

**Адгезионная прочность покрытий (МПа) с различными подложками при обработке в плазме тлеющего разряда**

Обработка	Распыляемый материал		
	Ti	Ni	C
Стекло			
До обработки	0,04	0,03	0,02
После обработки	0,7	0,65	0,5
Стеклотекстолит			
До обработки	0,03	0,03	0,01
После обработки	0,5	0,5	0,3
Ситалл			
До обработки	0,03	0,03	0,02
После обработки	0,7	0,7	0,6

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко В. В., Упит Г. П. Влияние способа подготовки поверхности стекла на адгезию к нему вакуумных конденсатов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 6. – С. 23 – 27.
2. Жаров В. А., Горелова О. Н. Влияние обработки поверхности полимера тлеющим разрядом и другими физическими методами на адгезию вакуумно-осажденных пленок металлов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 4. – С. 23 – 25.
3. А.с. СССР № 1632089. Устройство для получения металлических покрытий в вакууме / Б. Л. Фигурин, В. И. Руминский, К. Б. Фигурин и др. Оpubл. 1.11.1990.

УДК 621.792/793

Э. Д. ЩЕРБАКОВ, канд. техн. наук,  
В. А. СМЕТКИН, канд. пед. наук,  
В. Г. БОРИСОВ (БНТУ), О. К. МАХОВИКОВ,  
В. П. ЛАПИН (ЗАО «Адиполь», г. Минск)

### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И АЛИТИРОВАНИЯ ТЭНОВ С ОБОЛОЧКОЙ ИЗ СТАЛИ 08КП ВЗАМЕН СТАЛИ 12Х18Н10Т

В настоящее время для изготовления оболочек ТЭНов, работающих при температурах выше 450°C, используются дорогостоящие дефицитные стали аустенитного класса 12Х18Н10Т и т. п., обладающие достаточно высокой окалиностойкостью при температурах до 700 – 750°C. Температура начала интенсивного окалинообразования стали 12Х18Н10Т – 850°C. Замена хромоникелевой жаростойкой стали на углеродистую при рабочей температуре на поверхности оболочек до 700 – 750°C возможна при создании защитного слоя алюминидов железа.

В 70-х годах XX в. ВНИИЭТО проведены ресурсные испытания ТЭНов с оболочкой из стали 10, алюминированных в расплаве алюминия марки А99 при температуре 750 – 800°C с выдержкой 5 – 10 мин [1, 2]. Полученное покрытие обеспечивало срок службы ТЭНов в среде воздуха и других газов при 500 – 600°C более 22 тыс. ч, при температуре 700 – 750°C – 7 – 9 тыс. ч.

Равномерная толщина и сплошность покрытия обеспечиваются при условии тщательной подготовки поверхности стали для алюминирования (обезжиривание, травление для удаления окалины и ржавчины, промывка, просушка, флюсование).

По данным П.Т. Коломыцева [3], до 90% лопаток авиационных турбин в конце 80-х годов для повышения жаростойкости подвергалось диффузионному алитированию в порошковых смесях. Этот метод позволяет получить на всех деталях садки минимальные отклонения по толщине покрытия (даже на деталях самой сложной конфигурации) благодаря небольшому градиенту температуры по высоте и диаметру контейнера, возможности поддерживать постоянное избыточное давление, применению порошковых смесей невысокой активности.

Циклическим испытаниям на жаростойкость при температуре 700 и 900°C подвергались образцы, изготовленные из отходов оболочек стали 08КП, алитированные в порошковых смесях системы Fe–Al с 30, 40, 50 и 60% Al при температуре 950°C в течение 5 ч. Для сравнения при тех же условиях исследовались образцы стали 12Х18Н10Т без покрытия.

Испытания проводились в электропечи в керамических тиглях, не препятствующих проникновению к поверхности образцов газовой среды и обеспечивающих сохранение осыпающихся оксидов, весовым методом по увеличению массы образцов (ГОСТ 6130–71). Взвешивание проводили после каждого цикла испытаний (нагрев – выдержка 5 ч при температуре испытаний – охлаждение вместе с печью). Общее время при температуре нагрева составило 50 ч.

Максимальной жаростойкостью (минимальной скоростью окисления) при температурах испытаний 700 и 900°C обладали алитированные слои, полученные при насыщении в смеси с 60% Al (рис. 1, а). Толщина зоны алюминидов покрытия составляла 220 – 230 мкм при общей толщине слоя 410 – 430 мкм. За время испытаний (50 ч) при температурах 700 и 900°C толщина зоны алюминидов практически не изменилась (осталась в пределах ошибки измерения). При этом общая толщина слоя при температурах испытаний 700 и 900°C увеличилась за счет роста толщины слоя твердого раствора алюминия в железе до 450 – 500 и 650 – 680 мкм соответственно.

Несколько меньшей жаростойкостью при принятых условиях обладали слои, полученные алитированием в смеси с 50% Al. Толщина зоны алюминидов в этом покрытии составляла 50 – 60 мкм и практически не изменялась за время испытаний при температурах 700 и 900°C. Общая толщина диффузионных слоев увеличилась от 330 – 360 до 350 – 380 мкм при температуре 700°C и до 500 – 550 мкм при температуре 900°C.

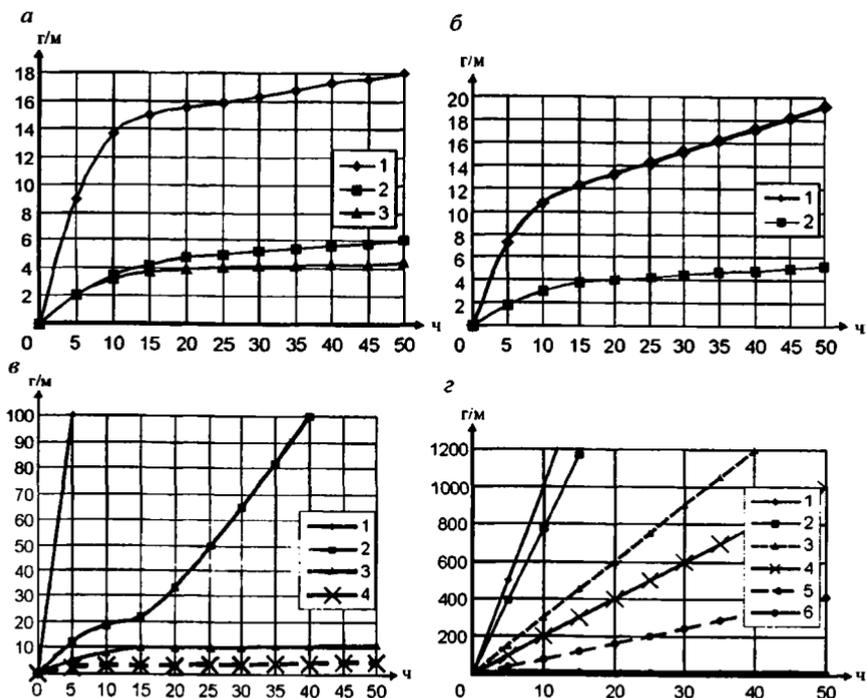


Рис. 1. Влияние алитирования на жаростойкость стали 08КП:

*a* – 60% Al: 1 – алитированная сталь 08КП при температуре испытаний 900°C; 2 – алитированная сталь 08КП при температуре испытаний 700°C; 3 – сталь 12Х18Н10Т без покрытия при температуре испытаний 700°C; *б* – 50% Al: 1 – алитированная сталь 08КП при температуре испытаний 900°C; 2 – алитированная сталь 08КП при температуре испытаний 700°C; *в* – 40% Al: 1 – сталь 12Х18Н10Т без покрытия при температуре испытаний 900°C; 2 – алитированная сталь 08КП при температуре испытаний 900°C; 3 – алитированная сталь 08КП при температуре испытаний 700°C; 4 – сталь 12Х18Н10Т без покрытия при температуре испытаний 700°C; *г* – 30% Al: 1 – сталь 08КП с покрытием при температуре испытаний 900°C; 2 – сталь 08КП без покрытия при температуре испытаний 900°C; 3 – сталь 12Х18Н10Т без покрытия при температуре испытаний 900°C; 4 – сталь 08КП без покрытия при температуре испытаний 700°C; 5 – сталь 08КП с покрытием при температуре испытаний 700°C; 6 – сталь 12Х18Н10Т без покрытия при температуре испытаний 700°C

При температуре 700°C скорость окисления алитированных слоев на стали 08КП, полученных насыщением в смеси с 60 и 50% Al, была практически одинаковой со скоростью окисления стали 12Х18Н10Т без покрытия. Повышение температуры до 900°C привело к небольшому увеличению скорости окисления алитированной стали 08КП и катастрофическому окислению стали 12Х18Н10Т без покрытия.

Следует отметить, что циклические испытания стали 12Х18Н10Т без покрытия сопровождались осыпанием образующейся окалины и уменьшением толщины образцов. Осыпание оксидов с поверхности алитированных образцов стали 08КП не наблюдалось.

Скорость окисления покрытий, полученных при алитировании в сме-

сях с 60 и 50 % Al, была низкой и с повышением температуры испытаний повышалась незначительно.

После насыщения в смеси с 40% Al покрытие общей толщиной 300 – 320 мкм имело высокую жаростойкость при температуре 700°C. Повышение температуры до 900°C привело к увеличению скорости окисления в 50 раз, однако она была значительно ниже скорости окисления незащищенной стали 12X18H10T при той же температуре.

Покрывтия, полученные в смеси с 30% Al, имели низкую жаростойкость при принятых температурах испытаний.

Редуцированию и гибке были подвергнуты оболочки ТЭНов из стали 08КП, алитированные в смесях с 30, 40 и 50% Al при температурах 900 и 1000 °С в течение трех часов. Редуцирование оболочек без подогрева привело к появлению поперечных трещин по всей длине оболочек на всех исследованных покрытиях. Кроме того, на покрытиях, полученных в смеси с 50% Al, наблюдались сколы. После редуцирования с предварительным контактным нагревом оболочек до 900°C трещины и другие дефекты на покрытиях, полученных во всех использованных смесях, отсутствовали в нагретой части оболочек и наблюдались только на их холодных концах. После испытания на жаростойкость при температуре 750°C в течение 0,5 ч оболочек, подвергнутых редуцированию с нагревом, поверхность оболочек, алитированных в смесях с 40 и 50% Al, осталась гладкой, желтоватого цвета, без следов окалины. На оболочках, алитированных в смеси с 30% Al, местами появились следы окалины.

Таким образом, испытания показали, что возможно горячее редуцирование оболочек, алитированных в смесях с 40 и 50% Al, без разрушения жаростойкого алюминидного покрытия. Горячая гибка оболочек из алитированной в смесях с 40 и 50% Al стали 08КП с нагревом перед гибкой в электропечи при температуре 950°C в течение 15 мин не привела к образованию трещин ни в растянутой, ни в сжатой зоне оболочек. После испытаний на сплошность покрытия при температуре 950°C в течение 1 ч поверхность оболочек осталась гладкой, без следов окалины.

Холодная гибка оболочек, алитированных в смесях с 40 и 50% Al, привела к образованию сколов в растянутой зоне покрытия и трещин в сжатой зоне.

Результаты испытаний на пробой обрезков бракованных ТЭНов с контактным стержнем, изолированным от насыщающей смеси неплотно надетым колпачком (стаканом), а также алитированных опытных ТЭНов в количестве 18 штук, концы которых находились в песке, показали, что герметизация торцов непосредственно после алитирования или сушка при температуре 300°C перед испытаниями обеспечивает электрическую прочность изоляции 2500 В и в результате алитирования предохраняет резьбу контактного стержня от охрупчивания.

Таким образом:

- 1) алитированные слои, полученные на стали 08КП в смесях с 60 и

50% Al, по жаростойкости при температуре 700°C не уступают стали 12X18H10T без покрытия, а при температуре 900°C значительно превосходят ее;

2) холодное редуцирование и холодная гибка вызывают разрушение алюминидных покрытий на стали 08КП. Редуцирование и гибка с предварительным нагревом не вызывают разрушения алюминидных покрытий, полученных в смесях с 50 и 40% Al;

3) изоляция узла герметизации от насыщающей смеси неплотно надетым колпачком (стаканом) обеспечивает электрическую прочность изоляции 2500 В и предохраняет резьбу контактного стержня от перенасыщения алюминием и охрупчивания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патрина Н. А., Шур Н. Ф. Защитные покрытия для деталей электропечей. – М.: Энергия, 1975. – 97 с.
2. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением / Ю. А. Белавин, М. А. Евстигнеев, А. М. Чернявский. – М.: Энергоиздат, 1989. – 159 с.
3. Коломыцев П. Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. – М.: Металлургия, 1991. – 237 с.

УДК 621.792/793

**В. А. СМЕТКИН**, канд. пед. наук,  
**В. Г. БОРИСОВ**,  
**Э. Д. ЩЕРБАКОВ**, канд. техн. наук,  
**А. В. БЕССАРАБ** (БНТУ)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЖАРСТОЙКИХ Cr–Al–Si ДИФФУЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ ХН35ВТЮ

Жаростойкость диффузионных слоев зависит от многих факторов: структуры, толщины, плотности и соотношения насыщающих элементов, которые определяются условиями насыщения (температура, время) и составом насыщающей смеси. Таким образом, получение диффузионных слоев максимальной жаростойкости для данных конкретных условий испытаний – экстремальная задача, которую можно решить с помощью методов математического планирования экспериментов [1 – 3].

В работе [4] приведены результаты испытаний на жаростойкость диффузионных слоев сталей 20X13 и 08X18H10T, полученных как при раздельном, так и при совместном насыщении хромом, алюминием, кремнием из порошковых смесей (рис. 1). Для однокомпонентного насыщения использовали порошковые смеси на основе феррохрома марки Х75, алюминия марки АПС-1, кремния марки КР.1 составов: