

# Установки для формирования эрозионно- и абразиво-стойких электроискровых покрытий на лопатках паровых турбин тепловых и атомных электростанций

\* А. В. Беляков<sup>а</sup>, А. Н. Горбачев<sup>а</sup>, \*\* В. В. Михайлов<sup>б</sup>, Б. Ф. Реутов<sup>а</sup>, А. А. Фокин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»),

ул. Автозаводская, 14, г. Москва, Российская Федерация, \*e-mail: [proprotect@mail.ru](mailto:proprotect@mail.ru)

<sup>б</sup>Институт прикладной физики АН Молдовы,

ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, \*\*e-mail: [valentin.mihailov@gmail.com](mailto:valentin.mihailov@gmail.com)

Описывается создание электроискровых установок для формирования эрозионно- и абразиво-стойких защитно-упрочняющих покрытий на лопатках паровых турбин тепловых и атомных электростанций типа ГВФ и КГБ, разработанных и изготавливаемых ОАО «ВТИ». Особенностью установок является то, что они снабжены электромеханическими вибровозбудителями, обладающими высокими характеристиками по ресурсу и надежностью по сравнению с электромагнитными. Приводятся данные исследования электрических характеристик установки КГБ-5.

*Ключевые слова:* электроискровые покрытия, абразивостойкие покрытия, эрозионно-стойкие покрытия, лопатки паровых турбин, выходная кромка лопатки, входная кромка, тепловая электростанция, атомная электростанция, электроискровое легирование, вибровозбудитель, импульс разряда.

УДК 621.793; 621.9.048

## 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 ресурса и надежности элементов энергетического оборудования является весьма важной и актуальной. Неуклонное возрастание мощности энергетического оборудования определяет повышение эксплуатационных параметров (нагрузок, давления, скорости, температуры), что еще более ужесточает характер эксплуатации оборудования и изнашивания составляющих элементов.

Эрозия рабочих (РЛ) и направляющих (НЛ) лопаток последних ступеней паровых турбин тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанций является одной из известных, но до сих пор не решенных проблем паротурбостроения. Практически все отечественные заводы и зарубежные фирмы последние 70 лет ведут экспериментальные и теоретические исследования эрозионной стойкости различных металлов и ищут новые методы защиты РЛ от каплеударного разрушения влажно-паровым потоком. Так, например, еще в прошлом веке в статье 1938 года советский ученый Л.И. Дегтярев указывал [1],

что РЛ и НЛ почти половины турбин мощностью более 50 МВт страдают от эрозии.

Обострение указанной проблемы характерно не только для отечественной теплоэнергетики. Так, в США ущерб от эрозии и коррозии оборудования энергоблоков составляет несколько миллиардов долларов [2].

Другой не менее важной проблемой, которая присуща паровым турбинам ТЭС, является абразивный износ РЛ и НЛ в части высокого и среднего давления по входным и выходным кромкам, обусловленный попаданием в проточную часть турбины твердых частиц окалины труб поверхностей нагрева котлов, паропроводов размерами от 10 до 300 мкм (микротвердость 7000–7500 МПа) и сварочного грата, остающегося после проведения ремонтных работ на поверхностях нагрева.

## СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЛ

Для защиты от эрозионного разрушения входных кромок РЛ последних ступеней существует несколько методов, при этом каждый обладает рядом достоинств и недостатков. В основном эти способы направлены на защиту входных кромок рабочих лопаток в силу наиболее выраженных износов в процессе эксплуатации. Для защиты от эрозии входных кромок РЛ существует в качестве основных 8 наиболее известных способов:

– припайка пластин из кобальтового стеллита марки ВЗК посредством высокотемпературного припоя к входным кромкам стальных РЛ в приторцовой зоне, которая широко практикуется на заводах изготовителях турбинного оборудования в Российской Федерации и за рубежом [3, 4];

– закалка токами высокой частоты (ТВЧ) входных кромок РЛ из стали 15Х11МФ-Ш [5];

– газопламенный [6];

– высокоскоростное плазменное напыление [6, 7];

– детонационный [6];

– лазерная наплавка [8];

– формирование ионно-плазменных однослойных покрытий из TiN или многослойных покрытий чередованием слоев Ti и TiN [9–12];

– электроискровые покрытия из металлокерамических твердых сплавов ВК6, ВК6ОМ, ВК8, Т15К6 и кобальтового стеллита марки ВЗК на РЛ из сталей 20Х13-Ш, 15Х11МФ-Ш, 13Х11Н2 В2МФ-Ш (ЭИ961-Ш) [13–19].

Выходные кромки РЛ паровых турбин от эрозии (в основном в прикорневых, но и в наиболее нагруженных зонах лопаток) страдают меньше, однако в результате остаются опасные концентраторы напряжений в виде сквозных промывов или трещиноподобных дефектов, выходящих к краю выходной кромки. Как правило, в зоне выходных кромок формирование эрозионно-стойкого покрытия на выходных кромках не осуществляют, ограничиваясь зачисткой поврежденных зон и опиловкой выходных кромок. Формирование защитно-упрочняющих покрытий на выходных кромках не практиковалось из-за опасения изменения микроструктуры лопаточных сталей от термического воздействия.

Задачей повышения надежности и ресурса рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин является разработка технологического процесса формирования защитно-упрочняющих покрытий на входных и выходных кромках, реализуемого не только в заводских условиях производства турбинных лопаток, но и в условиях электрических станций при проведении их ремонтов.

С этой точки зрения особой привлекательностью среди существующих способов обладает процесс электроискрового формирования покрытий. Электроискровое упрочнение входных кромок рабочих лопаток из высокохромистых коррозионностойких сталей 20Х13-Ш, 15Х11МФ-Ш для формирования защитно-упрочняющего покрытия из металлокерамического твердого сплава Т15К6, разработанное в ЦНИИТМАШ [13], применяется с 60-х годов прошлого столетия на АО «Турбоатом» (Украина) для большого

количества турбин ТЭС и АЭС. Для этого были разработаны ручные электроискровые установки ЦНИИТМАШ ЭАИ-1, ЦНИИТМАШ ИЕ-2, ЦНИИТМАШ ИАС-2М, ЦНИИТМАШ ИАС-3, укомплектовывавшиеся вибратором электромагнитного типа с электрододержателями одного, двух, трех и пяти электродов. Установки обладали большим весом (ЦНИИТМАШ ИЕ-2 – 140 кг; ЦНИИТМАШ ИАС-2М – 150 кг, ЦНИИТМАШ ИАС-3 – около 500 кг) и габаритами, что давало возможность формировать покрытия на РЛ только в условиях завода. Однако простота процесса и возможность не оказывать термического влияния на материал лопаток создавали основу для дальнейшего развития оборудования на современной элементной базе, удовлетворяющего принципу мобильности за счет снижения веса и габаритов. При этом открывается перспектива реализации технологического процесса формирования покрытия без разлопачивания роторов и диафрагм направляющих аппаратов. Сравнительный анализ существующих способов по различным критериям показал перспективность электроискрового метода формирования покрытий по сравнению с другими. В табл. 1 представлены результаты сравнительной оценки способа ЭИЛ и других способов, применяемых для упрочнения рабочих лопаток паровых турбин.

Анализ существующих и разрабатываемых методов, приведенных в таблице, показал, что развитие процесса электроискрового формирования покрытий на лопатках турбин с точки зрения универсальности имеет хорошие перспективы. Несмотря на невысокую эрозионную стойкость, сформированные покрытия на сталях имеют высокую абразивную стойкость, возможность реализации технологического процесса электроискрового формирования покрытий непосредственно на электрических станциях в процессе их ремонта.

Оценка метода с точки зрения борьбы с эрозионными повреждениями, по литературным данным различных исследователей, весьма невысока. Применение твердого металлокерамического сплава Т15К6 в виде покрытия толщиной 0,25 мм уступает по эрозионной стойкости кобальтовому стеллиту марки ВЗК в виде пластин, припаяваемых к входной кромке лопатки. Метод достаточно прост и не вызывает термического воздействия на материал стальных лопаток. Учитывая высокую стоимость лопаток последних ступеней (от 1000 до 2000 долларов США за лопатку), стоимость формирования покрытия в условиях станций на облопаченном роторе в объеме 10% является привлекательной для эксплуатирующей организации.

Таблица 1. Результаты сравнительной оценки способа ЭИЛ и других известных методов упрочнения изнашиваемых элементов проточной части паровых турбин

Способ формирования защиты		Параметры			Используемые объекты упрочнения	Коэффициент использования материала (КИМ)	Экологичность	Применимость в ремонтном производстве	Примечание
		Эрозионная стойкость	Абразивная стойкость	Коррозионная стойкость					
Припайка 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	Высокая	Применяется	Используется дорогостоящий припой ПСр-45. Ко 2-му ремонту отслаивается 50–90% пластин.
Закалка ТВЧ стали 15Х11МФ-Ш толщиной 0,2 мм		Низкая, 0,25–0,3	Низкая	Низкая	Только входные кромки РЛ последних ступеней	Высокий	Высокая	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				
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	Высокая	Не применяется	Технологический процесс в 2 раза удорожает себестоимость детали. Низкая производительность процесса.
ЭИЛ покрытие – 180–250 мкм (Технология АО «Турбоатом»)	T15K6	Средняя, 0,6	Высокая	Средняя	Только входные кромки РЛ последних ступеней	Высокий	Высокая	Применяется	Достаточно простая технология. Стоимость проведения работ по формированию покрытия составляет 10% стоимости детали.

Примечание. ГТС – газотермические способы формирования покрытий.

## РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭИЛ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Учитывая достоинства и недостатки метода ЭИЛ, с 1999 г. ОАО «ВТИ» приступило к разработке технологического процесса упрочнения и восстановления входных и выходных кромок РЛ последних ступеней паровых турбин ТЭС и АЭС.

Разработка включала три основных направления:

- поиск и исследование новых эрозионно-стойких материалов для упрочнения и восстановления методом ЭИЛ;

- разработка нового мобильного оборудования и оснастки для формирования покрытия на РЛ;

- разработка нормативного технологического процесса формирования покрытия при упрочнении и восстановлении РЛ.

Основным направлением при решении задач была разработка мобильных установок для формирования покрытия на входных и выходных кромках РЛ и НЛ.

Применение установок типа «ЭФИ» и «ЭЛИТРОН» производства Республики Молдова [14] оказалось малоперспективным из-за низкой производительности, больших габаритов и веса. Например, установка «ЭЛИТРОН-20» с максимальной энергией единичного импульса в 1,0 Дж имеет габариты 480×480×200 мм, а массу – 33 кг. При этом время формирования покрытия на одной лопатке составляло от 40 до 60 мин. Другой явно слабой позицией было использование электромагнитного вибровозбудителя, которым укомплектовывалась установка и у которого весьма низкими были ресурс и надежность. Время работы вибровозбудителей до первой поломки составляло от 1 до 100 часов. При этом имело место частое отклонение от установленных параметров режима вибрации по частоте и амплитуде вибрации из-за быстрой «разладки» вибровозбудителя. В связи с тем что время проведения ремонтов строго регламентировано, установки должны почти непрерывно работать в течение 3–7 суток (перерывы определялись временем смены операторов и периодической сменой объектов обработки).

Использование даже спаренных генераторов установок «ЭЛИТРОН-20» не позволяло получать толщины покрытий из твердых металлокерамических сплавов на основе карбида вольфрама (до 120 мкм), близкие к толщинам, получаемым при производстве РЛ в условиях АО «Гурбоатом» (250 мкм). Толщины покрытий, формируемых на этих установках, удовлетворяли требованиям только выходных кромок. Однако в






условиях ТЭС неудобство использования этих установок определялось сравнительно большими габаритами и весом.

При разработке установок, удовлетворяющих требованиям осуществления ремонтов лопаток на ТЭС и АЭС, объектами непосредственной работы были генератор импульсов и коммутирующее устройство – вибровозбудитель (апликатор). В результате было создано целое семейство установок марок ГБФ и КГБ. Установки КГБ-5, КГБ-5М стали применяться для формирования защитных покрытий на входных кромках рабочих и направляющих лопаток последних ступеней паровых турбин, подвергающихся интенсивной капельной эрозии. Установки ГБФ-2, ГБФ-2М стали использоваться для формирования покрытий, защищающих элементы рабочих и направляющих лопаток от кавитационного и абразивного изнашивания – выходные кромки лопаток последних ступеней, элементы рабочих и направляющих лопаток части высокого и среднего давления турбины. Конструктивно установки КГБ-5 и КГБ-5М отличаются между собой тем, что генератор импульсов установки КГБ-5М представляет собой моноблок, а генератор импульсов установки КГБ-5 – 2-корпусной элемент, соединенный между собой кабелем длиной 10 м [20, 21]. Такая конструкция установки позволила разделить низковольтную и высоковольтную части установки и обеспечить возможность формирования покрытий на лопатках последней ступени через конденсатор турбины.

Основные характеристики установок представлены в табл. 2.

Для уменьшения габаритов и веса разработка установок ГБФ-2М и ГБФ-3 также не предусматривала использования понижающего трансформатора переменного тока. Однако на установках ГБФ-2М и ГБФ-3 пришлось установить небольшой понижающий трансформатор, питающийся от сети переменного тока с напряжением 220 В для запитки блока управления сигналом и электромагнитного вибратора. Для формирования рабочих импульсов использовались оплотисторы, а режимы установок регулировались дискретно. При этом режим установки ГБФ-2М осуществлялся набором из 7 каналов емкостных батарей 150 мкФ, в каждом из которых использовались металлобумажные конденсаторы марки МБГО по 30 мкФ. Выбор режимов установок ГБФ-3 (9 режимов) и КГБ-5 (КГБ-5М) (7 режимов) осуществляли изменением напряжения, подающегося на обкладки электролитического конденсатора емкостью 20000 мкФ.

Таблица 2. Основные характеристики установок электроискрового легирования

Марка установки	Элитрон-20 (сдвоенная)	ГБФ-2М	ГБФ-3	КГБ-5	КГБ-5М
Разработчик	Институт прикладной физики АН МССР	ОАО «ВТИ»			
Количество режимов	9	7	9	7	
Энергия единичного импульса (Дж)	0,1, 0,2, 0,29, 0,19, 0,38, 0,57, 0,4, 0,8, 1,2	0,27, 0,54, 0,81, 1,08, 1,35, 1,62, 1,99	9, 12, 16, 20, 25, 30, 36, 42, 49	16, 20, 25, 30, 36, 42, 49	
Толщина покрытия ВКБОМ, мкм	До 120	До 150	До 250	До 250	
Источник питания	Сеть переменного тока 220 В	Сварочная сеть 60 В и сеть переменного тока 220 В.	Сварочная сеть 60 В	Сеть переменного тока 220 В	
Габариты (мм)	480×(2×200)×480	480×220×420	480×120×500	360×165×400 300×130×230	400×130×470
Вес (кг)	2х35	20	15	12,2	18,5
Подключаемые вибраторы	Электромагнитный	Электромеханический, электромагнитный	Электромеханический, электромагнитный	Электромагнитный, электромеханический	
Основное применение	Используется ограниченно	Выходные кромки РЛ последних ступеней, РЛ и НЛ частей высокого и среднего давления турбины	Используется ограниченно	Входные кромки рабочих лопаток последних ступеней, замена отлетевших стеллитовых пластин	
Фотографии					
	1			2	3

Примечания. 1. Для увеличения толщины покрытия используются две установки, соединенные электрически между собой. 2. Установка состоит из двух блоков, один из которых в соответствии с техникой безопасности можно использовать внутри конденсатора турбины. Длина соединительного кабеля 10 метров. 3. Установка имеет усиленный прочный корпус, защиту от проникновения влаги и пыли.

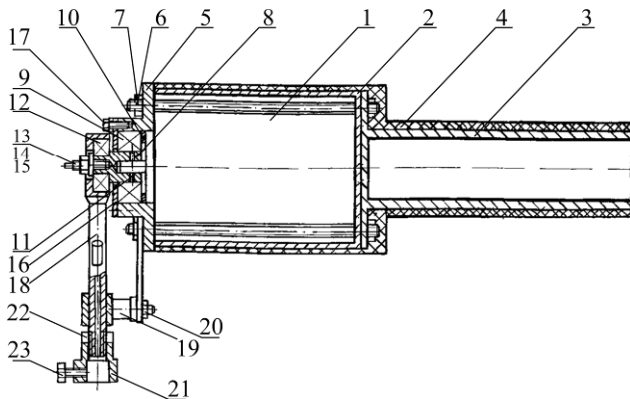
Исходя из условий обеспечения стабильной амплитуды колебаний вибровозбудителя, влияющей на параметры производительности и толщины формируемых покрытий, а также увеличения их надежности и ресурса, в ОАО «ВТИ» совместно с кафедрой теоретической и прикладной механики Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина была разработана принципиально новая конструкция вибратора [22], отличающаяся тем, что механические колебания в вибраторе возбуждаются электродвигателем. Конструкция электромеханического вибровозбудителя представлена на рис. 1.

Электродвигатель 1 приводится во вращение до 6000 об/мин переменным (постоянным) током

с напряжением до 27 В, что позволяет регулировать частоту вибрации электрода в пределах 20–100 Гц. Шатун-электрододержатель 18 совершает механические колебания с фиксированной амплитудой, равной заданному эксцентриситету (для чего используются сменные эксцентрики на базе шарикоподшипников 12 со значениями эксцентриситета 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 мм). Исследования кинетики формирования покрытия показали, что для большинства материалов, применяемых для формирования покрытий на РЛ, амплитуда вибрации составляет от 0,15 до 0,6 мм. Для одновременного охлаждения двигателя, электрододержателя и рабочей зоны в конструкции преду-



смотрена система охлаждения сжатым воздухом посредством шлангов, штуцеров и патрубков. Выходящий из вибратора воздух охлаждает как электрод, так и поверхность, которая подвергается обработке. Испытания вибровозбудителя показали его высокую надежность и стабильность обеспечения технологических параметров. Ресурс вибровозбудителя до первой незначительной поломки составил примерно 12000 часов.



**Рис. 1.** Конструкция электромеханического вибровозбудителя: 1 – электродвигатель; 2 – корпус из капролактама; 3 – рукоятка; 4 – изоляционный материал; 5 – крышка; 6, 7 – шпильки и гайки; 8 – эксцентрик; 9 – подшипник; 10 – шайба; 11 – штифт, соединяющий эксцентрик с валом; 12 – эксцентрик на базе шарикоподшипника; 13–15 – шпилька, винт и гайка; 16 – крышка подшипника; 17 – винт; 18 – шатун-электрододержатель; 19 – направляющая втулка; 20 – кронштейн; 21 – головка электрододержателя; 22 – контргайка; 23 – зажимной винт для электрода.

Воздух к установкам (непосредственно к вибровозбудителям) подается через воздушные шланги от воздушной разводки, находящейся на ремонтной площадке под давлением 0,4–0,6 МПа. Сбалансированная подача воздушной массы позволяет получить не только охлаждение электрода и зоны поверхности обрабатываемой детали, но и дополнительные условия для получения максимального переноса электродного материала на поверхность обрабатываемой детали и соответственно способствовать обеспечению максимальной толщины слоя покрытия.

В связи с тем что технологический процесс формирования покрытия на РЛ предусматривает ручной труд, то для соблюдения ограничения вибратора по массе (не более 0,8 кг) применялись прочные и легкие материалы. Использование капролактама для изготовления корпуса и дуралюминия для крышек и съемной ручки позволили получить следующие конструктивные и технологические параметры вибровозбудителя:

- вес от 600 г (без рукоятки) до 750 г (с рукояткой);

- длина соответственно 155 и 235 мм.

На рис. 2 показан внешний вид электромеханического вибровозбудителя. В результате про-

веденных исследований по созданию установок был разработан технологический процесс восстановления и упрочнения по входным и выходным кромкам РЛ без разлопачивания, реализуемый в следующих положениях ротора:

- на облопаченном роторе непосредственно на турбоагрегате при вскрытой крышке цилиндра;

- на облопаченном роторе, находящемся на опорах ремонтной площадки;

- на облопаченном роторе непосредственно на турбоагрегате без вскрытия крышки цилиндра через конденсатор турбины (в связи с особенностями конструкций паровых турбин указанный вид технологического процесса может быть применен только для РЛ последних ступеней).



**Рис. 2.** Внешний вид электромеханического вибратора: 1 – вибратор без съемной рукоятки; 2 – съемная рукоятка; 3 – сменные эксцентрики.



**Рис. 3.** Формирование эрозионно-стойкого покрытия из металлокерамического твердого сплава ВК60М на входных кромках РЛ 30-й ступени турбины ПТ-80-130 ЛМЗ (ст. № 1) АО «Кишиневская ТЭЦ-2» Республики Молдова.



**Рис. 4.** Формирование защитных покрытий на РЛ 34-й и 39-й ступеней при ремонте турбины К-300-240 ЛМЗ ТЭС «Гацко» (ст. № 1) (Республика Сербская Боснии и Герцеговины) при вскрытой крышке цилиндра. На переднем плане при обработке РЛ 34-й ступени показано использование установки КГБ-5М, на заднем плане – двухкорпусной установки КГБ-5.

Технологический процесс не исключает возможности формирования покрытия на новых или демонтированных восстанавливаемых РЛ в условиях цехов или ремонтных мастерских, так как использование оборудования возможно и в

стационарных условиях. Необходимо подчеркнуть, что подготовка оборудования к работе составляет не более 20 минут.

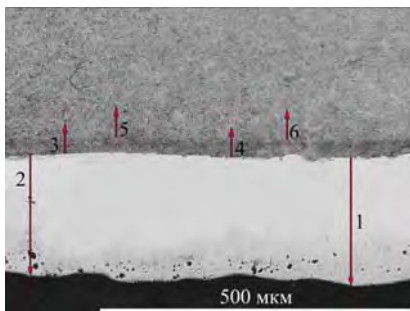


**Рис. 5.** Формирование защитных покрытий на лопатке 55-й ступени через конденсатор при ремонте турбины К-800-240 ЛМЗ ЗАО «Нижевартовская ГРЭС» (ст. № 1) с использованием установки КГБ-5.

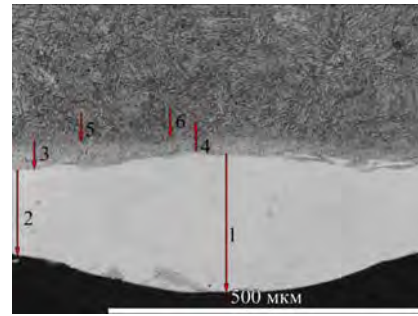
На рис. 3–5 представлены примеры формирования покрытий на РЛ в процессе ремонта.

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СФОРМИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Металлографические исследования формируемых покрытий показали их высокое качество. Дефектов в виде микротрещин, несплошностей покрытия не наблюдается. Покрытия на поперечных шлифах выявляются при травлении 3% спиртовым раствором хлорного железа в виде белых слоев. На рис. 6 и 7 представлены микроструктуры электроискровых покрытий, получаемых на установках КГБ-5 (КГБ-5М) в процессе упрочнения и восстановления лопаток из стали 15X11МФ-Ш. Под покрытием отчетливо выявляется зона термического влияния в виде более темной полосы с микроструктурой отпущенного мартенсита стали при использовании металлокерамического твердого сплава ВК6ОМ и более светлой полосы при использовании в качестве электродного материала кобальтового стеллита марки ВЗК. Микроструктуры обоих покрытий являются типичными, создаваемыми при использовании больших энергий единичного импульса установок электроискрового легирования.



**Рис. 6.** Микроструктура стали 15X11МФ-Ш с покрытием ВК6ОМ, полученным на установке КГБ-5М с энергией единичного импульса 42 Дж. Толщина покрытия 200–210 мкм. Условные обозначения: 1, 2 – покрытие; 3, 4 – зона термического влияния; 5, 6 – сталь 15X11МФ-Ш.



**Рис. 7.** Микроструктура стали 15X11МФ-Ш с покрытием стеллит ВЗК, полученным на установке КГБ-5М с энергией единичного импульса 42 Дж. Толщина покрытия 140–230 мкм. Условные обозначения: 1, 2 – покрытие; 3, 4 – зона термического влияния; 5, 6 – сталь 15X11МФ-Ш.

Анализ микроструктуры образца с покрытием из металлокерамического твердого сплава ВК6ОМ на стали 15X11МФ-Ш (рис. 6) показал, что покрытие на исследуемом участке выявляется в виде белой плохо травящейся полосы. Основа и покрытие четко выявляются на микрошлифе за счет хорошего травления микроструктуры стали 15X11МФ-Ш. При достаточно высоком увеличении между покрытием и основой визуально не выявлено диффузионной зоны взаимного проникновения элементов стали и материала покрытия. Толщина покрытия составляет 200 мкм (размерные линии 1 и 2 на микроструктуре). Под покрытием выделяется более темная зона типичной микроструктуры стали 15X11МФ-Ш (размерные линии 3 и 4 на микроструктуре от линии раздела «покрытие – основа») шириной от 35 до 40 мкм. По всей вероятности, это зона термического влияния, которое оказывает электрический разрядный импульс. При этом в указанной зоне наблюдается размельчение структурных составляющих. Микроструктура стали 15X11МФ-Ш в процессе формирования не меняется и представляет собой отпущенный мартенсит (близкий к структуре сорбита). Микродефектов в структуре стали и на линии «покрытие – основа» не выявлено.

В микроструктуре покрытия на расстоянии от 35 до 45 мкм от поверхности наблюдаются мелкие рассредоточенные поры размерами до 7 мкм, которые могут быть образованы под действием влияния воздуха и его составляющих или удалением мелких твердых фаз при шлифовании и полировании образца. Небольшое количество таких фаз обнаруживается в микроструктуре в пределах до 30 мкм от поверхности покрытия. В работах [13, 14] указывается, что при формировании электроискровых покрытий из металлокерамических твердых сплавов на основе карбида вольфрама весьма вероятно образование фаз из соединений азота и железа:  $\text{Fe}_2\text{N}$  и  $\text{Fe}_4\text{N}$  [16].

Анализ микроструктуры образца с покрытием из кобальтового стеллита ВЗК на стали 15Х11МФ-Ш (рис. 7) показал, что покрытие на исследуемом участке выявляется в виде белой плохо травящейся полосы. Основа и покрытие четко выявляются на микрошлифе за счет хорошего травления микроструктуры стали 15Х11МФ-Ш.

Так же, как и на покрытии из металлокерамического сплава ВК6ОМ, визуально не выявлено диффузионной зоны взаимного проникновения элементов стали и материала покрытия. Однако обнаружены отдельные участки материала покрытия между основой и покрытием, которые свидетельствуют о возможности металлургического перемешивания, происходящего на границе «покрытие – основа». Толщина покрытия составляет от 140 до 230 мкм (размерные линии 1 и 2 соответственно на рис. 7). При этом средняя толщина покрытия составляет 185 мкм. Под покрытием на микроструктуре после травления выявляется более светлая полоса со структурой материала основы по сравнению с цветом материала основы, которая имеет толщину от 22 до 40 мкм и представляет собой зону термического влияния и металлургического перемешивания (размерные линии 3 и 4 на микроструктуре от линии раздела «покрытие – основа»). В этой зоне также наблюдается размельчение структурных составляющих основы, хотя текстурный рисунок микроструктуры основы сохраняется.

Зона металлургического перемешивания на границе «основа – покрытие» косвенно свидетельствует о высокой прочности сцепления покрытия и основы.

Микротвердость покрытий из твердого металлокерамического сплава ВК6ОМ составляет 10000 МПа. Микротвердость покрытия из стеллита ВЗК – 8000 МПа.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВКИ КГБ-5 (КГБ-5М)

Более чем за 40-летнюю практику метод ЭИЛ хорошо зарекомендовал себя как способ получения упрочняющих покрытий на РЛ последних ступеней паровых турбин. Также с появлением новых установок открывается хорошая перспектива расширения номенклатуры деталей, относящихся к проточной части турбин. Уже сейчас ЭИЛ применяется для формирования абразивостойких покрытий на входных и выходных кромках РЛ и НЛ проточной части высокого и среднего давления турбин.

К достоинствам метода ЭИЛ, несомненно, относятся простота, дешевизна и возможность проведения ремонтных работ без разлопачивания

ступеней турбины. К недостаткам – малая, но обеспечивающая работу в межремонтный период толщина покрытия. Поэтому желание увеличить толщину и износостойкость покрытия естественно. Столь же естествен путь увеличения мощности импульса.

В последние годы в ВТИ была разработана и изготовлена установка КГБ-5 (КГБ-5М), мощность импульса которой по крайней мере в 20 раз (характерные значения мощности разряда составляют примерно 50 Дж) превосходит мощность, получаемую на традиционных установках типа ЭЛИТРОН и подобных ей.

Поскольку механизм образования покрытий и на традиционных установках не вполне ясен, представлялось интересным исследовать электрические характеристики разряда на названной установке. Для этого мы записывали осциллограммы тока разряда конденсатора. Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 8. Параметры элементов схемы: емкость  $C = 0,02$  Ф; балластное сопротивление  $R_b = 2,5$  Ом; амплитудное напряжение вторичной обмотки трансформатора  $Q = 90$  В. Регулируемый тиристорный ключ  $K$  открывается, когда напряжение на емкости ( $U_0$ ) достигает выбранного значения (40–75 В).

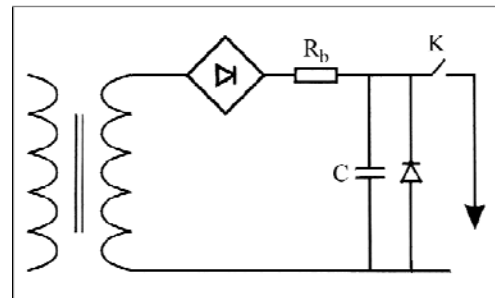


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема установки КГБ-5 (КГБ-5М).

Осциллограммы тока снимались с сопротивления номиналом 0,00075 Ом на цифровой запоминающий осциллограф модели 2100.

Частота вибратора составляла 37 Гц, амплитуда вибрации – 0,5 мм. Типичная осциллограмма для  $U_c = 70$  В приведена на рис. 9.

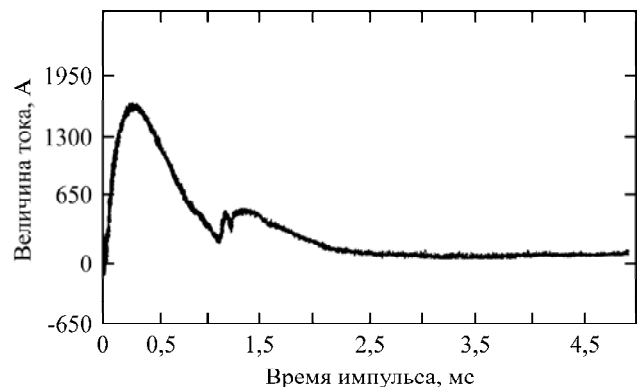


Рис. 9. Осциллограмма разрядного тока ( $U_0 = 70$  В).



Характерным для наблюдаемых осциллограмм было наличие двух максимумов. Максимальные значения токов в локальных максимумах 1600 и 600 А указаны на рис. 9.

Очевидно, что первый максимум (1600 А) соответствует разряду конденсатора через воздушный промежуток, второй (600 А) происходит при касании электродом металлической подложки. Иначе объяснить появление второго максимума при падающем напряжении на конденсаторе весьма затруднительно. Собственно, форму первого максимума можно объяснить, предположив, что схема на рис. 8 представляет собой  $R-L-C$ -контур, в котором паразитные сопротивление и индуктивность определяются внешним разрядным контуром (в первом приближении подводящими к детали проводами). В пользу этого предположения указывает и независимость длительности импульса от напряжения зарядки конденсатора. Если допустить, что напряжение  $U_{sp}$  на искровом промежутке постоянно в течение всего времени разряда, то первый максимум на рис. 9 можно описать известным уравнением:

$$\frac{Q(t)}{C} + \frac{Ld^2Q(t)}{dt^2} + \frac{RdQ(t)}{dt} + U_{sp} = 0. \quad (1)$$

При начальных условиях

$$\begin{aligned} Q(t) &= CU_0, \\ Q(t) &= CU_0, \quad i(0) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

решение принимает вид:

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{dQ}{dt} = \frac{C(U_0 - U_{sp})}{\omega_\Delta} \times \\ &\times (\omega_\Delta^2 + \omega_2^2) \exp(-\omega_2 t) \sin(\omega_\Delta t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Q(t)$  – заряд конденсатора;  $i(t)$  – величина тока;

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \frac{R}{2L}; \\ \omega_\Delta^2 &= \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}. \end{aligned}$$

Поскольку  $di(t)/dt \sim [\omega_\Delta \cos(\omega_\Delta t) - \omega_2 \sin(\omega_\Delta t)]$ , положение первого максимума не должно зависеть от напряжения, а его значение примерно равно  $(U_0 - U_{sp})$ .

Анализ осциллограмм показывает, что положение максимума ( $t_{\max 1} \approx 0,3$  мс) действительно не зависит от напряжения.

Количественная обработка значения максимального тока осложняется тем обстоятельством, что в используемой схеме тиристорный ключ  $K$  открывается при достижении установленного значения напряжения на конденсаторе  $U_0$ , но

зарядка конденсатора при этом может продолжаться. Учитывая, что частота вибратора 37 Гц ( $\tau_b \sim 0,027$  с), а  $R_b C = 2,5 \cdot 0,02$ ,  $\tau = 0,05$  с, поправка может оказаться заметной, особенно на малых значениях  $U_0$ .

Тем не менее расчетные [выражение (3)] и экспериментальные кривые зависимости тока от времени, как видно из рис. 10 ( $U_0 = 70$  В; и  $U_0 = 40$  В), неплохо совпадают. При этом для расчета приняты следующие значения:  $L = 3,5$  мкГн,  $C = 0,02$  Ф,  $R = 0,022$  Ом,  $U_{sp} = 18$  В.

Видно, что при разумно выбранных параметрах цепи обе экспериментальные кривые описываются обычным уравнением для колебательного контура. При этом частота  $\omega_\Delta = (1/LC - R^2/4L^2)^{1/2} \approx 2,1$  кГц, что реально, то есть мы работаем в режиме квазиколебательного процесса. В нашей схеме смена знака тока невозможна из-за предохранительного диода, стоящего параллельно емкости. Отметим, что критическое значение сопротивления, определяющее переход в аperiodический режим,  $-0,027$  Ом.

Значение сопротивления можно оценить и по значению локального максимума на втором максимуме осциллограммы. Для этого учтем, что в точке максимума  $Ldi(t) = 0$ ,  $U_{sp} = 0$  (режим короткого замыкания). Заряд на конденсаторе (и соответственно напряжение на нем) можно оценить численно, интегрируя экспериментальные кривые тока; значение тока известно:  $R = U_{\max 2}/I_{\max 2}$ . Такая оценка дает значение  $R \approx 0,026$  Ом, что практически совпадает с оценками сопротивления по формуле (3).

Совпадение расчетных и экспериментально наблюдаемых значений подтверждает работоспособность модели. Таким образом, мощность плазменного разряда и, как мы предполагаем, толщина покрытия определяются не только мощностью, накопленной в конденсаторе, но и параметрами ( $L, C, R$ ) цепи.

Существенный вклад в характеристики процесса вносят и геометрические параметры, определяемые параметрами вибратора и шероховатостью поверхности.

В данном случае использовался вибратор, совершающий колебания с ходом электрода 1 мм и частотой 37 Гц, то есть координата вибратора  $Z$  (мм)  $\approx 0,5 \sin(2\pi \cdot 37t + \phi)$ . За время, проходящее от закоротки до начала процесса и от закоротки до разрядки конденсатора (примерно 1 мс), вибратор может пройти в зависимости от значения начальной фазы от 0,016 до 0,12 мм, то есть расстояние, лежащее в пределах шероховатости поверхности.

Осциллограмма тока в цепи с балластным сопротивлением разрядки 0,25 Ом (рис. 11)

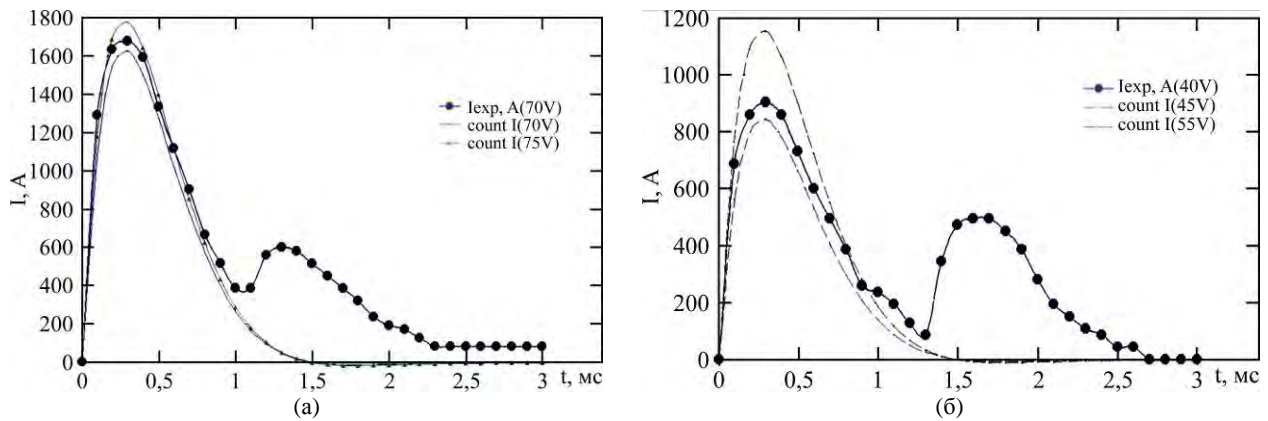


Рис. 10. Экспериментальные (●) и расчетные зависимости разрядного тока от времени (▲, ■): (а) – при  $U_0 = 70 V$ ; (б) – при  $U_0 = 40 V$ .

демонстрирует разряд длительностью приблизительно 6 мс, или  $\frac{1}{4}$  периода вибратора, и служит подтверждением того, что разряд происходит при минимальной скорости движения вибратора.

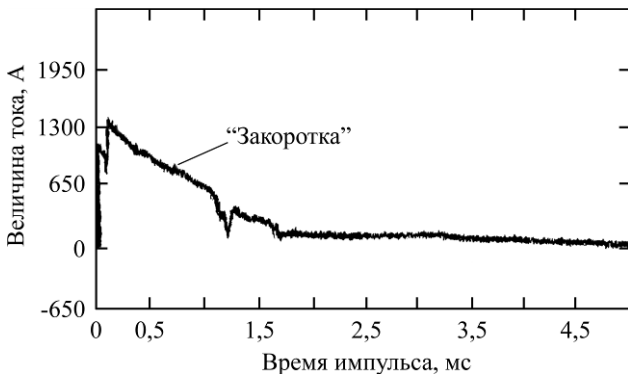


Рис. 11. Осциллограмма разрядного тока при  $U_0 = 70 V$  с балластным сопротивлением разрядной цепи  $R_b = 0,25 \text{ Ом}$ .

То, что указанный на рис. 11 участок определяется именно «закороткой», подтверждается экспоненциальной зависимостью тока от времени. Показатель экспоненты на этом участке равен  $-0,2$ , то есть  $\tau = 5 \text{ мс}$ , что точно соответствует значению  $RC = 0,25 \text{ Ом} \cdot 0,02 \text{ Ф}$ .

## ВЫВОДЫ

1. Показана перспективность развития и использования метода ЭИЛ для упрочнения и ремонта рабочих и направляющих лопаток прочной части паровых турбин тепловых и атомных электростанций, подвергающихся абразивному и эрозионному изнашиванию влажно-паровым потоком.

2. Разработан ряд ручных мобильных установок типа ГБФ и КГБ для формирования абразивостойких и эрозионно-стойких покрытий на входных и выходных кромках для рабочих и направляющих лопаток прочной части паровых турбин тепловых и атомных электростанций.

3. Разработка установок типа ГБФ и КГБ позволила обеспечить ремонт рабочих лопаток

паровых турбин без разлопачивания ротора при следующих его положениях:

- на козлах или стапеле ремонтной площадки;
- на подшипниковых опорах в «постели» цилиндра при вскрытой крышке цилиндра;
- через конденсатор турбины без вскрытия крышки цилиндра (только для рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин).

4. Разработана конструкция электромеханического вибровозбудителя, имеющая более высокие показатели по ресурсу и надежности, чем электромагнитные вибровозбудители.

5. Проведены металлографические исследования покрытий, формируемых из металлокерамического твердого сплава ВК60М и кобальтового стеллита марки ВЗК на лопатки, из коррозионно-стойкой стали 15Х11МФ-Ш, проведены исследования микроструктуры, микротвердости и толщины слоев.

6. Изучены электрические характеристики установки КГБ-5 (КГБ-5М) с целью получения покрытий большей толщины за счет увеличения мощности разряда, в результате которых установлено, что:

- разряд адекватно описывается простой моделью колебательного контура;
- в диапазоне напряжения 40–70 В установка работает в режиме автосинхронизации, то есть разряд конденсатора начинается при приближении электрода к поверхности детали;
- попытки увеличения толщины покрытия за счет дальнейшего роста мощности разряда сталкиваются с серьезными ограничениями: увеличение емкости удлиняет время разрядки, соответственно более половины мощности разряда будет происходить в режиме короткого замыкания, что явно уменьшит КПД установки и вряд ли улучшит качество покрытия;
- увеличение напряжения на конденсаторе влечет за собой усложнение схемы и противоречит правилам ТБ, особенно при работе в конденсаторе турбины.

7. Перспективным направлением в улучшении качества покрытий могут оказаться борьба с паразитной индуктивностью и рациональный выбор новых материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярев Л.И. *Советское котлотурбиностроение*. 1938, (4), 4–11.
2. Рыженков В.А. *Теплоэнергетика*. 2000, (6), 20–25.
3. Резинских В.Ф., Богачев А.Ф., Лебедев А.И., Рыженков В.А., и др. *Теплоэнергетика*. 1996, (12), 28–31.
4. Неуймин В.М. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2010, (2), 52–54.
5. Сельский С.В., Сорокина Т.М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000, (4), 25–27.
6. Балдаев Л.Х. *Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления*. М.: Компрессорная и химическая техника, 2004. 247 с.
7. Микитянский В.В., Велес Парра Р., Велес-Пивоваров А.Р. *Вестник АГТУ. Серия «Морская техника и технология»*. 2006, (2), 95–101.
8. Брант М., Харрис Дж., Гринчук А. *Энергия и менеджмент*. 2013, (4–5), 2–6.
9. Mann B.S., Vivek Arya, Maiti A.K. et al. *Wear*. 2006, **260**(1–2), 75–82.
10. Никитин В.И., Смыслов А.М., Лисянский А.С., Смыслова М.К., и др. *Теплоэнергетика*. 2009, (2), 2–6.
11. Ковальский А.Э., Картмазов Г.Н., Кунченко В.В. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006, (6), 5–18.
12. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Луценко А.Н. *Вопросы материаловедения*. 2008, (2), 175–186.
13. Иванов Г.П. *Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин*. 2-е изд., исп. и доп. М.: МАШГИЗ, 1961. 303 с.
14. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца», 1985. 196 с.
15. Ochai Hiroyuki, Watanabe Mitsutoshi and et al. *IHI Engineering Review*. 2006, **20**(1), 26–48.
16. Шкляр А.И., Жученко Л.А., Ермолаев В.В., Беляков А.В. *Теплоэнергетика*. 2007, (4), 4–7.
17. Беляков А.В., Горбачев А.Н., Шапин В.И. *Электрические станции*. 2006, (7), 21–28.
18. Гадалов В.Н., Сальников В.Г., Агеев В.Е., Романенко Д.Н. *Металлография металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами*. М.: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2015. 468 с.
19. Belyakov A.V., Kalugin R.N., Panteleenko F.I., Khina V.B. and et al. *Power Technology and Engineering*. 2014, **48**(2), 147–152.
20. Беляков А.В., Горбачев А.Н., Калугин Р.Н., Мирзоян А.Э. *Установка для нанесения электроискровых покрытий с отдельными высоковольтным и низковольтным блоками электропитания*. РФ пат. на ПМ 130534, 2013. Бюл. № 21.
21. Беляков А.В., Горбачев А.Н., Шапин В.И. *Abstracts 5<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics and Symposium “Electrical Methods of Materials Treatment” in memoriam of acad. Boris Lazarenko (1910–1979)*, Chisinau, 2010, p. 339.
22. Беляков А.В., Горбачев А.Н., Шапин В.И., Вихрев С.В. *Устройство для электроискрового легирования с приводом от вращающегося ротора*. РФ пат. на ПМ 38661, 2004. Бюл. № 19.

Поступила 24.07.15

После доработки 12.10.15

#### Summary

The article is devoted to the creation of installations for generating electric spark erosion and abrasion-resistant protective and strengthening coatings on the blades of steam turbines of thermal and nuclear power plants such as GBF and the KGB, developed and manufactured by the JSC "VTI". A feature of installations is that their being equipped with electromechanical exciters with a high performance and reliability of the resource compared to electromagnetic ones. The data from the study of electrical characteristics of the installation KGB-5 are presented.

*Keywords: electrical discharge coating, abrasion resistant coatings, erosion resistant coatings, steam turbine blades, trailing edge of the blade, front edge, thermal power plant, nuclear power plant, electrospark discharge, exciter, pulse discharge.*