

50% Al, по жаростойкости при температуре 700°C не уступают стали 12Х18Н10Т 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 20Х13 и 08Х18Н10Т, 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:

(50% X75 + 50%  $Al_2O_3$ ) + 1,5%  $NH_4Cl$  – для хромирования;  
 (20% АСП-1 + 80%  $Al_2O_3$ ) + 1,5%  $NH_4Cl$  – для алитирования;  
 (10% Кр.1 + 90%  $Al_2O_3$ ) + 0,5%  $NH_4Cl$  – для силицирования.

Для двух- и трехкомпонентного насыщения применяли взятые в необходимых соотношениях смеси для однокомпонентного насыщения. Насыщение проводили в контейнерах с плавкими затворами при температурах 1100°C в течение 5 ч.

Как видно из рис. 1, области максимальной жаростойкости при трехкомпонентном насыщении сталей 20X13 и 08X18H10T совпадают и соответствуют составу: 40% хромирующей смеси + 36% алитирующей смеси + 24% силицирующей смеси, т. е.

(20% X75 + 7,2% АПС-1 + 2,4% Кр.1 + 70,4%  $Al_2O_3$ ) + 1,26%  $NH_4Cl$ .

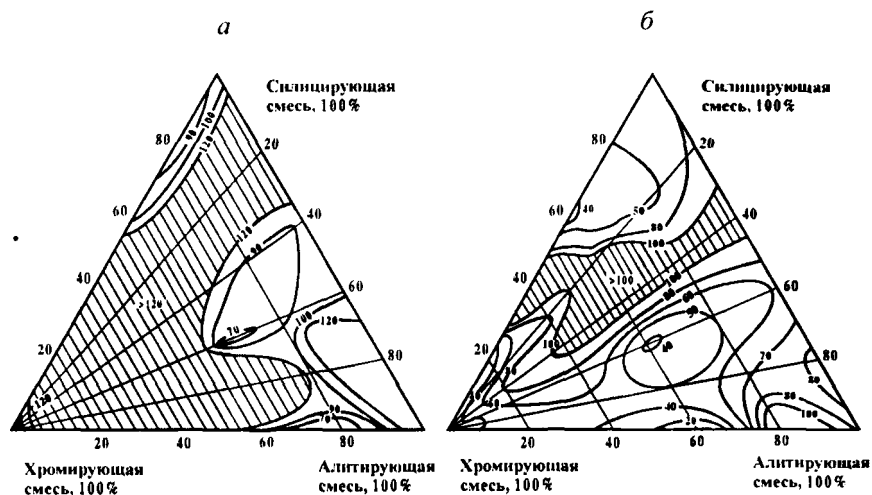


Рис. 1. Жаростойкость ( $r/m^2$ ) Cr-Al-Si диффузионных слоев:  
 а – на сталях 20X13; б – на сталях 08X18H10T ( $t_{\text{нап}} = 1000^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 100$  ч)

Аналогичные результаты получены также для Cr-Al-Si диффузионных покрытий на техническом железе и стали 45.

Таким образом, анализ приведенных результатов исследований позволяет ожидать получения диффузионных слоев с высокой жаростойкостью и на стали ХН35ВТЮ при обработке в смеси указанного состава и взять этот состав и условия насыщения в качестве основного уровня для матрицы планирования при оптимизации получения жаростойких Cr-Al-Si диффузионных покрытий.

Диффузионное насыщение проводили по изложенной методике для сталей 20X13 и 08X18H10T, только вместо алюминия марки АПС-1 применяли более активный порошок алюминия марки АПВ.

Циклические испытания на жаростойкость проводили, как и для сталей 20X13 и 08X18H10T, в воздушной атмосфере электрической печи по схемам: нагрев до 1000°C в течение 2 – 2,5 ч, выдержка при этой температуре 5 ч, охлаждение: а) до 200 – 300°C вместе с печью, затем на воздухе; б) на воздухе.

Параметры оптимизации:

1) изменение массы образца, отнесенное к единице поверхности ( $y_1 = \Delta m/S$ , г/м<sup>2</sup>) за 100 ч испытаний при 1000°C;

2) скорость окисления в конце 100 ч колебаний ( $y_2 = \Delta m/(St)$ , г/(м<sup>2</sup>·ч)), определяемая как тангенс угла наклона касательной к кинетической кривой окисления.

По первому параметру оптимизации оценивалась количественная сторона жаростойкости и определялась путем взвешивания после каждого цикла испытаний прокаленного керамического тигля с находящимся в нем образцом и отслоившимися с поверхности при нагреве и охлаждении продуктами коррозии. В отдельных опытах были ошибки из-за отскакивания окалины за пределы тигля при циклических сменах температуры, что приводило к уменьшению массы образца в процессе испытаний. Второй параметр находился с помощью построенных кинетических кривых окисления путем взвешивания после каждого цикла испытаний на жаростойкость отдельно образца с оксидной пленкой, находящейся на нем. В этом случае в оценке жаростойкости не учитывается «прирабатываемость» диффузионного слоя в начальный период испытаний. Для выбора лучшего опыта в матрице планирования необходимо использовать одновременно оба параметра.

Возможно применение в качестве параметра оптимизации, дающего более точную, компромиссную оценку жаростойкости, площади, занимаемой кинетической кривой, построенной в координатах  $\Delta m/S = f(\tau)$  взвешиванием образца без осыпавшейся окалины.

В качестве факторов, влияющих на жаростойкость диффузионных слоев, принимались содержание компонентов насыщающих смесей, температура и время насыщения.

Интервал варьирования составов смесей был принят равным  $\pm 10\%$  для хромирующей (хр.см.), алитирующей (ал.см.) и силицирующей (сил.см.) составляющих смеси по отношению к опыту основного уровня. Составы этих смесей при симметричном их изменении на  $\pm 10\%$  вокруг основного уровня приведены ниже:

40% хр.см. + 60% (50% ал.см. + 50% сил.см.),

т. е.

100% (20% X75 + 6% АПВ + 3% Кр.1 + 71% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + 1,2% NH<sub>4</sub>Cl;

40% хр.см. + 60% (70% ал.см. + 30% сил.см.),

т. е.

100% (20% X75 + 8,4% АПВ + 1,8% Кр.1 + 69,8%  $Al_2O_3$ ) + 1,32%  $NH_4Cl$ ;  
50% хр.см. + 50% (60% ал.см. + 40% сил.см.),

т. е.

100% (25% X75 + 6% АПВ + 2% Кр.1 + 67%  $Al_2O_3$ ) + 1,3%  $NH_4Cl$ ;  
30% хр.см. + 70% (60% ал.см. + 40% сил.см.),

т. е.

100% (15% X75 + 8,4% АПВ + 2,8% Кр.1 + 73,8%  $Al_2O_3$ ) + 1,22%  $NH_4Cl$ .

Из приведенных выше составов были найдены интервалы варьирования факторов, представляющих компоненты смесей (содержание X75, АПВ, Кр.1,  $NH_4Cl$  в смесях). Округленные значения основных, верхних и нижних уровней интервалов варьирования факторов даны в матрице планирования, представляющей дробную реплику  $2^{(6-3)}$  с определяющим контрастом (табл. 1):

$$I = X_1X_3X_6 = X_1X_4X_6 = X_2X_3X_6 = X_2X_4X_5 = X_1X_2X_3X_4 = X_1X_2X_5X_6 = X_3X_4X_5X_6.$$

В матрице для каждого опыта приведена средняя жаростойкость, полученная по результатам испытаний трех образцов.

Для оценки дисперсии опыт в центре плана был продублирован 4 раза. Насыщение проводили по описанной методике.

Резко различающиеся значения жаростойкости в параллельных опытах в центре плана были проверены по критерию Стьюдента на наличие грубых ошибок (брака) [1 – 3]. В данном случае таких ошибок не оказалось.

Оценка скорости коррозии в конце режима испытаний на жаростойкость производилась по кинетическим кривым окисления (рис. 2).

В результате статистической обработки экспериментальных данных по скорости коррозии ( $\Delta m / (St)$ , г/(м<sup>2</sup>·ч)) получена следующая модель уровня жаростойкости (уравнение регрессии):

$$y_2 = 0,0073 - 0,0059x_1 + 0,0026x_2 - 0,0028x_4 - 0,0031x_6.$$

Проверка полученной математической модели на адекватность по F-критерию при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  показала, что линейная модель неадекватна.

В случае получения неадекватных моделей может быть принято несколько решений [1, 2]. Так как область оптимума в наших исследованиях близка, принято решение закончить исследования. Условия лучших опытов № 2, 8 и основного уровня в матрице можно рекомендовать для получения диффузионных слоев высокой жаростойкости для стали ХН35ВТЮ.

Для производственных условий при приготовлении насыщающих смесей вместо хромирующей смеси, содержащей дорогостоящий порошок X75, можно применять такое же количество хромирующей смеси, полученной методом алюмотермии:

Таблица 1

Матрица планирования и результаты эксперимента

Факторы	Температура, °С	Кол-во Х75, %	Кол-во АПВ, %	Кол-во Кр.1, %	Кол-во $\text{NH}_4\text{Cl}$	Время насыщения, ч	Толщина слоя, мкм	Отн. изм. массы, г/м <sup>2</sup>	Скорость окисления, г/(м <sup>2</sup> ·ч)
Основ. уровень ( $X_i$ )	1100	20	7,5	2,5	1,5	5			
Интервал варьир. ( $\Delta X_i$ )	50	5	1,0	1,0	0,5	1			
Верхн. уровень ( $X_i+1$ )	1150	25	8,5	3,5	2,0	6			
Нижн. уровень ( $X_i - 1$ )	1050	15	6,5	1,5	1,0	4			
Код	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$		$y_1$	$y_2$
Номер опыта									
1	-	-	-	-	-	-	42	33,0	0,0148
2	+	-	+	-	-	+	140	15,3	0,0006
3	+	-	-	+	+	-	126	51,1	0,0025
4	-	+	+	-	+	-	49	13,7	0,0235
5	-	+	-	+	-	+	45	32,6	0,0129
6	+	+	+	+	-	-	114	37,0	0,0008
7	+	+	-	-	+	+	84	41,8	0,0015
8	-	-	+	+	+	+	101	17,3	0,0017
Опыты в центре плана									
1	0	0	0	0	0	0	90	20,0	0,0017
2	0	0	0	0	0	0	91	25,9	0,0035
3	0	0	0	0	0	0	90	16,6	0,0009
4	0	0	0	0	0	0	88	35,8	0,0008

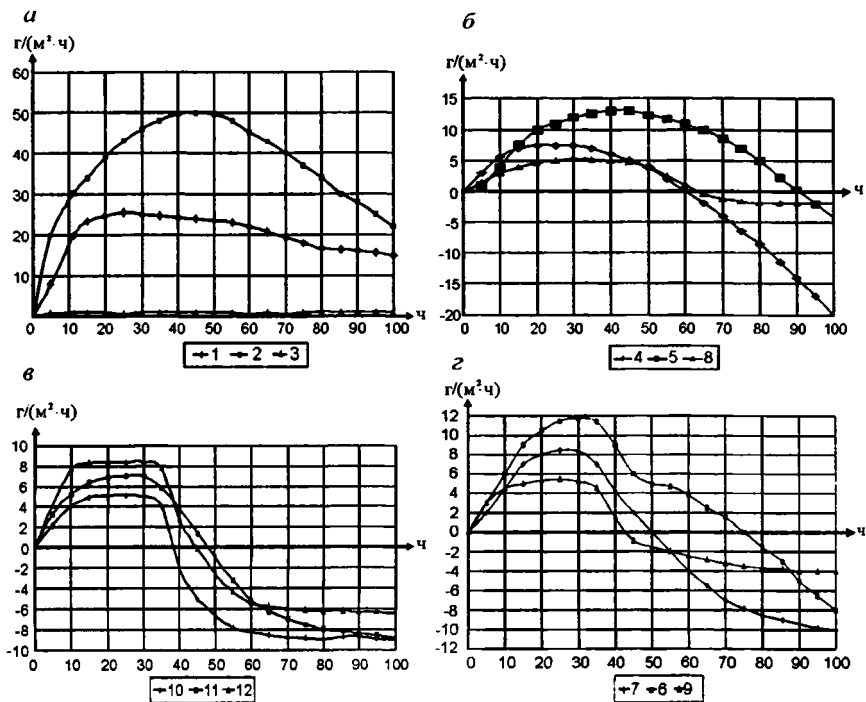


Рис. 2. Кинетика окисления диффузионных слоев

100% (30%  $Al_2O_3$  + 21% АПВ + 49%  $Cr_2O_3$ ) + 0,5%  $NH_4Cl$ .

Состав смеси в этом случае для опыта на основном уровне (см. табл. 1) следующий:

100% (20% хр.см. алюминотермич + 7,5% АПВ + 2,5% Кр.1 + 70%  $Al_2O_3$ ) +  
+ 1,5%  $NH_4Cl$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 283 с.
2. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования элементов. – М.: Машиностроение; София: Техника. – 1980. – С.13 – 153.
3. Новик Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. – М.: Изд-во МИСиС, 1972. – 106 с.
4. Структура и жаростойкость диффузионных слоев сталей системы Cr–Al–Si / Л. С. Ляхович, Э. Д. Щербаков, В. Г. Борисов и др. // Новые методы упрочнения и обработки металлов. – Новосибирск: НЭТИ, 1981. – С. 107 – 116.

2. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования элементов. — М.: Машиностроение; София: Техника. — 1980. — С. 13 — 153.

3. Новик Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. — М.: Изд-во МИСиС, 1972. — 106 с.

4. Структура и жаростойкость диффузионных слоев сталей системы  $\text{Cr-Al-Si}$  /Л. С. Ляхович, Э. Д. Щербаков, В. Г. Борисов и др. // Новые методы упрочнения и обработки металлов. — Новосибирск: НЭТИ. 1981. — С. 107 — 116.

УДК 669.018.95

Е. С. ГОЛУБЦОВА, канд. техн. наук,  
Б. А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БНТУ)

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СИАЛОНОВОЙ КЕРАМИКИ

Низкая пластичность материалов на основе нитрида кремния определяет сильную зависимость их механических свойств от состояния поверхности. Получение керамических изделий сложной формы из нитридокремниевых материалов, как правило, связано с окончательной размерной и поверхностной обработкой, в процессе которой неизбежно повреждается некоторая зона материала, прилегающая к поверхности обработки. Хрупкость конструкционной керамики заставляет вести механическую обработку (в основном алмазным инструментом) в достаточно мягких режимах, но и в этом случае возникающие в поверхностном слое микротрещины заметно снижают прочность образцов. Предпринимаются попытки использовать для механической обработки лазеры. Сканируя лазерными импульсами поверхность керамики, добиваются скалывания кусочков за счет невысокой стойкости к термоудару. Достоинством метода является отсутствие необходимости в режущих инструментах, однако и здесь из-за микротрещин прочность керамики снижается на ~ 40%.

В связи с этим изучены структурные и фазовые изменения в приповерхностных слоях горячепрессованной нитридокремниевой керамики после импульсной периодической лазерной размерной обработки и их влияние на механические свойства материала [1]. Показано, что, применяя специальный высокотемпературный отжиг после лазерной обработки, можно восстановить механические свойства до начального уровня.

В данной работе изучалось также влияние пяти способов обработки (до обработки, свободная генерация, то же с последующим отжигом, модулированная добротность, то же с последующим отжигом) на микротвердость  $H_{\mu}$  (ГПа), предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  (МПа) и коэффициент вязкости разрушения  $K_{Ic}$  (МПа·м<sup>0.5</sup>) тисинита, нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) и сиалона. Состав и пористость этих керамик приведены в табл. 1.