

## СЕКЦИЯ II СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 546.77.281

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОДИФфуЗИОННЫХ АЛЮМИНИДНЫХ СЛОЕВ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

**В. Г. Дашкевич, П. С. Мышкевич, М. А. Судников**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*Проведены исследования по оценке жаростойкости искусственно оксидированных термодиффузионных слоев анодной обработкой в растворе электролита.*

**Ключевые слова:** жаростойкость, поверхностное упрочнение, термодиффузионное алитирование, алюминидный слой, углеродистая сталь, высокотемпературное окисление.

### EFFICIENCY OF THERMODIFFUSION ALUMINIDE LAYERS ON CARBON STEELS OPERATING AT ELEVATED TEMPERATURES

**V. G. Dashkevich, P. S. Myshkevich, M. A. Sudnikov**

*Belarusian National Technical University, Minsk*

*Research was conducted to evaluate the heat resistance of artificially oxidized thermal diffusion layers by anodic treatment in an electrolyte solution.*

**Keywords:** heat resistance, surface hardening, thermal diffusion aluminizing, aluminide layer, carbon steel, high-temperature oxidation.

Для повышения жаростойкости и долговечности стальных изделий, работающих в теплоэнергетике, нефтехимии и других отраслях, широко используются методы поверхностного упрочнения и защиты. Одним из наиболее эффективных и экономически целесообразных подходов является нанесение термодиффузионных покрытий, в частности, алитирование (насыщение поверхности алюминием). Формирование на поверхности стали алюминидного слоя позволяет создать барьерный слой, препятствующий диффузии кислорода и росту оксидной пленки [1]. Подход давно известный, эффективный, но важным в долговечности такого рода покрытий является образующаяся структура самой оксидной пленки в процессе эксплуатации. Когда она формируется естественным путем, под воздействием высоких температур, плотность структур и ее барьерные свойства не всегда лучшие. Если создать искусственные условия роста оксидных слоев в среде, перед эксплуатацией, эффективность может быть гораздо выше. Особенно если проводить такую обработку в специальной среде, которая дополнительно модифицирует оксидную пленку, т. е. осуществить пассивацию. Такого рода исследования для термодиффузионных алюминидных покрытий достаточно актуальны, поскольку будут способствовать повышению функциональных возможностей алюминидных покрытий на сталях.

Термодиффузионное алитирование обычно осуществляется методом контейнерной и бесконтейнерной обработки (например, из газовой или пастообразной фазы). Процесс включает диффузию атомов алюминия в поверхностный слой углеродистой стали при температурах 800–1000 °С [2, 3]. Такой вариант, относящийся к высокотемпературной обработке, приводит к частичному подплавлению алюминия на поверхности, кинетика роста и концентрация алюминия в этом случае максимально высокая. Диффузия проходит преимущественно через жидкую фазу из расплавленного алюминия и эвтектики системы  $\text{FeAl}_3 + \alpha\text{-Al}$ .

В результате взаимодействия диффундирующего алюминия с железом матричного материала стали формируется диффузионная зона, состоящая преимущественно из интерметаллидных фаз системы Fe–Al, таких как FeAl,  $\text{Fe}_3\text{Al}$  и  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ . Наличие этих фаз придает покрытию высокую твердость и стойкость к абразивному износу (вторичный эффект), но главное это обеспечение жаростойкости. Внешний вид поверхности образца из стали У8 после высокотемпературного алитирования и окисления представлен на рис. 1.

Экспериментальные исследования показывают, что алюминидные слои на углеродистой стали могут выдерживать длительную эксплуатацию при температурах до 850–950 °С с минимальной потерей массы (вместо интенсивного окалинообразования на исходной стали).

Для показателя жаростойкости, ее эффективности важным является концентрация алюминия в поверхностном слое, которая должна быть достаточной для постоянного восстановления защитного слоя в случае его повреждения или отслоения и по нашим данным такая концентрация должна быть не менее 20 % масс. Отметим, что эффективность термодиффузионных слоев может снижаться при длительной выдержке из-за диффузионного истощения алюминия в приповерхностном слое, что приводит к ускоренному окислению после местного повреждения и исчезновения барьерных свойств.

Проведенные исследования по оценке жаростойкости искусственно окисированных термодиффузионных слоев анодной обработкой в растворе электролита показали прирост стойкости до 30 % в сравнении с образцами без дополнительной обработки.



Рис. 1. Внешний вид поверхности образца из стали У8 после высокотемпературного алитирования (а) и окисления (б)

Термодиффузионные алюминидные слои являются высокоэффективным средством защиты углеродистых сталей от высокотемпературного окисления. Их эффективность обусловлена формированием интерметаллидной фазы, которая служит источником алюминия для образования плотной и стабильной оксидной пленки. Дополнительная обработка, способствующая образованию модифицированных ок-

сидных слоев, существенно повышает стойкость изделий с термодиффузионными защитными слоями. Принудительное создание оксидированных слоев на сплавах железа с участием технологии термодиффузионного насыщения позволяет повысить защитные функции изделиям, обеспечивает высокую стойкость в условиях высокотемпературной коррозии, что является важным для изделий печного оборудования, различных устройств передачи и аккумуляирования тепла.

#### Литература

1. David, J. Y. High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals / J. Y. David. – Netherlands : Elsevier, 2008. – 574 p.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенок, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
3. Коломьцев, П. Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П. Т. Коломьцев. – М. : Металлургия, 1979. – 272 с.

УДК 621.762

### РАЗРАБОТКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЦИНКОТЕРМИИ

**В. Г. Харкевич, А. Н. Жигалов, А. Н. Жариков,  
М. В. Башаримов, В. А. Капитонов**

*ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев*

*Рассмотрены температурные режимы, которые необходимо задавать для каждой стадии процесса цинкотермии. Изложена методика проведения исследований по варьированию параметров процесса цинкотермии.*

**Ключевые слова:** цинкотермия, твердосплавный лом, технология рециклинга, температурная модель.

### DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE MODEL FOR THE ZINCOTHERMY PROCESS

**V. G. Kharkevich, A. N. Zhigalov, A. N. Zharikov,  
M. V. Basharimov, V. A. Kapitonov**

*State Scientific Institution “Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus”, Mogilev*

*The temperature regimes required for each stage of the zincothermy process are considered. Development of a research methodology for varying zincothermy process parameters.*

**Keywords:** zincometry, carbide scrap, recycling technology, temperature model.

В настоящее время в ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» ведутся научные исследования по рециклингу лома и отходов твердосплавных изделий методом цинкотермии. Ранее были выявлены параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность процесса разложения твердосплавного лома:

- соотношение цинка к твердосплавному лому;
- температурные режимы при разрушении кобальтовой связки;
- время воздействия жидкого цинка на лом;
- давление в рециклинговой камере.