последние служат катодом, а анодом – расходуемый электрод-инструмент.

При ЭИЛ между обрабатываемой (легируемой) поверхностью и легирующим электродом протекают весьма короткие по времени импульсы электрического тока (длительностью  $1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-5}$  с). При этом деталь (лопатка) не нагревается выше  $200^\circ\text{C}$  (рис. 1). Установлено, что микроструктура материала основы в процессе ЭИЛ не меняется и дает возможность формировать покрытия из металлических и металлокерамических материалов на лопатках турбин без термического влияния, что исключает риск поломки при эксплуатации турбины.

Полученные ЭИЛ покрытия с использованием стеллитового электрода сплошные и равномерные, лишь на отдельных участках наблюдается незначительное количество пор. Толщина покрытия в среднем 200 мкм (рис. 2). Покрытия хорошо связаны с основой, инородные включения и поры на границе раздела «покрытие – основная металл» отсутствуют.

Элементы, входящие в состав электрода, в покрытии располагаются равномерно. Следует отметить, что количество железа в КП больше, чем в электроде (рис. 3). Это связано с оплавлением основы и перемешиванием с материалом электрода.

Положительные результаты, полученные при формировании покрытий на рабочих кромках лопаток турбин с применением технологии электроискрового легирования (ЭИЛ) [6–7], потребовали разработки и изготовления современного и надежного оборудования. В ОАО «ВТИ» и БНТУ были разработаны и изготовлены комплекты оборудования для ЭИЛ, состоящие из источника питания и вибратора. Питание источника осуществляется от силового трансформатора (1 кВт). В используемой схеме источника постоянное напряжение после силового блока выпрямителей преобразуется с помощью электрон-

ного преобразователя в мощные импульсы тока с заданными частотой (от 500 до 12000 Гц) и длительностью (от 10 до 250 мкс). Установлены закономерности влияния энергических параметров на свойства покрытий:

- при увеличении длительности электрических импульсов с применением электродов ВК8 и «Стеллит» толщина покрытия увеличивается;

- увеличение частоты при постоянной длительности (90 мкс) импульсов при ЭИЛ с использованием электрода «Стеллит» приводит к увеличению шероховатости поверхности с 5,68 мкм для режима 500 Гц до 25,7 мкм для режима 6000 Гц;

- увеличение длительности при постоянной частоте (2 000 Гц) импульсов при ЭИЛ с использованием электрода «Стеллит» приводит к увеличению шероховатости поверхности с 3,67 мкм при длительности импульсов 60 мкс до 11,7 мкм для режима 120 мкс;

- при увеличении длительности импульсов электроискрового легирования с применением электрода ВК8 наблюдается разброс значений шероховатости и микротвердости, что связано с тем, что при попадании в зону измерения карбидного зерна значение микротвердости будет более высоким. Кроме того, разброс значений микротвердости может объясняться неравномерным распределением карбидов по сечению покрытия;

- все полученные с применением электрода ВК8 покрытия имеют практически одинаковую толщину и шероховатость, при увеличении частоты электроискрового легирования с применением электрода ВК8 количество и размер пористых включений уменьшаются;

- формируемые при частоте 3200 Гц покрытия имеют наиболее высокую износостойкость, при испытаниях явного отслоения и разрушения покрытия не наблюдалось;

- для всех покрытий на границе раздела отсутствуют пористость и инородные включения.

Процесс формирования ЭИЛ покрытия из сплава Стеллит-6 отличается от такового из твердого сплава ВК8. Основой сплава ВК8 служит карбид вольфрама, что определяет его высокую температуру плавления по сравнению с температурой плавления Стеллит-6, у которого основой сплава является кобальт. При протекании единичного разряда ( $10^{-3}$ – $10^{-5}$  с) количество материала ВК8, переносимого с анода на катод, меньше количества сплава Стеллит-6. Время кристаллизации жидкой фазы сплава ВК8 много меньше времени кристаллизации жидкой фазы сплава Стеллит-6.

При вибрации электрода установки с частотой 100 Гц при нанесении ВК8 ударное воздействие электрода происходит по закристаллизованной

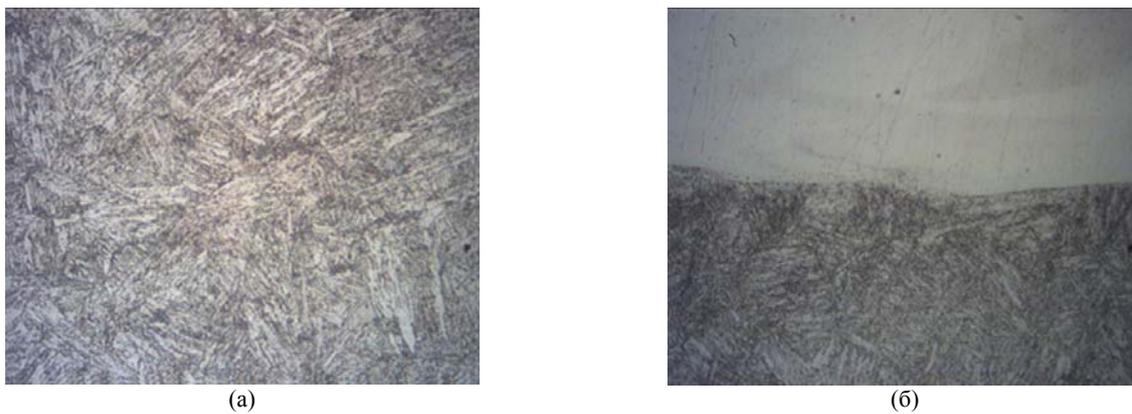


Рис. 1. Микроструктура образца (сталь 12X13) до (а) и после (б) нанесения стеллитового покрытия  $\times 500$ .

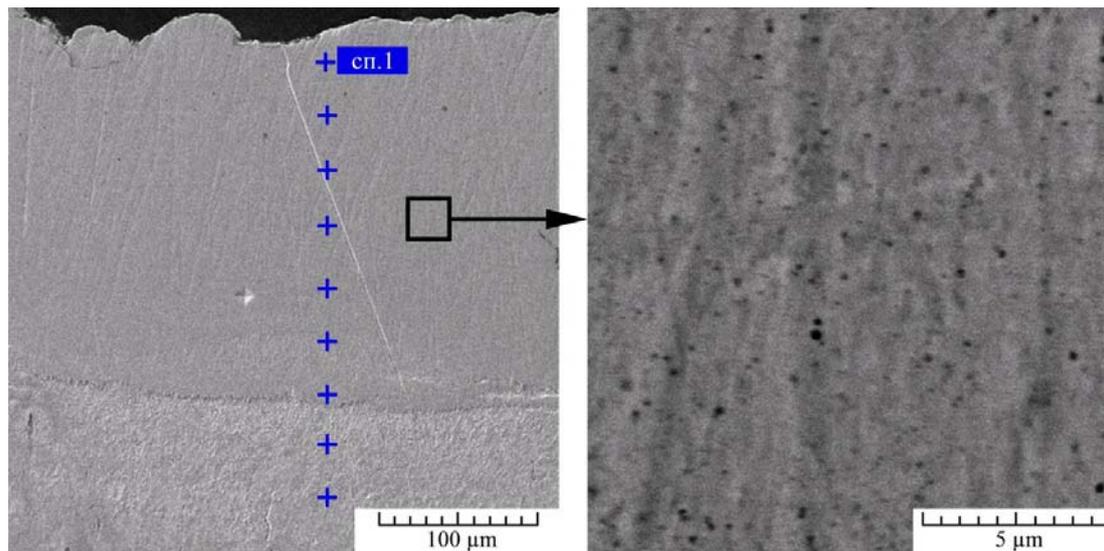


Рис. 2. Микроструктура покрытия ЭИЛ стеллитовым электродом.

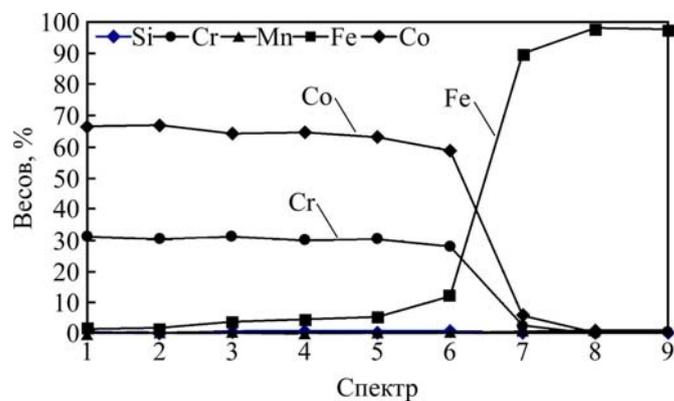


Рис. 3. Концентрационные кривые распределения элементов в покрытии ЭИЛ с использованием стеллитового электрода.



Рис. 4. Вибратор для ЭИЛ электромеханический: (а) – внутреннее; (б) – внешнее расположение электродвигателя.



Рис. 5. Внешний вид лопатки паровой турбины с ЭИЛ покрытием на рабочей кромке.

массе слоя покрытия ВК8 и поэтому микросваривания электрода и подложки не наблюдается. В случае нанесения сплава Стеллит-6 ударное воздействие электрода осуществляется по слою, находящемуся в полужидком состоянии с большим количеством жидкой фазы, не успевшей закристаллизоваться до ударного воздействия электрода. В результате этого имеет место процесс микросваривания электрода со слоем из сплава Стеллит-6.

Для формирования эрозионноустойчивой защиты интерес представляет материал стеллит. Уменьшить схватывание было предложено за счет нанесения подслоя порошковых реагентов и увеличения частоты вибрации. Подслоем порошка на поверхность образца наносили толщиной 0,2 мм [3]. ЭИЛ проводили по слою реагентов. В результате скорость обработки увеличилась на 30%. Это связано с уменьшением эффекта схватывания.

Для увеличения частоты вибрации электрода был спроектирован и изготовлен электромеханический вибратор. Вибрации на электрод передаются от кулачков, имеющих привод от электродвигателя. Конструкцией предусмотрено использование как внутреннего электродвигателя, так и внешнего с приводом через гибкий вал (рис. 4). Благодаря кулачкам расширился диапазон частот вибраций до 260 Гц. Согласно исследованиям повышенная частота снижает шероховатость покрытий и уменьшает эффект «схватывания» электрода с основой.

Созданный комплект оборудования для ЭИЛ успешно применяется для проведения упрочняющих и восстановительных работ. Были разработаны технологические инструкции и нанесены покрытия ЭИЛ на лопатках паровых турбин (рис. 5).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целесообразность применения разработанной технологии нанесения защитных композиционных покрытий заключается в снижении цены на расходные материалы по сравнению с защитой в виде стеллитовых пластин.

При использовании технологии электроискрового легирования для нанесения защитных

покрытий не происходит объемного нагрева лопатки выше 200°C, что не требует проведения термообработки.

Создано оборудование, состоящее из вибраторов (вибрирующих электродов-инструментов) и источников импульсов высокой частоты, которое позволяет варьировать параметры в широком диапазоне: частоту – от 500 до 12000 Гц, а длительность – от 10 до 250 мкс. Изготовлены вибраторы с частотой вибрации электрода до 260 Гц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Буйкус К.В., Григорьев С.В., Оковитый В.А., Саранцев В.В., Снарский А.С., Пантелеенко Е.Ф., Петришин Г.В., Пантелеенко Ф.И., Чой Ки Йонг. *Упрочнение и восстановление поверхностей деталей. Лабораторный практикум: учебное пособие*. Под ред. Ф.И. Пантелеенко. Минск: БНТУ, 2010. 344 с.
2. Беляков А.В., Шапин В.И., Горбачев А.Н. Практика формирования электроискровых покрытий для упрочнения и восстановления лопаточного аппарата проточной части паровых турбин тепловых и атомных электростанций. *Вестник ИГЭУ*. 2008, (4), 1–9.
3. Sarantsev V.V., Markova L.V., Azarenko E.L. Study of Composite Spark-Alloyed Coatings Based on Titanium Carbide Using Self-Propagating High-Temperature Synthesis. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2012, **48**(2), 43–49.
4. Panteleenko F.I., Sarantsev V.V., Stolin A.M., Bazhin P.M., Azarenko E.L. Formation of Composite Coatings Based on Titanium Carbide via Electrospark Alloying. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(4), 336–348.
5. Лазаренко Н.И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами. В кн.: *Электроискровая обработка металлов*. Вып. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 26–66.
6. Пантелеенко Ф.И., Ивашко В.С., Хина Б.Б., Беляков А.В., Саранцев В.В., Азаренко Е.Л. Влияние материала основы на свойства композиционных покрытий, формируемых при ЭИЛ с СВС. *Изобретатель*, 2011, (7–8), 7–21.
7. Беляков А.В., Пантелеенко Ф.И., Хина Б.Б., Саранцев В.В. Защитные покрытия с применением самораспространяющегося высокотемпературного

синтеза и электроискровой обработки. *Труды ГОСНИТИ*. 2012, **109**(2), 86–93.

*Поступила 26.05.14*

*После доработки 31.07.14*

### **Summary**

This article introduces certain information on the problem of increasing the service life of steam turbine blades of the last and last-but-one stages. A special technology and equipment for the deposition of composite coatings by the Electro-spark Alloying (ESA) have been developed. It is established that with the ESA protective coating technology we can prevent volumetric heating of the blade over 200°C. That means we can avoid heat treatment. The equipment mentioned above consists of

vibrators and pulse sources, which allows us to vary parameters in a wide range. That is why we can make coatings of a high quality. We have manufactured a source of pulses with the frequency from 500 Hz to 12000 Hz and with the duration from 10 ms to 150 ms. In addition, vibrators with the vibration frequency up to 260 Hz have been also made. The main purpose of the application of the ESA protective coating technology is lowering the cost of consumables against that of protection by stellite plates.

*Keywords: electro-spark alloying, composite coatings, microstructure, equipment, power, vibrator, impulse, frequency.*