

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И НАПЛАВКИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

К. т. н. Неуймин В. М.<sup>1</sup>,  
инж. Игнатова С.А.<sup>1</sup> (ООО «ТСЗП»)

**АННОТАЦИЯ.** Оборудование электростанций Российской Федерации обновляется медленными темпами. Широкое применение прогрессивных технологий газотермического напыления и наплавки функциональных покрытий при ремонте и изготовлении оборудования позволит поднять эффективность технического перевооружения электрических станций, продлить срок службы энергетического оборудования, повысить конкурентоспособность отечественных энергомашиностроения и электроэнергетики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** энергомашиностроение, электроэнергетика, износ, повреждения, газотермическое напыление, изготовление, ремонт, наплавка, эффективность, конкурентоспособность.

**ABSTRACT:** Equipment of thermal power plants is updated with slow rate. Wide application of advanced thermal barrier, wear and corrosion resistant, electrical insulation, superconducting composition coatings for repair and manufacture of the thermal power plants equipment will be allowed to improve efficiency of carried out works, extend service life and increase competitiveness of domestic power-plant engineering.

**KEY WORDS:** power machine building, Electrical Power Industry, equipment, wear, defect, thermal spraying, strip overlay welding, renovation, efficiency, resource, competitiveness.

Энергетическое машиностроение — консервативная отрасль экономики, в которой новые технологии ремонта и изготовления оборудования появляются не так часто.

В ряде высокотехнологичных отраслей не менее четверти века (аэрокосмическая промышленность, авиационное машиностроение) применяются технологии газотермического напыления (ГТН) многофункциональных покрытий [1], лазерной [2] и плазменной наплавки [3]. Электроэнергетика — емкий сегмент динамично растущего мирового рынка технологий ГТН покрытий. Так, в странах ЕС в 2012 г. на долю этого рынка приходилось 16% общего объема рынка ГТН покрытий, что незначительно уступало рыночной доле технологий ГТН покрытий в аэрокосмической промышленности (17%), машиностроении (19%), автомобилестроении (21%).

Предотвращение или существенное замедление износа деталей энергооборудования электростанций РФ и, тем самым, повышение его надежности и конкурентоспособности возможно путем применения технологий ГТН функциональных покрытий и лазерной и плазменной наплавки при изготовлении или ремонте деталей [4].

Оборудование всех систем электростанций в процессе эксплуатации претерпевает различные виды износа. На поверхностях деталей оборудования со вре-

менем появляются следы эрозионно-коррозионных (ЭКП), коррозионных (КП), электроэрозионных (ЭП), абразивных (АП) [5] и иных повреждений, требующие восстановления.

ЭКП — наиболее распространенный вид повреждений, которым подвергаются посадочные места, разъемы и обоймы диафрагм, гребни концевых уплотнений турбин. Водорастворимые примеси воздействуют на лопаточный аппарат, вызывая или сопровождая ударное воздействие капель, явления кавитации и коррозионное растрескивание металла под напряжением, особенно, в зоне фазового перехода. Значительную опасность представляет эрозионный износ входных кромок рабочих лопаток (РЛ) последних ступеней цилиндра низкого давления паровой турбины. Механические примеси в паре способствуют эрозионному износу элементов парораспределения, регулирующих ступеней и ступеней давления цилиндра высокого давления (ЦВД) турбин. При работе на малых нагрузках при открытых 1–2 регулирующих клапанах в большей степени страдает сопловой аппарат и РЛ регулирующей ступени ЦВД, а при нагрузках, близких к максимальным, в зону эрозионных повреждений могут войти ближние к регулирующей ступени давления, эродируют поверхности дисков рабочих колес вблизи разгрузочных отверстий со стороны паровпуска.

КП отмечают на полотнах дисков рабочих колес у разгрузочных отверстий и придисковых галтелях,

<sup>1</sup> 105484, Москва, 16-я Парковая ул., д. 27

ободах дисков, бандажных связях, концевых, диафрагменных и надбандажных уплотнениях, корпусных деталях цилиндров турбин (особенно в зоне фазового перехода). После длительных простоев получают повреждения усики и заплечики сегментов, пружины, канавки на валах концевых уплотнений.

Основное условие появления ЭП — наличие источников тока, протекающего по ротору турбины. Характерные признаки ЭП: сильная остаточная намагниченность деталей непосредственно после вскрытия турбины в связи с аварийным останом; наличие прижогов на поверхности деталей в виде точечных углублений и электроэрозионных каверн, чаще покрытых черным налетом продуктов высокотемпературного окисления масла; «отпечатки» выступов или отверстий контртела на поврежденной поверхности; матовые пятна на блестящей приработанной поверхности шеек и вкладышей подшипников; неглубокие отпечатки (треки) электрического разряда на поверхностях деталей. ЭП чаще наблюдаются при пуске турбоагрегата после ремонта; резком изменении его вибросостояния; наборе нагрузки; срабатывании защит; попадании влаги на нагретый ротор. ЭП приводят к перегреву и задирам шеек, упорных гребней и колодок подшипников с последующим разрушением баббитового слоя вкладышей и абразивному износу деталей; свариванию и разрушению зубчатых муфт и передач; износу деталей блока регулирования; износу уплотнений и шеек ротора под уплотнениями; сварке и усиленному износу крепежа, штифтов разного рода.

Оборудование и металлоконструкции пылеугольных ТЭС работают в условиях повышенных нагрузок при постоянном воздействии угольной пыли и золы и подвержены активному абразивному износу.

На элементах конструкций систем пылеприготовления, подверженных повышенному износу, снижение интенсивности износа поверхностей элементов конструкций может быть достигнуто соответствующими конструктивными решениями или применением износостойких материалов и покрытий. С целью экономии дорогостоящих материалов, стойких к абразивному износу, целесообразно рассматривать лишь упрочнение поверхностей деталей, работающих в наиболее тяжелых условиях. Элементы подготовки и транспортировки угля (сепараторы пыли, циклоны систем топливоприготовления) также подвергаются существенному абразивному износу. Их ремонт требуется через каждые 4–5 тыс. ч эксплуатации. Узлы пересыпки и приемные бункеры, ложные листы узлов пересыпки и течи сырого угля становятся неремонтопригодными после 4–5 тыс. ч эксплуатации. Традиционные способы ремонта сепаратора пыли, циклона пыли системы пылеприготовления (из стали марки Ст. 3) заключаются в механической обработке изношенных поверхностей и последующей наплавке рабочих поверхностей электродами марки УОНИ-3 и УОНИ-4. Ложные листы узлов пересыпки и течек (из стали марки Ст.3сп5 толщиной 10–16 мм) для повышения

стойкости против абразивного износа наплавляются «сеткой» размером 150×150 или иного размера со стороны рабочей поверхности электродами марки Т-590. После эксплуатации в течение 4–5 тыс. ч указанные конструкции заменяются, поскольку глубина износа элементов достигает 60% толщины листа.

Сущность процессов ГТН покрытий заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала в процессе нагрева, диспергирования (измельчения частиц порошка или материала проволоки с получением порошков, суспензий, эмульсий), обеспечивающих перенос их на поверхность детали при оптимальных для формирования слоя покрытия значениях температуры и скорости потока. Процессы ГТН покрытий классифицируют по видам используемого источника энергии: газовые (газопламенный, сверхзвуковой газопламенный, детонационно-газовый), газозлектрический (электродуговой, плазменно-дуговой, высокочастотный); по форме напыляемых материалов (порошок, проволока) и способам их нанесения; по функциональному назначению (термостойкие, эрозионно- и коррозионностойкие, теплозащитные, износостойкие, антифрикционные, кислотостойкие и иные покрытия).

Многофакторность процесса ГТН покрытий обуславливает его чувствительность к отклонениям в режиме и повышает значимость контроля качества покрытия. Основные характеристики защитных покрытий, получаемых методами ГТН покрытий и наплавки, приведены в табл. 1.

В энергомашиностроении и электроэнергетике Российской Федерации технологии ГТН покрытий, лазерной и плазменной наплавки нашли лишь точечное применение. Так, ОАО «Уралэнергоремонт» периодически привлекает ООО «ТСП» для выполнения субподрядных работ по восстановлению геометрических размеров крупногабаритных и ответственных деталей паровых турбин и иного энергооборудования (рисунки 1 и 2); в 2012–2014 гг. ООО «ТСЗП» для Группы «Интер РАО» выполнен комплекс НИОКР, по итогам которых Заказчику сдан в эксплуатацию опытный участок по освоению технологии высокоскоростного сверхзвукового газопламенного напыления, лазерной и плазменной наплавки; ООО «ТСЗП» разработано и в 2015 г. методом плазменной наплавки нанесено термобарьерное покрытие ( $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2$ ) на направляющие лопатки первой ступени и рабочие лопатки первой и второй ступеней, термобарьерное покрытие ( $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2$ ) методом высокоскоростного газопламенного напыления (начаты испытания лопаток в составе газовой турбины №2 энергоблока «Ивановские ПГУ»), а также на съемный газосборник и жаровые трубы камеры сгорания газовой турбины ГТЭ-110М.

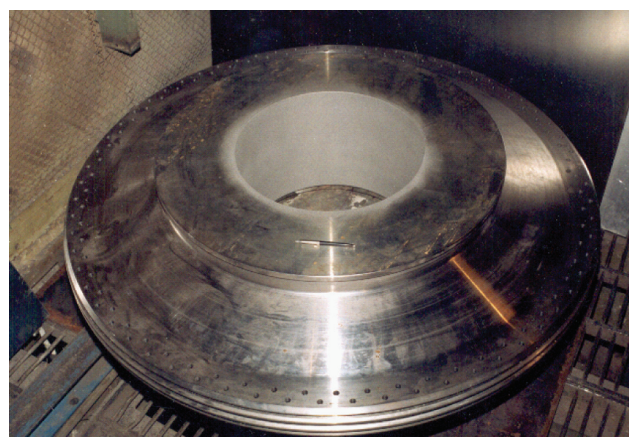
В ходе работы над тематикой НИОКР ООО «ТСЗП» разработан ряд технических решений, на которые получены патенты, в том числе: RU 2532646C1, RU 2545881C2, RU2545877C2.

Таблица 1. Основные характеристики защитных покрытий, получаемых методами ГТН (газопламенного, высокоскоростного газопламенного, детонационного, плазменного напыления) покрытий, лазерной и плазменной наплавки.

Показатели	Методы нанесения покрытий					Наплавка
	Высокоскоростное (HVOF)	Газопламенное	Детонационное	Плазменное (APS)	Электродуговая металлизация (ЭДМ)	Лазерная/плазменная (LC/PTA)
1	Нержавеющие сплавы на основе железа	Углеродистые и легированные стали	Сталь 20X13	Нержавеющие сплавы на основе железа	Проволоки сплошные, композиты	Материал на основе Ni, Co, Fe
Пористость	до 2%	2–8%	0.5–1.0%	1.0–2.0%	5–25%	Монолит, металлическая связь
Микротвердость	500–800 HV	240–600HV	460 HV	500–800 HV		60/64 HRC
Прочность сцепления	70–80 МПа	15–30 МПа	40–60 МПа	50–80 МПа	20–50 МПа	
Толщина	350–500 мкм	350–500 мкм	250 мкм (тв. фаза на границе)	350–500 мкм	350–500 мкм	Ср. 3/2 мм
2	Сплавы на основе никеля, антифрикционные (дисульфид молибдена)	Нержавеющие стали	Легированный чугун ЧН15Д7	Сплавы на основе никеля, тугоплавкие		
Пористость	не > 1%	2–4%	до 0.1%	< 1%		
Микротвердость	до 820 HV	270–330 HV	440–496 HV	до 820 HV		
Прочность сцепления	70–80 МПа	15–30 МПа	40–60 МПа	60–80 МПа		
Толщина	350–500 мкм	350–500 мкм	182 мкм (имеются плотные участки до 0.5%)	350–500 мкм		
3	Твёрдые сплавы (карбиды вольфрама, кобальта, хрома)	Баббиты		Керамические материалы		
Пористость	< 1%	не >9%		8–15%		
Микротвердость	900–1200 HV	25–27 HV		900–1500 HV		
Прочность сцепления	> 80 МПа	30–40 МПа		50–80 МПа		

Помимо приведенных на рисунках 1–3 данных имеется положительный опыт восстановления методом плазменного напыления поверхностей многих де-

талей или сборочных единиц энергооборудования: шеек роторов турбин, насосов, дымососов, воздуходувок; валов насосов и гидромфут; стоек насосов;



а



б

Рис. 1. Восстановление посадочного размера заготовки диска рабочего колеса (вес 2,9 т) (а) и облопаченного диска (б) мощной паровой турбины методом плазменного напыления (производственный брак, устранил ООО «ТСП» на 40 дисках и 10 рабочих колесах).



Рис. 2. Восстановление ООО «ТСП» полумуфты ротора турбины К-800-23,5 Пермской ГРЭС (вес полумуфты свыше 1500 кг) методом плазменного напыления по заказу ОАО «Уралэнергоремонт».



Рис. 3. Восстановление ООО «ТСП» методом плазменного напыления геометрии лопатки и последующей лазерной наплавкой порошкового стеллита на входные кромки РЛ (материал лопатки — ЭИ-961, профиль лопатки 1400) последней ступени паровой турбины К-300.

уплотнительных поверхностей и приводных элементов арматуры [6]; подшипниковых щитов мощных электродвигателей; золотников и букс систем управления гидроприводом; штоков задвижек; деталей магнитной подушки опоры, втулки контактных колец генератора; внутренней поверхности букс (Dу 100–800 мм) с износом до 3 мм на сторону электродвигателей (по заказу ОАО «Уралэнергоремонт ООО «ТСП» восстановлено свыше 120 букс); защита от высокотемпературного газообразного износа поверхностей нагрева труб диаметром 60 мм топочной камеры водогрейного котла КВ с кипящим слоем путем газо-

порошковой наплавки слоя толщиной 3 мм на участке износа длиной 800 мм на одном из энергообъектов Иркутска (стойкость труб до наплавки защитного слоя не превышала 2 мес., а через 1 год после наплавки (в 2004 г.) следов износа поверхностей труб на проблемном участке установлено не было), и многих других деталей. Перспективно применение лазерной наплавки при реновации уплотнительных поверхностей защитной арматуры.

Замена изношенных надбандажных, диафрагменных, концевых уплотнений паровой турбины на наносимые методом ГТН прирабатываемые покрытия в зависимости от уровня фактического износа уплотнений может обеспечить рост КПД проточной части турбины до 2% и более. Эффективным является применение прирабатываемых покрытий в горячей части газотурбинного двигателя (ГТД): обеспечивается рост КПД и тепловой мощности двигателя за счет уменьшения периферийных зазоров по торцам лопаток и гребешкам лабиринтных уплотнений между ступенями по всей окружности, тем самым уменьшается износ дорогостоящих лопаток. Основными требованиями к уплотнительным покрытиям в ГТД являются достаточная прочность, податливость при врезании лопаток лабиринтными выступами, антифрикционность, теплозащитные свойства, эрозионная стойкость и низкое сопротивление износу рабочей поверхности (со стороны газового потока). Применяют плазменное или газопламенное напыление покрытий толщиной 1–3 мм на статорные элементы компрессора и рабочие лопатки газовой турбины. Исходным материалом для получения уплотнительных слоев является механическая смесь (шихта) мелкодисперсных порошков, металлов и твердой смазки, гранулированная на силикатном связующем, в качестве которого обычно используют жидкое стекло.

Основными материалами для уплотнений компрессора являются алюминий, никель, жидкое стекло, твердая смазка (графит или нитрид бора). С увеличением рабочей температуры в качестве основы уплотнительного материала подбираются материалы в порядке повышения температурной стойкости: 450°C — алюминий (АНБ); 650°C — медно-никелевая губка (20Б); 750°C — никель (УВС-2); 750°C — никель-кремниевая губка (КНА); до 850°C — MeCrAlY. В качестве твердой смазки используют графит (до 800°C) или нитрид бора (до 1200–1400°C).

Из опыта напыления композиций уплотнительных материалов установлено, что в плазменной струе первоначально плавится силикатное связующее (~850–890°C), а затем металлические компоненты. Нитрид бора и графит сохраняются в частицах шихты в твердом состоянии, возможна сублимация нитрида бора с поверхности мелкодисперсных частиц. Применение указанных композиционных материалов на силикатном связующем не позволяет обеспечить длительную работоспособность уплотнительных (прирабатываемых)

покрытий в ГТД при температурах свыше 850–870°C.

При разработке современных газотурбинных двигателей пятого поколения, работающих при повышенных температурах (до 1000°C), для уплотнения зазоров и защиты деталей обычно применяют сотовые наплавляемые уплотнения.

Используемые в настоящее время в турбинах радиальные сотовые уплотнения не предотвращают в достаточной мере перетекание газа, что уменьшает КПД оборудования. При этом паяные уплотнения недолговечны, а соты вызывают повышенный износ лопаток. Кроме того, основной материал при использовании в стационарных турбинах с начальной температурой газа более 1120°C нуждается в защите от высокотемпературной газовой коррозии и снижении температуры для обеспечения необходимых прочностных свойств при минимальном расходе охлаждающего воздуха. Покрытия имеют более высокие стойкость при окислении на воздухе, пластичность и прочность сцепления с конструкционными материалами. Для уплотнения зазоров и защиты деталей, работающих при высоких температурах (до 1200–1400°C), применяют керамические теплозащитные материалы. Перспективными считаются покрытия из плакированных или интерметаллидных сплавов на основе алюминид- никеля, легированных тугоплавкими металлами с нитридом бора и полиэстром.

С 2000 г. на базе ФГУП «ММПП «Салют» ведутся разработки и проводятся испытания уплотнительных (прирабатываемых) теплозащитных покрытий и технологий их напыления. Результатом исследований стали два новых покрытия: газопламенный уплотняющий шнуровой материал УВС-2ГШ, работающий при максимальной температуре 800°C, и термобарьерный уплотняющий материал (ТБУ), работающий при температуре 1200–1400°C. Разработки подтверждены испытаниями ФГУП «ВИАМ» и опробованы на авиационных и стационарных турбинах. Наиболее востребованным при конструкторской разработке современных турбин является ТБУ — совместная разработка ФГУП «ВИАМ» и ООО «ТЦ-Техникорд». Материал в виде композиционного порошка на основе керамики системы  $ZrO_2 + 7-8\% Y_2O_3$  предназначен для напыления газотермическим плазменным методом прирабатываемого термобарьерного уплотнительного покрытия (ТБУ-покрытие). ТБУ-покрытие предназначено для использования на статорных частях из жаропрочных сплавов ступеней газовой турбины в качестве радиального уплотнения зазора между торцами РЛ колеса ротора и статором турбины. Толщина рабочего слоя ТБУ-покрытия составляет 2,0–3,0 мм, толщина промежуточного жаростойкого слоя системы  $Co-Ni-Cr-Al-Y$  — 0,10–0,15 мм. Материал представляет собой гранулированный порошок, размер основной фракции — 20–100 мкм, содержание частиц округлой формы — не менее 70%. Материал содержит неорганическое высокотемпературное связующее — бимитгель, одновременно улучшающее проплавление керамических частиц, и сухую смазку — гексагональный

нитрид бора (BN),  $ZrO_2 + 7-8\% Y_2O_3$ . Преимущества ТБУ-покрытия по сравнению с прототипами:

- более упрощенный способ приготовления порошкового материала за счет применения бимитгеля. Бимитгель уменьшает потери нитрида бора в процессе приготовления и напыления материала. Его применение в качестве связующего позволяет повысить коэффициент использования материала за счет тепловой (экзотермической) реакции при прохождении материала через струю плазмы;

- в процессе длительной работы ТБУ-покрытия фактически исключаются потери нитрида бора за счет применения бимитгеля, а от количества нитрида бора в структуре покрытия зависят прирабатываемые свойства и эффективность работы уплотнения в целом, уменьшая износ дорогостоящих вращающихся частей ГТД. Введение бимитгеля позволяет обеспечить уплотнение проточного тракта при соотношении линейного износа уплотнительного материала к износу лопатки, равном 3:1. Существующие серийные уплотнительные материалы, используемые в интервале температур 500–800°C, имеют соотношение износов 1:1 – 5:1;

- за счет оптимального содержания нитрида бора в покрытии исключается эффект налипания материала покрытия на торец пера лопатки. Эта зависимость более заметна при длительной эксплуатации ГТД;

- не требует специального упрочнения торца лопатки, а покрытие толщиной 2,0–2,2 мм позволяет снизить температурное воздействие на основной материал на 43–45°C.

Защита от коррозии путем нанесения протекторных покрытий на поверхности дымовых труб, градирен, выхлопных шахт газопоршневых агрегатов, резервуаров, прифланцевых участков под изоляцией водопроводов систем теплоснабжения дает существенный эффект. Так, для увеличения срока службы металлоконструкций в 3–5 раз наносится слой Al толщиной 100–150 мкм, который затем покрывается кремний-органическим лаком; алюминиевое покрытие толщиной 250 мкм обеспечивает полную антикоррозионную защиту металлоконструкций резервуаров, например, для хранения нефти и нефтепродуктов, в течение не менее 20 лет; срок службы прифланцевых участков под изоляцией водопроводов систем теплоснабжения, упрочненных методом нанесения протекторных покрытий, возрастает до 50 лет.

Вышеперечисленные технологии с большой эффективностью могут быть применены при ремонте или изготовлении любой детали или сборочной единицы преимущественно тепломеханического энергетического оборудования, а также турбогенератора, электродвигателей, металлоконструкций.

## Выводы

1. Анализ материалов и технологий, используемых при изготовлении деталей и сборочных единиц энергетического оборудования; условий его эксплуатации

и возможных дефектов; причин, определяющих связь между технологиями изготовления деталей оборудования и их эксплуатационными свойствами, позволяет создать детали нового поколения для оборудования ТЭС с использованием технологий ГТН покрытий и наплавки. Применение термобарьерных, износостойких, эрозионностойких, коррозионностойких, электроизоляционных, сверхпроводящих композиционных и иных покрытий при ремонте и изготовлении деталей и сборочных единиц тепломеханического и иного оборудования ТЭС позволит повысить эффективность производства, изготовления, ремонта и эксплуатации оборудования энергетических объектов.

2. Первые результаты опытного применения новых технологий обработки поверхности деталей оборудования подтверждают, что стойкость поверхностей деталей к различным видам износа заметно возрастает (в 3–5 и более раз).

3. Внедрение технологий ГТН покрытий и наплавки на предприятиях РФ сдерживается недостаточной степенью их изученности разработчиками и изготовителями оборудования, энергетиками и ремонтными предприятиями.

## Литература

1. Газотермическое напыление: Учебное пособие / Колл. авт.; по общей ред. Л. Х. Балдаева. 2-е изд. М.: ООО «Старая Басманная», 2015. — 540 с.
2. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. — 664 с.
3. Гладкий П. В. [Текст]: Плазменная наплавка. / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев — Киев: Изд. «Экотехнологія». 2007. — С. 64–72.
4. Инженерия поверхности деталей. / Колл. авт., под ред. А. Г. Сулова. — М.: Машиностроение. 2008. — 320 с.: илл.
5. А. А. Поздышев, В. С. Рабенко, А. В. Мошкарин. Повышение надежности работы оборудования. — Энергосбережение и водоподготовка. 2004 №4 (31). — С. 18–25.
6. Опыт применения технологии лазерной наплавки для реновации уплотнительных поверхностей защитной арматуры. / Л. Х. Балдаев, В. С. Степин, О. Е. Грачев, М. А. Киселев. — ТПА 2 (71) 2014. — С. 88–90.
7. Грачев О. Е., Неуймин В. М., Настека Д. В. Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения технологий газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки. — Энергетика. Изв. Высш. Учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. №6, с. 55–61.

