

ГАЗОПОРОШКОВОЕ НАПЫЛЕНИЕ КАК ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Грузевич^{1,2}, Д.А. Дереча^{2,3}

¹Трипольская ТЭС. 08720, г. Украинка. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

²Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины. 03142, г. Киев, бульв. Акад. Вернадского 36, б

³Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 57.

В работе предложено напыление как перспективный и высокоэффективный метод повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС. Поскольку основным видом износа трубных элементов энергетического оборудования ТЭС является золотой износ и коррозия, то для повышения их надежности, срока службы и работоспособности предложено использовать электродуговое напыление с помощью материала ПП 70X10P3Ю5 как метод газотермической модификации поверхностей нагрева. Целью работы является исследование эффективности применения напыления для повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС. Напыление поверхностей нагрева осуществлялось на двух тепловых электростанциях ПАО «Центрэнерго» в 2013 г. Техничко-экономическое обоснование показало, что внедрение технологии напыления позволяет в 1,5...2,0 раза снизить затраты по сравнению с убытками, понесенными ТЭС в случае аварийных отключений и повысить предположительно ресурс службы оборудования в 1,4 раза. Библиогр. 15, табл. 7, рис. 12.

Ключевые слова: напыление, энергетическое оборудование, трубы, гибы, надежность, котлы, экономайзер, теплоэлектростанция

Интенсивное изнашивание теплообменных поверхностей котлов теплоэлектростанций (ТЭС), в частности, экранных труб и труб экономайзеров, обусловлено использованием в качестве топлива угольной пыли с большой частью твердых негорючих примесей [1–3]. Анализ повреждений по классификационным признакам [4] показывает, что основной причиной повреждения котельных труб является коррозионно-эрозионный износ. По данным работы [5], на отдельных блоках его доля достигала 60 %. Особенно часто страдают от эрозии змеевики водяных экономайзеров. Абразивные частицы золы, увлекаемые дымовыми газами, с большой скоростью ударяют в поверхность труб и вызывают золотой износ (рис. 1). На поверхности экранных труб из стали 12X1МФ при повышенных температурах до 585 °С образуются пленки оксидов железа, которые имеют слабое сцепление с поверхностью стали и легко изнашиваются абразивными частичками. Изнашивание внешней поверхности труб происходит неравномерно по большой площади, локализуется в определенных местах и при достижении критической толщины стенки трубы происходит ее разрыв, который приводит к остановке энергоблока. Тепловая нагрузка на внешнюю стенку трубы также повышается через отложение солей на внутренних поверхностях экранных труб, которые, кроме того, испытывают

© А.В. Грузевич, Д.А. Дереча, 2019



Рис. 1. Характер повреждения трубы диаметром 32×6 мм водяного экономайзера в результате действия золотого износа

коррозионно-эрозионные повреждения, поэтому разработка новых эффективных методов повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС является актуальным направлением.

Повреждения трубных элементов поверхностей нагрева энергетического оборудования ТЭС имеют характер механизмов ползучести с проявлением усталости, протекания процессов эрозии и газовой коррозии (окисления) через экстремально-высокие условия эксплуатации, связанные с высокими значениями температуры, присутствующими циклическими нагрузками и агрессивностью рабочей среды, а также через абразивное действие продуктов сгорания угольного топлива [2, 3].

Анализ методов повышения надежности работы энергетического оборудования. Поскольку основным видом износа на водяном экономай-

зере (ВЭ) котлов ТЭС является золовой износ, а между планками дистанционирования — коррозия, то в работах [3, 6] предложено комплексное решение проблемы продления эксплуатационного ресурса экранных труб котлов и труб экономайзеров за счет разработки новых жароустойчивых и износоустойчивых газотермических покрытий. В результате, в структуре таких покрытий, при эксплуатации труб котлов и труб экономайзеров, будут протекать дисперсионные процессы упрочнения за счет выделения в металле мелкодисперсных фаз карбидов, нитридов и интерметаллидов, которые существенно повысят их эксплуатационные свойства при работе.

В работах [7, 8] показано, что для повышения надежности работы энергетического оборудования электростанций при золовом и коррозионном износе возможно применить наплавку. Разработанные в настоящее время порошковые самофлюсующиеся износостойкие и антикоррозионные сплавы, а также технология их нанесения позволяет создавать на поверхности деталей металлические покрытия с заранее заданными свойствами. Газопорошковая наплавка с помощью самофлюсующихся износостойких сплавов нашла широкое применение при восстановлении изношенных и защите новых участков труб водяных экономайзеров котлов на блочных ТЭС.

Современная промышленность располагает значительным выбором специальных порошков для наплавки и напыления, которые придают разнообразные свойства напыляемой поверхности, в том числе и абразивную износостойкость, коррозионную стойкость, износостойкость при повышенных температурах и в агрессивных средах. Это порошки на основе хрома, никеля и карбидообразующих элементов.

Как защитное покрытие используется металлический порошок ПГ-СР марки ПР-Н80Х13С2Р ТУН-1-3785-84 фракции «ОМ» или порошок ПР-Н77Х15С3Р2 (ПГ-12Н-02) [9], который в результате нанесения покрытия оплавляется. Нанесение порошка на трубные элементы поверхностей нагрева котлов при наплавке выполняется в несколько слоев с различной толщиной и шириной. Режимы наплавки проводится выбор необходимых характеристик защитного слоя. Это позволяет увеличить их срок службы на 10-15 лет.

В работе [3] для восстановления и защиты труб и элементов, которые подверглись золовому износу, используют сварочные технологии, при которых восстанавливающая обработка тонкого участка трубного элемента из стали 20 водяных экономайзеров выполняется с помощью руч-

ной дуговой (аргонодуговой) сварки. Применение ручной дуговой сварки в случае выполнения наплавки трубных элементов экономайзеров котлов предусматривает использование электродов Э50А для стали 20 и Э-09Х1МФ для стали 12Х1МФ; при ручной аргонодуговой сварке — используют присадочные проволоки Св-08ГС и Св-08Г2С для труб из стали 20, Св-08ХМ для труб из стали 12Х1МФ с температурой эксплуатации до 510 °С и Св-08ХМФА для труб из стали 12Х1МФ с температурой эксплуатации выше 510 °С.

Также на водяных экономайзерах котлов ТЭС для защиты гибов и прямых участков труб, подверженных износу, применяются индивидуальные манжеты (рис. 2).

Безусловно, данный способ позволяет повысить срок службы и надежность работы труб, однако применение манжет для защиты труб поверхностей нагрева в местах расположения планок дистанционирования за счет местного увеличения сечения является нерациональным, поскольку манжеты не обладают специальными свойствами для защиты труб от коррозионно-эрозионного воздействия. Коррозионно-эрозионные процессы будут протекать в любом случае, а дополнительное увеличение веса труб (за счет применения манжет) повысит нагрузку на трубы змеевиков, которая не учитывалась при проектировании, что может повлиять на работоспособность сварных соединений (трещины по сварным соединениям и ЗТВ, защемления). Кроме того, за счет применения манжет происходит местное увеличение диаметра труб и как следствие, уменьшение проходного сечения для топочных газов между отдельными трубами, что ухудшает аэродинамику потоков газа и приводит к повышенному износу труб соседних змеевиков, усложняет доступ к отдельным пакетам змеевиков и снижает их ремонтпригодность.

В технологическом зазоре нахлесточного соединения (между трубами) возможно встретить развитие коррозии, а наличие манжеты снаружи не позволяет вести должный контроль за состоянием металла трубы под ней.

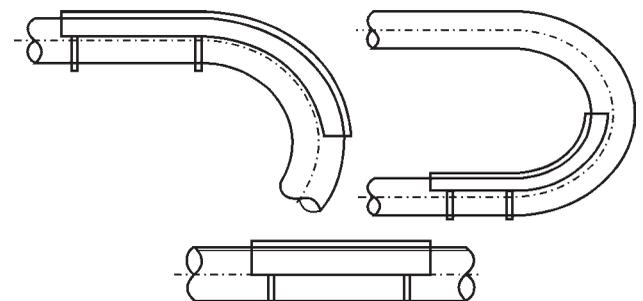


Рис. 2. Индивидуальные манжеты для защиты гибов и прямых участков труб водяного экономайзера котлов ТЭС

Для местной защиты труб под планками дистанционирования предложено применение локального газопорошкового нанесения специальными металлическими покрытиями [10].

К недостаткам приведенных методов газопорошковой и дуговой наплавки можно отнести высокие тепловложения, которые могут вызвать возможно коробление труб змеевика, структурные изменения в ферритно-перлитной структуре стали и предъявляемые высокие требования к квалификации сварщика.

Одним из перспективных методов повышения надежности работы энергетического оборудования является электродуговое напыление.

Физико-механическим институтом им. В. Карпенко НАН Украины разработана технология защиты нагревательных элементов тепловых электростанций от абразивного износа и газовой коррозии [11], которая предполагает нанесение экономно-легированных электродуговых покрытий из порошковой проволоки на поверхность экранных труб и труб экономайзеров тепловых электростанций с целью их эффективной защиты от абразивного износа и газовой коррозии при температурах эксплуатации до 600 °С. Данная технология позволяет вдвое повысить долговечность защищенных труб.

Применение металлизации позволит:

- придать коррозионно-эрозионную стойкость участкам труб при повышенных температурах;
- не увеличивать суммарный вес поверхностей нагрева;
- не затруднять доступ к отдельным пакетам змеевиков;
- не затруднять визуальное наблюдение за наружной поверхностью труб и в местах расположения планок дистанционирования;
- снизить трудоёмкость предлагаемых мероприятий за счет устранения операций по изготовлению гильз, сборке сварных соединений под манжеты;

Следовательно, применение металлизации является наиболее выгодным методом защиты труб поверхностей нагрева.

Целью работы является исследование применения электродугового напыления (металлизации) для повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС.

Обоснование выбора системы легирования и порошковой проволоки. Жаростойкость металла системы легирования Fe–Cr–B–Al обеспечивается формированием на его поверхности оксидной пленки Al₂O₃, которая характеризуется высокой химической и термической стабильно-

стью. При повышенных температурах диффузия кислорода и азота в переходные слои приводит к образованию оксидов железа Fe₂O₃ и нитридов алюминия AlN, что снижет жаростойкость покрытия. С целью смягчения негативного влияния указанных оксидов, в систему покрытия введен кремний, который способствует образованию диффузионного слоя SiO₂, препятствующего окислению подокалинного слоя. Износостойкость покрытия обеспечивается содержанием в составе покрытия мелкодисперсных железохромистых карбидов (Fe,Cr)₇C₃, шпинелей (Fe,Cr)₂O₃.

Методика. Электродуговое напыление в струе сжатого воздуха поверхностей нагрева осуществлялось на двух тепловых электростанциях ПАО «Центрэнерго» в 2013 г. Бывшие в эксплуатации на блоке № 2 змеевики водяного экономайзера Трипольской ТЭС (ТпТЭС) после двух лет работы были демонтированы и подвергнуты напылению методом металлизации. Перед напылением для определения механических и металлографических свойств металла бывших в эксплуатации змеевиков из труб вырезаны контрольные образцы. Результаты механических испытаний на определение предела прочности приведены в табл. 1.

При проведении металлографического анализа исследования проводились по всему периметру трубы с увеличением ×100 и ×500. Ферритно-перлитная структура металла по всему сечению исследуемого образца одинаковая. Результаты приведены в табл. 2.

При проведении механических и металлографических испытаний образцов труб отклонений от нормативных требований [12] не выявлено, после чего принято решение о нанесении защитного покрытия методом металлизации.

Таблица 1. Механические характеристики труб до металлизации

σ _в , МПа	δ, %	ψ, %
503	28,8	60
По требованиям ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов»		
420...560	24	45

Таблица 2. Структурные характеристики труб до металлизации

Микроструктура	Балл структуры по шкале ТУ 14-3-460	Балл полочности по шкале ТУ 14-3-460	Балл графитизации согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009
Вырезка с ВЭ	0	0	1 (графитизации не выявлено)

Таблица 3. Состав напыленного слоя

Номер образца	Содержание легирующих элементов, мас. %								
	Fe	Cr	Al	Si	Ni	Cu	Ti	Zn	Mo
1	76,04	11,76	5,41	5,36	0,17	0,08	0,14	0,13	0,05
2	77,39	11,27	5,58	4,66	0,15	0,09	0,11	0,1	0,09
3	75,13	11,33	5,52	5,67	0,19	0,09	-	0,04	-
4	76,95	12,37	6,04	3,5	0,18	0,11	0,11	0,06	0,04

Работы по нанесению покрытия проводились на ремонтной площадке ТпТЭС по разработанной методике [13].

Подготовка трубных элементов к металлизации заключалась в очистке и активации поверхности методом пескоструйной обработки. Качество подготовки трубных элементов к напылению контролировалось визуальным осмотром.

Для выполнения работ по нанесению защитного покрытия на трубы поверхностей нагрева применяли комплект оборудования, в состав которого входили: аппарат для пескоструйной обработки, электродуговой металлизатор, фильтр-влагодетель, кассеты с порошковой проволокой, шкаф электрический, источник питания.

В процессе напыления проводился пооперационный контроль, при котором подлежали проверке качество подготовки поверхностей нагрева к напылению, режим напыления, порядок нанесения слоев напыленного металла, зернистость и цвет покрытия. Напыление велось без использования подложки. Трубы после металлизации не подвергались термообработке.

После проведения напыления защитного слоя змеевики были установлены на паровой котел сверхкритического давления ТПП-210 А блок стационарный №1 корпус А. В качестве топлива по проекту для котла ТПП-210 А используется уголь марки АШ.

На Углегорской ТЭС (УгТЭС) напылению были подвергнуты две поверхности нагрева: КПП н.д. (сталь 12Х1МФ) между планками дистанциониро-

вания и гибы возле стенок парового котла сверхкритического давления ТПП-312 А блок стационарный № 4. Также напылению подлежал водяной экономайзер (сталь 20) парового котла сверхкритического давления ТПП-312 А блок стационарный № 2. В качестве топлива по проекту для котла ТПП-312 А используется уголь марки Г. Установлено, что на ТпТЭС и УгТЭС основным видом износа на водяном экономайзере являлся золовой, а между планками дистанционирования — коррозия, поэтому напыление на поверхностях нагрева проводилось одним и тем же материалом – порошковой проволокой ПП 70Х10Р3Ю5.

Состав напыленного слоя приведен в табл. 3. На Трипольской ТЭС состав контролировали рентгенофлуоресцентным спектрометром NITON XL2.

Электродуговое напыление проводилось в 2013 г. на наиболее абразивно-изнашиваемые участки змеевиков водяного экономайзера котлов ТПП-210 А и ТПП-312 А коррозионно-повреждающихся участков труб змеевиков КПП н/д в планках дистанционирования котла ТПП-312 А.

Внешний вид напыленных змеевиков приведен на рис. 3.

После напыления и во время эксплуатации проводились вырезки с труб поверхностей нагрева, микроструктура которых для надежной эксплуатации должна соответствовать требованиям [12].

На Углегорской ТЭС после металлизации для проведения металлографического исследования из



Рис. 3. Внешний вид напыленных змеевиков

напыленной трубы КПП н.д. было вырезано 2 контрольных образца: один — непосредственно изгиба (с напылением на поверхности), а второй (контрольный) — на расстоянии 150 мм от напыленной зоны. Шлифы изготавливались последовательным шлифованием и полированием. Травление шлифов производилось в 4%-ом растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Для металлографического анализа использовался микроскоп МИМ-8М, при увеличениях $\times 100$ и $\times 500$ раз. Структура контрольного образца — ферритно-перлитная.

Стилоскопирование проводилось на стационарном стилоскопе СЛ-13. Внешнему осмотру подвергались напыленные трубы и гибы. Механические испытания проводились на сплющивание и на определение механических свойств.

На Трипольской ТЭС после проведения металлизации змеевиков водяного экономайзера $\text{Ø}32 \times 6$ мм из стали 20 вырезались катушки (производственные образцы), далее из них вырезались темплеты, которые испытывались на сплющивание. Отслаивание слоя покрытия происходит после схождения внутренних сторон до $H_{\text{вн}} = 15$ мм. Схождение сторон выполнялось до $H_{\text{вн}} = 10$ мм. Напыленный слой подвергался измерению твердости на ультразвуковом твердомере ТКМ-459.

Результаты исследования. Внешний осмотр труб и гибов показал, что напыленный слой имеет грубую шероховатую поверхность с металлическим блеском. При детальном рассмотрении напыленной поверхности на ней различаются обособленные крупные кристаллы, которые и придают ей значительную шероховатость. Напыление имеет равномерное и сплошное распределение по наружной поверхности гибов. На рис. 4 представлен внешний видгиба трубы и макроструктура ее поверхности, а на рис. 5 — микроструктура поверхности трубы. Структура после металлизации не претерпела изменений и соответствовала нормативным требованиям.

Качественным спектральным анализом установлено, что напыленный защитный слой трубы водяного экономайзера, полученный методом электродуговой металлизации, представляет собой композит с упрочняющейся карбидной фазой в металлической матрице и содержит такие легирующие элементы, как хром и алюминий. Содержание карбидной фазы порядка 40 %. Основной металл — углеродистая сталь (легирующие элементы не обнаружены).

В микроструктуре напыленных труб из стали марки 20 (рис. 6) ориентация по видманштеттовой структуре не должна превышать 3-го балла шкалы 2 Приложения Б «Шкалы полосчатости и видманштеттовой структуры металла котельных труб».

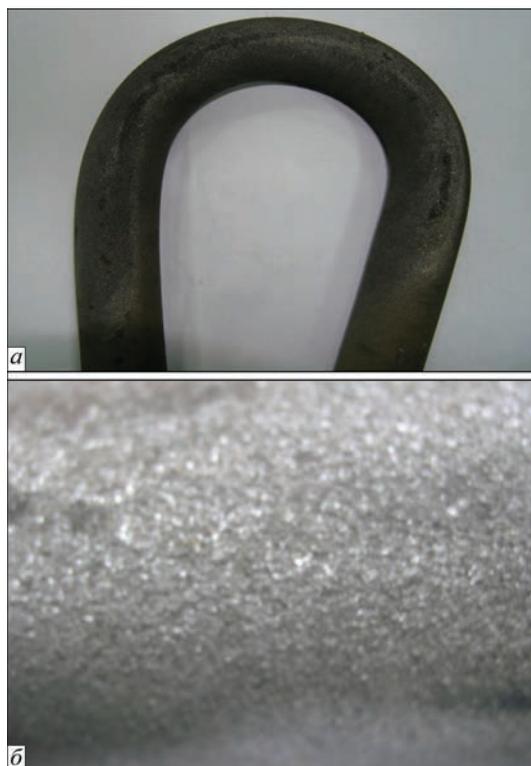


Рис. 4. Внешний видгиба трубы (а) и макроструктура ее поверхности (б)

При проведении металлографического исследования труб КПП н.д. Угледорской ТЭС установлено, что для исходной структуры металла трубы характерна значительная строчечность, что является отклонением от нормативов и свидетельствует о некачественной термической обработке труб после прокатки в процессе их изготовления. Структура напыленного образца как и у контрольного — ферритно-перлитная; видимых структурных изменений не установлено.

Под напыленным слоем просматривается узкая пограничная полоса основного металла толщиной от 0,07 до 0,15 мм, которая подверглась взаимодействию с напыленным слоем. Структура матрицы этой полосы такая же, как и у основного металла — ферритно-перлитная. В пределах этой полосы применяемый травитель контрастно не выделил вкрапления напыленного материала, однако можно предположить, что диффузионные вкрапления должны там присутствовать.

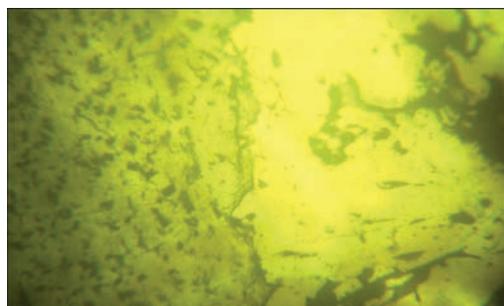


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$) напыленного слоя

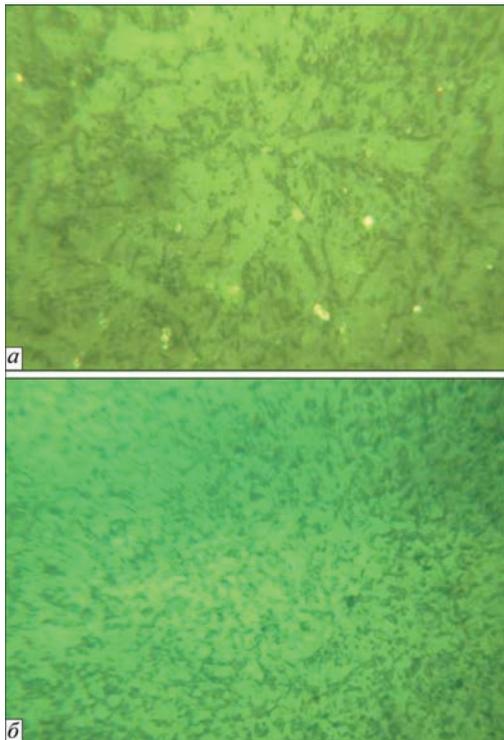


Рис. 6. Микроструктура напыленных труб из стали 20: *a* — $\times 500$; *b* — $\times 100$



Рис. 7. Образцы после испытания на сплющивание



Рис. 8. Внешний вид отслоившегося напыленного слоя после испытания на сплющивание

Использованный травитель не дал возможности выделить в структуре напыления никаких структурных составляющих (не использовались специальные химические реактивы). Однако по-

Таблица 4. Механические свойства металла труб после напыления

$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %
511	28,2	58
ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009		
420...560	24	45

зволил установить рыхло-слоистое и пористое (немонолитное) строение напыления, которое обусловлено технологическими особенностями электродуговой металлизации.

В обоих случаях толщина напыленного слоя варьируется на различных участках трубы. Так, в лобовой точке трубы толщина напыления достигает 0,42 мм, а на боковых — до 0,2 мм. С учетом пограничного слоя основного металла, который подвергся диффузии в него напыляемого материала, можно констатировать, что наибольшая толщина напыления составляет 0,57 мм (на лобовой части гйба).

При проведении технологических испытаний на сплющивание трещин, надрывов по основному металлу трубы не выявлено. После испытаний на сплющивание (рис. 7) для отслоившегося слоя (0,55 мм) (рис. 8) проведен рентгенофлуоресцентный анализ, который показал следующий химический состав: 11,7...12,21 % Cr; 0,12 % Ni; 4,0...5,65 % Si; 4,37...5,87 % Al; 0,37...0,44 % S.

Разрушение поверхностного слоя происходит отслаиванием крупных фрагментов напыленного слоя. При проведении механических испытаний на определение предела прочности трубы после напыления были получены результаты, приведенные в табл. 4.

Полученные результаты механических испытаний соответствуют требованиям ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009.

Участки напыленного слоя имеют твердость HRC 54-58. Поверхностный слой под отслоившимся покрытием имеет следующий химический состав: 91,47 % Fe; 2,78 % Cr; 3,9 % Si; 1,1 % Al; 0,26 % S. Твердость поверхности под слоем напыления составляет HB 200–217.

Таким образом, полученные результаты могут свидетельствовать о том, что основной металл после напыления не претерпел существенных изменений микроструктуры и механических свойств и отвечал требованиям соответствующих технических условий.

После трехлетней эксплуатации труб и гйбов на Трипольской ТЭС проведен спектральный анализ поверхностного слоя покрытия. Состав слоя изменился незначительно (табл. 5).

При проведении вырезок после 6 лет эксплуатации также фиксировались макро- и микроструктура напыленных труб (рис. 9, 10), состав поверхностного слоя (табл. 6). Проведены технологические испытания на сплющивание, замер твердости не проводили.

Макроструктура напыленных труб после 6 лет эксплуатации приведена на рис. 9.

Таблица 5. Состав напыленного слоя после трехлетней эксплуатации на ТЭС

Номер образца	Содержание легирующих элементов, %				
	Fe	Cr	Al	Si	Ni
1	Основа	11,41	5,67	5,67	0,15
2	->-	10,89	5,87	5,50	0,17

Таблица 6. Состав напыленного слоя после шестилетней эксплуатации на ТЭС

Номер образца	Содержание легирующих элементов, мас. %				
	Fe	Cr	Al	Si	Ni
1	Основа	12,9	6,67	7,9	0,1
2	->-	12,7	5,79	7,1	0,1

Со временем эксплуатации поверхность становится более грубой, на поверхности видны выступающие карбиды разного размера. Исследование микроструктуры до и после изнашивания в потоке угольной пыли при рабочих параметрах водяного экономайзера показывает переориентацию карбидного каркаса в матрице. Поверхностный диффузионный слой имеет следующий химический состав: 3,27 % Cr; 1,87 % Si; 0,9 % Al; 0,3 % S.

Горизонтальный характер линии на рис. 11 показывает, что на протяжении 6 лет концентрация хрома в поверхностном слое практически не изменилась и даже немного повысилась, происходит его накапливание в поверхностном слое. Увеличение концентрации алюминия в поверхностном слое скорее всего связано с осаждением на трубах змеевиков алюминийсодержащих элементов, образующихся в процессе сжигания органического топлива.

Разрушение поверхностного слоя при испытании образцов происходит путем растрескивания покрытия на мелкие фрагменты и его выкрашивания (рис. 12). Как мы видим, выдержка покрытий при рабочих параметрах приводит к изменению механики их разрушений, что возможно вызвано изменением в структуре дисперсных фаз. Твердость напыленного слоя измерить не удалось. Твердость поверхности под слоем напыления составляет *HB* 180.



Рис. 9. Макроструктура напыленных труб после 6 лет эксплуатации

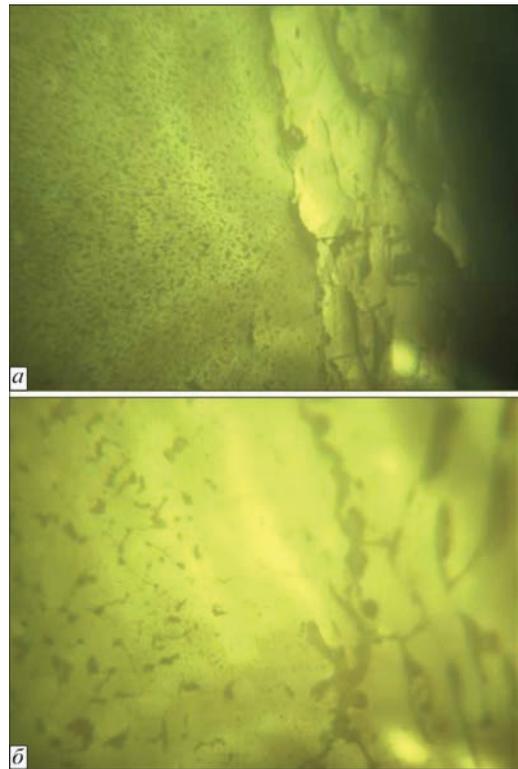


Рис. 10. Микроструктура напыленных труб после 6 лет эксплуатации: а — $\times 100$; б — $\times 500$

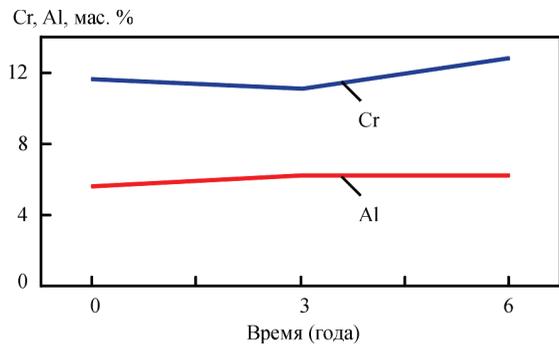


Рис. 11. Изменение концентрации хрома и алюминия в поверхностном слое покрытия в зависимости от срока эксплуатации

На каждой электростанции собираются данные по фактической толщине стенок труб поверхностей нагрева разрушающими и неразрушающими методами. При проведении вырезов из труб



Рис. 12. Внешний вид трубы после 6 лет эксплуатации (испытание на схождение сторон)

Таблица 7. Характеристика труб до напыления

Номер блока	Поверхность со стороны нагрева	Поверхность со стороны рабочей среды	Марка материала	Номер змеевика	Номер трубы	Утонение, мм				Наработка
						Левый бок	Правый бок	Наружный	Внутренний	
1	В/Э	АШ	Сталь 20	152	1	-0,4	-0,4	-0,5	+0,2	11296
1	В/Э	АШ	Сталь 20	150	1	-0,5	-0,5	-0,8	+0,1	12138
1	В/Э (после напыления)	АШ	Сталь 20	151	1	+0,4	+0,5	+0,7	+0,2	9084

фиксируются данные по ее толщине, микроструктуре и механическим свойствам. Для замера утонения труб используется методика прямого замера толщины стенки. Итоговые данные по характеристике труб до напыления, а также время работы каждого вырезанного образца сведены в табл. 7.

Анализируя данные по утонению, можно заключить, что во всех случаях с увеличением времени эксплуатации растет и величина утонения стенки от золотого износа.

Наибольшая интенсивность золотого износа наблюдается на первых двух трубах двадцати крайних змеевиков водяного экономайзера. Это явление, скорее всего, связано с конструктивной особенностью газового тракта пылеугольного П-образного котла. При выходе с ВРЧ, в поворотной камере, газы меняют свое направление и наиболее крупные частицы продуктов сгорания топлива забрасываются на периферию общего потока. Увеличение их плотности в потоке способствует интенсификации золотого износа двадцати крайних змеевиков водяного экономайзера.

После металлизации поверхности труб змеевиков водяного экономайзера выявлено снижение интенсивности золотого износа змеевиков. Во время проведения замера толщины стенки на контрольных вырезках утонения не зафиксировано.

Таким образом, в данном случае можно допустить зависимость влияния твердости на скорость золотого износа и сделать вывод, что с повышением твердости износостойкость возрастает. Это наблюдение согласуется с моделью эрозионного износа [14].

Сварка. На Трипольской ТЭС исследованы два варианта сварки труб из стали 20 после металлизации. Первый — электродуговая сварка труб после металлизации электродами ЦУ-5 – 2,5 мм с трубами, не прошедшими металлизацию. Второй — сварка электродами ЦУ-5 при стыковке труб, прошедших металлизацию между собой.

Сварка проводилась в соответствии с [15]. Перед сваркой кромки труб разделявали под углом 40...45° с их очисткой в районе торцов. Диаметр стержня электродов ЦУ-5 — 2,5 мм. По внешнему виду сварные швы в удовлетворительном состоянии. Растрескиваний, пор, раковин, под-

резов и других наружных дефектов не наблюдалось. Поверхностный слой труб с металлизацией в районе сварного соединения зачищался для проведения контроля неразрушающими методами. Ультразвуковым контролем внутренних дефектов в стыковых швах не обнаружено. Микроструктура металла в околошовной зоне и в районе швов в обоих случаях удовлетворительная. При проведении рентгенофлуорисцентного анализа сварных соединений выявлено незначительное повышенное содержание хрома. Повышенное содержание кремния в сварном соединении очевидно связано с недостаточным качеством подготовки поверхности. При проведении механических испытаний сварного шва разрушение образца происходит по основному металлу, что свидетельствует об удовлетворительных механических свойствах шва. Микроструктура металла в околошовной зоне и зоне швов в обоих случаях в пределах нормы.

Общая сумма финансовых затрат, которые несет энергогенерирующее предприятие во время повреждения поверхностей нагрева (отказов), которые приводят к аварийной остановке энергоблока, без учета недополучения прибыли составляет 1011000 грн. Таким образом, учитывая порядок сумм штрафов через отказы на поверхностях нагрева энергоблоков ТЭС, которые могут достигать нескольких миллионов гривен, внедрение технологии напыления имеет значительный положительный экономический эффект, а именно затраты на внедрение новой технологии в 1,5...2,0 раза ниже по сравнению с убытками, понесенными ТЭС во время аварийных остановов. Также электродуговое напыление позволит продлить срок эксплуатации поверхностей нагрева.

Выводы

В работе исследовано применение метода электродугового напыления (металлизации) для повышения надежности работы энергетического оборудования ТЭС.

По данным, полученным о механическом, химическом и структурном состоянии металла трубы и слоя покрытия можно сделать вывод о позитивном опыте внедрения метода электродугового напыления как перспективного и высокоэффек-

тивного метода повышения надежности работы энергетического оборудования.

Несмотря на довольно большой объем работ, проводимых по напылению, все же имеются вопросы, довольно слабо проработанные, к их числу относится исследование и применение метода металлизации в условиях высокотемпературной газовой коррозии поверхностей нагрева нижней радиационной части (НРЧ), разработка отдельных инструкций и нормативных документов.

Список литературы

1. Пантелеенко Ф. И., Снарский А. С., Крыленко А.В. (2012) Особенности деградации структуры и механические свойства элементов печного и теплоэнергетического оборудования после длительной эксплуатации. *Наука и техника*, **1**, 16–20.
2. Som Dutt Sharma S. D., Saluja R., Moeed K M. (2013) A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on hardened steel. *International Journal of Technical Research and Applications*, **1**, **2** (may-june), 05–07.
3. Хромченко Ф.А. (2005) *Сварочные технологии при ремонтных работах*. Интернет Инжиниринг.
4. Яценко В.П. (2006) Прогнозування ерозійного зношування теплообмінних поверхонь котельного устаткування. *Проблеми загальної енергетики*, **3**, 81–85.
5. Шрайбер А.А., Яценко В.П. (2008) Моделирование абразивного износа конвективных теплообменных поверхностей котла. *Проблеми загальної енергетики*, **17**, 37–40.
6. Корж В.М. (2005) *Газотермічна обробка матеріалів*. Київ, Екотехнологія.
7. Лашченко Г.И. (2012) *Современные технологии сварочного производства*. Київ, Екотехнологія.
8. Шатов А.П. (2009) *Сварка и ремонт металлических конструкций с противокоррозионными покрытиями*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.
9. (1987) И 34-70-027-87 *Инструкция по восстановлению изношенных и защите новых гибов и прямых участков труб поверхностей нагрева котлов высокого давления методом газопорошковой наплавки*. Москва, Союзтехэнерго.
10. Гречнева М.В., Гоппе Г.Г. (2015) Газопорошковое напыление труб поверхностей нагрева котлоагрегатов тепловых электрических станций. *Вестник ИрГТУ*, **11**(**0**), 23–27.
11. Перспективні науково-технічні розробки (2017) *Енергетика та енергоефективність*. Київ, Видавничий дім «Академперіодика» НАН України.
12. (2009) ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 *Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Технические условия*.
13. (2004) ТИ 00130044.25101.00549 *Нанесения защитного покрытия на змievки водяного економайзера та екранні*

трубы котла ТП-100. ДП «Львівське конструкторське бюро».

14. Ruff A.W., Wiederhorn S.M. (1979) *Erosion by Solid Particle Impact.*, **1**, 44. New York, Academic Press, 69-126.
15. РД.15.027-89 *Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций*

References

1. Panteleenko, F.I., Snarsky, A.S., Krylenko, A.V. (2012) Specifics of structure degradation and mechanical properties of components of furnace and heat-and-power engineering equipment after long-term operation. *Nauka i Tekhnika*, **1**, 16-20 [in Russian].
2. Som Dutt Sharma, S.D., Saluja, R., Moeed, K.M. (2013) A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on hardened steel. *Int. J. of Technical Research and Applications*, **1**, **2** (May-June), 5-7.
3. Khromchenko, F.A. (2005) *Welding technologies in repair works*. Internet Engineering [in Russian].
4. Yatsenko, V.P. (2006) Prediction of erosion wear of heat exchange surfaces of boiler equipment. *Problemy Zagalnoi Energetyky*, **3**, 81-85 [in Ukrainian].
5. Shrajber, A.A., Yatsenko, V.P. (2008) Modeling of abrasive wear of convective heat exchange surfaces of boiler. *Ibid.*, **17**, 37-40 [in Ukrainian].
6. Korzh, V.M. (2005) *Thermal processing of materials*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Ukrainian].
7. Lashchenko, G.I. (2012) *Modern technologies of welding production*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Ukrainian].
8. Shatov, A.P. (2009) *Welding and repair of metal structures with corrosion-resistant coatings*. Moscow, Bauman MG TU [in Russian].
9. (1987) I 34-70-027-87: *Instruction on reconstruction of worn pipe bends and protection of new bends and straight sections of pipes of heating surfaces of high-pressure boilers by method of gas powder surfacing*. Moscow, Soyuztekhnenergo [in Russian].
10. Grechneva, M.V., Goppe, G.G. (2015) Gas powder spraying of pipes of heating surfaces of boiler units of thermal power stations. *Vestnik IrGTU*, **11**(**0**), 23-27 [in Russian].
11. (2017) *Advanced scientific and technical developments. Power engineering and power efficiency*. Kyiv, Akadempriodika [in Ukrainian].
12. (2009) TU 14-3-460:2009/TU U 27.2-05757883-207:2009: *Steel seamless pipes for boilers and pipelines. Technical specification* [in Russian].
13. (2004) ТИ 00130044.25101.00549: *Deposition of protective coating on water economizer coils and waterwall tubes of boiler TP-100*. Lviv, DP LKB [in Ukrainian].
14. Ruff, A.W., Wiederhorn, S.M. (1979) *Erosion by solid particle impact*. New York, Academic Press, 69-126.
15. RD.15.027-89: *Welding, heat treatment and control of pipe systems of boilers and pipelines in erection and repair of equipment of power stations* [in Russian].

ГАЗОПОРШКОВЕ НАПИЛЕННЯ ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

А.В. Грузевич^{1,2}, Д.А. Дереча^{2,3}

¹Трипільська ТЕС. 08720, м. Українка

²Інститут магнетизму НАН України та МОН України. 03142, м. Київ, бульв. Акад. Вернадського 36, б

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 57. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

У роботі запропоновано напылення як перспективний та високоефективний метод підвищення надійності роботи енергетичного обладнання теплоелектростанцій. Оскільки основним видом зносу трубних елементів енергетичного обладнання теплоелектростанцій є золотий знос і корозія, то для підвищення їх надійності, терміну служби і працездатності запропоновано використовувати електродугове напылення за допомогою матеріалу ПП 70X10P3Ю5 як метод

газотермічної модифікації поверхонь нагріву. Метою роботи є дослідження ефективності застосування напилення для підвищення надійності роботи енергетичного обладнання теплоелектростанцій. Напилення поверхонь нагріву здійснювалося на двох теплових електростанціях ПАТ «Центрэнерго» у 2013 р. Техніко-економічне обґрунтування показало, що впровадження технології напилення дозволяє в 1,5...2,0 рази знизити витрати в порівнянні зі збитками, понесеними ТЕС в разі аварійних відключень і підвищити імовірно ресурс служби обладнання в 1,4 рази. Бібліогр. 15, табл. 7, рис. 12.

Ключові слова: напилювання, енергетичне обладнання, труби, згини, надійність, котли, економайзер, теплоелектростанція

GAS-POWDER SPRAYING AS A HIGH-PERFORMANCE METHOD OF INCREASE OF OPERATION RELIABILITY OF POWER EQUIPMENT

A.V. Hruzevych^{1,2}, D.A. Derecha^{2,3}

¹Trypilska TPP. 08720, Ukrainka. E-mail:Gruzevich@bigmir.net

²Institute of Magnetism of NAS of Ukraine and MES of Ukraine. 36b Acad. Vernadskii Blvd., 03142, Kyiv, Ukraine

³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

57 Pobedy Ave., 03056, Kyiv.

A work proposes spraying as a perspective and high-performance method for increasing the reliability of work of TPP power equipment. The main type of wear of tubing elements of TPP power equipment is ash erosion and corrosion. Therefore, in order to increase their reliability, operation life and working capacity it was proposed to use electric-arc spraying using PP 70Kh10RZYu5 material as a method of gas-thermal modification of heating surfaces. The aim of work is investigation of efficiency of spraying application for increasing the reliability of operation of TPP power equipment. Spraying of the heating surfaces was carried out on two thermal power plants of PJSC «Centrenergo» in 2013. A feasibility study showed that implementation of spraying technology allows 1.5 -2.0 times decrease of expenses in comparison with loss incurred by TPP in the case of emergency shutdowns and rise approximately 1.4 time service life. 15 Ref., 7 Tabl., 12 Fig.

Keywords: spraying, power equipment, tubes, bends, reliability, boilers, economizers, thermal power plant

Поступила в редакцію 27.02.2019



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Международная Ассоциация «Сварка»

Девятая международная конференция

ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

9 – 13 сентября 2019 г., Одесса

Председатель программного комитета академик И.В. Кривцун

Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

Оргкомитет

ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45

E-mail: journal@paton.kiev.ua | <http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2019>

Міжнародна конференція

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ У ЗВАРЮВАННІ І СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ

23–24 травня 2019 р.

м. Київ, Україна

Напрямки роботи конференції

- Фізико-хімічні процеси
- Міцність, надійність та ресурс
- Інноваційні технології
- Комп'ютерні технології
- Контроль якості
- Нанотехнології
- Обладнання та джерела живлення
- Формування структури і властивостей з'єднань та матеріалів

Контакти: 03056, м. Київ, вул. Дашавська 6/2,

кафедра зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського

Тел.: +380-44-204-92-58; 204-82-40; 204-99-31; факс: +380-44-204-82-40; E-mail: polywedconf@gmail.com