

ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ**3.2. Системы золошлакоудаления ТЭС****3.2.2. Золоудаление****3.2.2.12. Износостойкие трубопроводы с алюмотермическим покрытием на основе корунда**

*А.М. Белошицкий, Е.Н. Ильин, А.С. Прокопьев, ООО «Энергохимкомплект», г. Челябинск, Россия
Ф.Л. Мантуров, ОАО «Челябинский цинковый завод», г. Челябинск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Абразивный износ трубопроводов вносит заметную долю в стоимость эксплуатации различных промышленных систем и установок гидро- и пневмотранспортировки материалов, обладающих абразивными свойствами (песок, цемент, зола, шлаки и т.д.), что, в частности относится к системам пылеприготовления и золошлакоудаления угольных ТЭС. Применение абразивостойких материалов при изготовлении таких трубопроводов является одним из способов повышения их стойкости. Сравнение трех материалов для изготовления абразивостойких трубопроводов - износостойких марок сталей, каменного литья и алюмотермического покрытия на основе корунда показывает значительное преимущество последнего. Кроме наилучшей износостойкости, трубы с алюмотермическим покрытием можно соединять с помощью электросварки, что позволяет изготавливать из них фасонные трубопроводы самой разной конфигурации.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ

На тепловых электростанциях, в особенности, использующих в качестве топлива уголь, проблема абразивного износа оборудования, в том числе трубопроводов, является одной из самых актуальных. Износ трубопроводов главным образом имеет место в системах гидро- и пневмотранспорта:

- системах пылеприготовления топлива на участках пылепроводов и
- системах золошлакоудаления.

На угольных ТЭС России большая часть золошлаков транспортируется в гидрозолоотвалы в виде гидропульпы низкой концентрации. Надежность и экономичность систем гидрозолошлакоудаления во многом зависит от абразивного износа основного оборудования: насосов, запорно-регулирующей аппаратуры и трубопроводов. В связи с рядом существенных недостатков гидрозолошлакоудаления (большие расходы воды, экологические и экономи-

ческие аспекты землепользования, снижение возможности вторичного использования золы и шлаков и др.) в настоящее время изучается возможность более широкого применения систем пневмозолоудаления (ПЗУ). Но среди преимуществ ПЗУ имеется и недостаток – еще более значительный абразивный износ как фасонных, так и прямолинейных участков пневмотрубопроводов.

Среди мероприятий по повышению срока службы гидро- и пневмотранспортных трубопроводов, предлагаемых исследователями, одним из наиболее эффективных является использование специальных абразивостойких элементов трубопроводов: камнелитых вставок и труб с алюмотермическим покрытием [1].

Установлено, что межремонтный срок пылетранспортных трубопроводов, защищенных камненным литьем увеличивается в 4...6 раз. Однако применение труб с камнелитыми вставками имеет свои сложности: растрескивание камнелитых вставок в фасонных трубах вследствие высоких температурных перепадов в процессе эксплуатации, выбивание отдельных фрагментов вставок в пылепровод; значительная масса вставок; сложность монтажа; недостаточный типоряд внутренних диаметров колен.

Согласно [1] пылепроводы с алюмотермическим покрытием имеют существенно большую абразивную стойкость по сравнению со стойкостью пылепроводов, выполненных из других материалов. На основании исследований численные значения коэффициентов относительной износостойкости пылепроводов из труб алюмотермическим покрытием находятся диапазоне 300...400. Относительная износостойкость пылепроводов из различных материалов приведена в табл. 1.

Таблица 1. **Относительная износостойкость пылепроводов из различных материалов**

Материал трубопровода	Твердость по Виккерсу, <i>HV</i>	Коэффициент относительной износостойкости трубопроводов из различных материалов, $K_{изн}$
Медь	125	1,00
Сталь 5	130	1,01
Сталь 25Л	130	1,01
Сталь 3	135	1,02
Сталь 10	137	1,02
Сталь 4сп	140	1,03
Сталь 5сп	150	1,06

Материал трубопровода	Твердость по Виккерсу, <i>HV</i>	Коэффициент относительной износостойкости трубопроводов из различных материалов, <i>K_{изн}</i>
Сталь 20	156	1,08
Сталь 35Л	160	1,10
Сталь 35	187	1,28
Сталь 25Г2	200	1,40
Сталь 40, 40Х (с отжигом)	217	1,59
Серый чугун	223	1,66
Сталь 30ХГС, сталь 30ХГСА (с отжигом)	229	1,74
Сталь 55Л	240	1,90
Сталь 45	241	1,92
Сталь 30Х13	270	2,41
Сталь 40Х13	300	3,04
Сталь 55Л	340	4,05
Трубы с алюмотермическим покрытием	2500	364,00

Установлено, что применение труб с алюмотермическим покрытием позволяет снизить абразивный износ в 100 и более раз, с камнелитыми изделиями – не более чем в 10 раз, а труб из сталей с твердостью более 300 HV в 4-5 раз по сравнению со стальными трубопроводами из стали 20 [2].

Согласно [1] алюмотермические покрытия рекомендованы для изготовления криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов систем золошлакоудаления и пылеподачи ТЭС.

ПРЕИМУЩЕСТВА АЛЮМОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Первые работы по нанесению керамических и металлокерамических покрытий на внутреннюю поверхность металлических труб проводились в Институте структурной макрокинетики АН СССР (ИСМАН), г. Черноголовка, в рамках развития технологий по методу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3]. Метод был

доработан японскими исследователями [4] и в настоящее время зарубежом в промышленных масштабах методом центробежного СВС-литья трубы с алюмотермическим покрытием производят в КНР.

В СССР и затем в РФ неоднократно предпринимались опытно-производственные эксперименты по нанесению алюмотермических покрытий, в том числе и ООО «Энергохимкомплект» с 2008 г.

Сейчас развитие технологии формирования термо-износостойких покрытий на внутренней поверхности стальных труб стало одним из направлений деятельности ООО «Энергохимкомплект».

Керамическое покрытие толщиной 2...4 мм представляет собой материал из плавленной керамики на основе корунда (Al_2O_3).

Сравнительные свойства получаемого алюмотермического покрытия, каменного литья и чугуна приведены в табл. 2. Испытания образцов материалов проводились на кафедре «Физической химии» Южно-Уральского государственного университета.

Таблица 2. Сравнительные свойства материалов трубопроводов

Параметр	Алюмотермическое керамическое покрытие	Износостойкое каменное литье (литой базальт)	Серый чугун СЧ 12-28
Толщина покрытия, мм	3 – 4	20	-
Плотность покрытия, г/см ³	2,9	3,0	7,2
Водопоглощение, %	0,09	0,13	не опр.
Предел прочности при сжатии, МПа	300...340	250...500	500
Предел прочности при изгибе, МПа	70...110	30...50	280
Ударная вязкость, кДж/м ²	1,50	1,25	3,00
Модуль упругости, МПа	102000	100630	120000
Износостойкость ¹⁾ , г/см ²	0,02	0,30	0,79
Твердость по Моосу	8...9	7...8	не опр.
Микротвердость, ГПа	15...18	5...9	не опр.
Термостойкость, кол-во теплосмен от 800 °С до 20 °С на воздухе	не менее 10	1	не опр.
Термостойкость, количество теплосмен, закалка от 800 °С до 20 °С в воду	не менее 2	трескается	не опр.
Кислотостойкость, 20%-ная HCl, %	98	89	не опр.
Кислотостойкость, H ₂ SO ₄ (96%), %	99	97	не опр.

¹⁾ Износостойкость определялась путем шлифовки абразивным кругом из нормального электрокорунда 14А в течение 1 минуты под нагрузкой 2 кг.

Сравнение свойств алюмотермического керамического покрытия с другими материалами (износостойкое каменное литье, серый чугун) демонстрирует, что керамическое покрытие имеет лучшие характеристики, определяющие сопротивление износу (износостойкость в 15 раз выше по сравнению с литым базальтом, более высокая твердость). Испытания на теплостойкость показали устойчивость керамического покрытия при температуре 1200 °С, а также удовлетворительную термостойкость (выдерживает термоудар не менее 2-ух раз при погружении трубы с покрытием, имеющей температуру 800 °С в воду с температурой 20 °С).

Керамическое покрытие в торцевой зоне трубы устойчиво к воздействию электросварки (отсутствие сколов и разрушений), что позволяет производить соединение трубных элементов с керамическим покрытием не только посредством фланцев, но и электросварки.

Керамическое покрытие по сравнению с каменолитым материалом также имеет лучшую кислотостойкость (в соляной и серной кислотах).

Механическая и термическая стойкость керамического покрытия, кроме свойств самой керамики на основе корунда также обусловлена и тем, что во время центробежного СВС-литья формируется двухслойное покрытие (рис. 1): между стальной трубой и слоем керамики образуется промежуточный слой металла (на основе железа), приваренный к стенке трубы и диффузионно связанный с керамикой, который демпфирует нагрузки на керамику от внешних механических и тепловых воздействий.

Микроструктура керамического слоя (рис. 2) представлена равномерно распределенными зернами корунда (темный цвет) с включениями алюмосиликатных фаз (светлые участки).

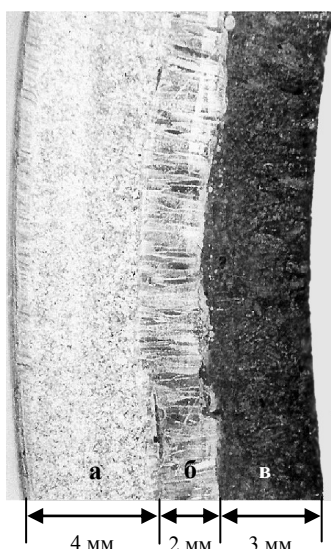


Рис. 1. Поперечный шлиф стальной трубы с алюмотермическим покрытием: а – стенка трубы; б – промежуточный слой металла; в – керамический слой.

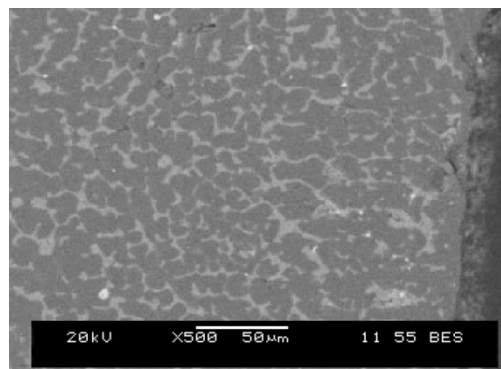


Рис. 2. Микроструктура керамического слоя

Обладая значительной твердостью, термостойкостью и химической стойкостью такое покрытие защищает трубопровод от абразивного износа, химической и высокотемпературной коррозии. Ниже перечислены возможные области применения труб с алюмотермическим керамическим покрытием.

- Работа в условиях интенсивного истирания, например, пневмо- и гидротранспортировка под давлением и без давления различных абразивных материалов (песка, цемента, золошлаков и т.д.);
- Работа в условиях значительного теплового воздействия для транспортировки в среде различных газов при температуре до 1000 °С (температура зависит от стойкости при высоких температурах стали трубы);
- Для транспортировки некоторых расплавленных металлов, солей и химически агрессивных веществ.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ

В настоящее время ООО «Энергохимкомплект» производит работы по производственным испытаниям и внедрению труб с износостойким алюмотермическим покрытием собственного производства. В 2011 г. для ОАО «Челябинский цинковый завод» была изготовлена партия труб диаметром 159 мм, стенка 8 мм с термоизносостойким покрытием (материал трубы – сталь 20), которые посредством электродуговой сварки были смонтированы на участке пневмотранспорта прокаленной вельдокиси. Трубопровод с покрытием имел как прямолинейные участки, так и отводы 90°. Результаты испытаний показали увеличение межремонтного срока эксплуатации трубопровода более чем в три раза (замену участков с покрытием произвели через 10 месяцев, тогда как трубы без покрытия ранее меняли каждые 3 месяца эксплуатации). Сейчас для ООО «ЧЗЦ» готовится более широкая номенклатура трубных элементов с покрытием.

В 2009-2010 гг. для ООО «Тобольскнефтехим» изготовлено 12 циклонов, имеющих форму воронок диаметром 140...331 мм, длиной 556 мм, толщина стенки 12 мм из стали 12X18H10T с внутренним алюмотермическим покрытием. С помощью циклонов в реактор пневмотранспортом вводится порошковый катализатор на основе корунда Al_2O_3 со ско-

ростью 10 м/с и температурой до 650 °С. Без покрытия циклоны меняются ежегодно вследствие абразивного износа. Испытывавшиеся циклоны с покрытием через год работы также были демонтированы, обследование показало наличие сохранившегося покрытия на неповрежденной внутренней металлической поверхности всех циклонов.

Получены первичные положительные результаты по замене разгонной трубы струйной мельницы в ОАО «Малышевское рудоуправление», где осуществляется измельчение слюды. Замена разгонной трубы из износостойкого чугуна диаметром 67 мм и длиной 600 мм на аналогичную трубу с алюмотермическим покрытием позволила повысить производительность мельницы на 157 % до замены трубы. Опытные работы по испытанию износостойких элементов струйных мельниц продолжаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из путей повышения экономичности эксплуатации, в частности, систем пылеприготовления топлива и золошлакоудаления на угольных ТЭС является увеличение износостойкости трубопроводов. Этого можно достичь использованием в проблемных участках трубопроводов из износостойких марок стали, вставок из каменного литья, либо труб с алюмотермическим (керамическим) покрытием. Среди всех материалов алюмотермические покрытия показывают наивысшую износостойкость.

Достаточная механическая прочность и термостойкость алюмотермического покрытия позволяет соединять трубные элементы с таким покрытием не только посредством фланцев, но и электросварки, что значительно облегчает монтаж и позволяет изготавливать криволинейные участки (колена) и различного рода отводы.

Свойства алюмотермического покрытия позволяют использовать трубы с таким покрытием не только в условиях интенсивного истирания, но и в условиях интенсивного теплового воздействия, на-

пример, при транспортировке газов, расплавленных металлов, солей, а также в условиях воздействия ряда химически агрессивных сред.

В начале 2014 г планируется ввод в эксплуатацию новой установки центробежного СВС-литья, которая позволит улучшить качество покрытия, производительность и возможность нанесения покрытия на прямые трубы длиной до 5 метров.

Покрытия наносятся на прямые трубы длиной до 5 метров со стандартными диаметрами от 68 до 530 мм и толщиной стенки не менее 4 мм.

Посредством электросварки или фланцев из указанных прямых трубных элементов изготавливаются отводы любого радиуса и длины, а также трубные тройники и крестовины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 153-34.1-27.512-2001. Методические указания по расчету и рекомендации по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС / В.Я. Путилов, И.В. Путилова, Б.Л. Вишня и др. М.: МЭИ (ТУ), 2001.
2. Путилова И. В. Абразивный износ трубопроводов пневмотранспортных установок систем золошлакоудаления и пылеприготовления ТЭС. Автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: МЭИ (ТУ), 2004, 20 с.
3. Мержанов А. Г., Юхвид В. И., Боровинская И. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез литых тугоплавких неорганических соединений // Доклады АН СССР. – т. 255. - №1. – 1980. – с. 120-124.
4. Химия синтеза сжиганием./Ред. М. Коидзуми. Пер. с японск. – М.: Мир, 1998. – 247 с.

А.М. Белошицкий, Е.Н. Ильин, А.С. Прокопьев и др. Износостойкие трубопроводы с алюмотермическим покрытием на основе корунда // Материалы V конференции «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 24–25 апреля 2014 г. — М.: Полиграфический центр МЭИ, 2014. с. 103 – 106.