

ЖАРОСТОЙКИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА FeAlCr С ДОБАВКОЙ CeO₂*

Ю.С. Борисов¹, А.Л. Борисова¹, Т.В. Цымбалиста¹, Н.И. Капорик¹, М.А. Васильковская²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: borisov@paton.kiev.ua

²Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,
03680, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: navas@ukr.net

Представлены результаты исследования жаростойкости покрытий, полученных методами плазменного (ПН) и высокоскоростного газопламенного (ВСГПН) напыления с использованием композиционного порошка на основе FeAlCr с добавлением 2 мас. % CeO₂, а также методами электродуговой (ЭДМ) и активированной дуговой металлизации (АДМ) с применением порошковой проволоки 98(82Fe+16Al+2Cr)+2CeO₂ (мас. %). Композиционный порошок был изготовлен методом механохимического синтеза (МХС) путем обработки смеси порошков компонентов в планетарной мельнице. Испытания на жаростойкость проводили в среде воздуха при 800, 900 и 1000 °С в течение 7 ч весовым методом. Структура покрытий после испытания на жаростойкость исследована с применением металлографического и рентгеноструктурного анализа (РСФА). Установлено, что в процессе испытаний у покрытий, полученных методами ПН и ВСГПН, наблюдается явление отслаивания, тогда как покрытия, полученные методами ЭДМ и АДМ, сохраняют плотную связь с основой. Полученные кинетические кривые жаростойкости показали, что во всем временном интервале испытаний при 800...1000 °С механизм окисления подчиняется параболическому закону. С использованием данных кинетических зависимостей были построены параметрические диаграммы жаростойкости, позволяющие проводить оценку долговечности исследованных защитных покрытий в диапазоне температур 800...1000 °С. Наиболее высокую жаростойкость имеют покрытия FeAlCrCeO₂, полученные из порошковой проволоки методами ЭДМ и АДМ, которые при 1000 °С превышают стойкость стали 45 в 23...26 раз, и соответствуют жаростойкости стали 08X17T. Библиогр. 12, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: газотермическое напыление, электродуговая металлизация, интерметаллиды железо-алюминий, механохимический синтез, композиционный порошок, порошковая проволока, параметрическая диаграмма жаростойкости, система FeAlCr–CeO₂

Одной из современных актуальных задач инженерии поверхности является разработка покрытий и технологии их нанесения, обеспечивающих защиту деталей, элементов конструкций и узлов техники от высокотемпературной коррозии и изнашивания, в частности, теплоэнергетических агрегатов и устройств, работающих в потоках продуктов сгорания различного рода топлив. К ним относятся поверхности нагрева котлов ТЭЦ, мусоросжигательных заводов, а также элементов рекуператорных установок. Разработка новых конструкций рекуператоров, позволяющих повысить степень использования тепла отходящих газов на 15...20 %, связана с необходимостью обеспечить защиту их элементов путем нанесения покрытий с повышенной жаростойкостью.

В связи с этим интерметаллиды железа Fe₃Al и FeAl, которые отличаются высокой жаростойкостью при 600...1000 °С и стойкостью к эрозионному изнашиванию в условиях воздействия газовых потоков, являются перспективными материалами в качестве функциональных защитных покрытий такого практического назначения [1].

Их преимущество перед интерметаллидами никеля состоит в повышенном сопротивлении высокотемпературной коррозии в серосодержащих газовых средах [1, 2].

Теоретические и экспериментальные работы, выполненные в области жаростойкости интерметаллидов железа, показали, что путем оптимизации содержания легирующих элементов, в частности, хрома, возможно повысить их сопротивление высокотемпературной коррозии и механические свойства [3, 4]. Другая возможность повышения жаростойкости высокотемпературных Fe- и Ni-сплавов и покрытий на их основе связана с использованием в качестве легирующих добавок сплавов и оксидов РЗМ [5–7]. Результаты экспериментальных исследований влияния добавок CeO₂ в интерметаллидное FeAl-покрытие, полученное методами ВСГПН (HVOF), показали, что при его содержании 2...5 мас. % стойкость материала FeAl–CeO₂ не только к окислению, но и к эрозионному изнашиванию при 700...800 °С повышается в 2,0...2,5 раза. Кроме того, было обнаружено, что введение CeO₂ снижает скорость истощения содержания алюминия в покрытии, увеличивая таким путем долговечность защитных свойств покрытия [8].

* В работе принимали участие А.Н. Бурлаченко, А.П. Грищенко, И.А. Демьянов, В.Н. Лопата.

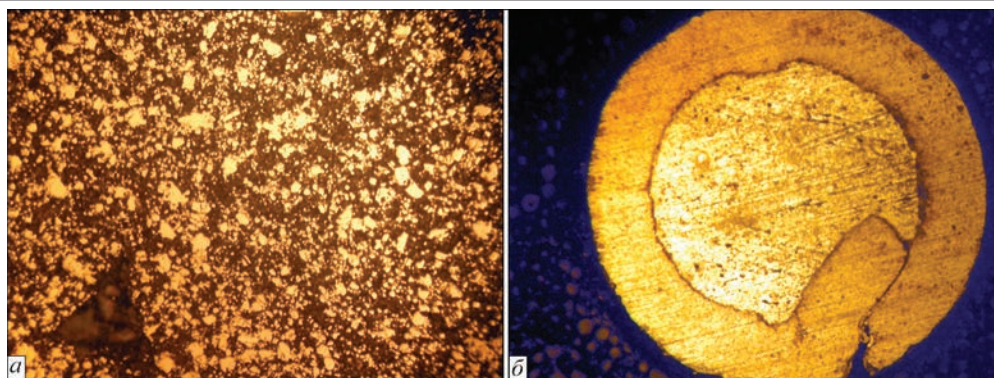


Рис. 1. Микроструктура ($\times 400$) порошка FeAlCr+CeO₂, полученного методом МХС (а), и поперечного сечения порошковой проволоки Fe+Al+Cr+CeO₂ (б)

Результаты практического использования FeAl-покрытия в условиях работы мусоросжигающего завода подтвердили эффективность его применения для защиты поверхности оборудования таких предприятий от коррозионно-эрозионного изнашивания [9].

Разработка технологии газотермических защитных FeAl-покрытий связана с решением вопроса производства исходных материалов. Нанесение FeAl-покрытий путем газотермического напыления может быть осуществлено с использованием как порошков, так и порошковых проволок [9, 10].

В настоящей работе нанесение покрытий было проведено путем как плазменного и высокоскоростного газопламенного напыления с применением порошков на основе FeAl, так и электродугового напыления покрытий из порошковых проволок на FeAl-основе с введением CeO₂.

Объекты исследования и методика эксперимента. Для изготовления образцов с жаростойкими покрытиями методами газотермического напыления был изготовлен композиционный порошок (КП) следующего состава (мас. %): 98(82Fe+16Al+2Cr)+2CeO₂.

В качестве исходных материалов были использованы порошки: Fe (марки ПЖР), фр. 63...160 мкм (99 мас. % Fe); Al (марки ПА-4), фр. 40...100 мкм (98,9 мас. % Al); Cr (марки ПХ1М), фр. <100 мкм (99,1 мас. % Cr); CeO₂ (марки S-PXCeO 13092505), фр. <40 мкм (99,99 мас. % CeO₂).

Получение композиционного порошка осуществляли методом механохимического синтеза (МХС), который проводили в планетарной мельнице «Активатор 2SL» (ЗАО «Активатор», г. Новосибирск, Россия) при скорости вращения центрального диска 1000 об/мин, а барабанов, которые вращаются в противоположную сторону, 1500 об/мин. Процесс МХС проводили в атмосфере воздуха в течение 5 ч. В процессе МХС осуществляли водяное охлаждение барабанов и пла-

нетарного механизма. Для устранения налипания обрабатываемой шихты на стенку барабана и размольные тела в начале процесса МХС в смесь добавляли поверхностно-активное вещество (олеиновую кислоту, в количестве 0,3 мас. %).

Для нанесения покрытий методами электродуговой металлизации (ЭДМ) и активированной дуговой металлизации (АДМ) была изготовлена порошковая проволока (ПП) диаметром 1,85 мм (рис. 1, б) при толщине оболочки из стали 08кп 0,5 мм. В качестве наполнителя использовали механическую смесь порошков Al, Cr и CeO₂ в соотношении 80:10:10 (мас. %). Степень заполнения составляет 14 об. %, рассчитанный состав порошковой проволоки (мас. %): 98(82Fe+16Al+2Cr)+2CeO₂.

Микроструктура МХС-порошка FeAlCr+CeO₂ и поперечного сечения порошковой проволоки Fe+Al+Cr+CeO₂ представлены на рис. 1.

Как показали результаты рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА) (рис. 2), в процессе МХС формируется композиционный порошок, содержащий фазы FeAl, Fe₂AlCr, Fe₃Al, который после операции конгломерирования был использован для нанесения покрытий методами плазменного (ПН) и высокоскоростного газопламенного (ВСГПН) напыления.

Плазменное напыление (ПН) покрытий проводили на установке УПУ-8М при следующих параметрах: $I = 500$ А, $U = 45$ В, расход плаз-

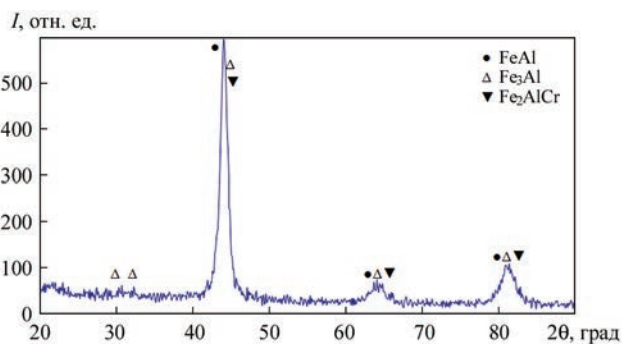


Рис. 2. Рентгенограмма МХС порошка FeAlCr+CeO₂, полученного в планетарной мельнице в течение 5 ч

Таблица 1. Характеристика газотермических покрытий, полученных из МХС-порошка FeCrAl+CeO₂ (ПН, ВСГПН) и ПП Fe+Al+Cr+CeO₂ (АДМ и ЭДМ)

Метод нанесения	Толщина, мкм	H _ц , МПа	Фазовый состав
ПН	250...300	3890±1180	FeAl, Fe ₃ Al, FeCr, CeAlO ₃
ВСГПН	250...300	3376±683	FeAl, Fe ₃ Al, Fe ₂ AlCr, CeAlO ₃ , Al ₄ Ce
АДМ	125...210	2458±31	Fe, Al, FeAl, Fe-Cr, CrO
ЭДМ	440...700	2150±433	FeAl, Fe ₃ Al, Fe-Cr

образующего газа (Ar+N₂) — 25 л/мин, дистанция напыления L = 120 мм. Для напыления использовали порошок с размером частиц <40 мкм.

Нанесение покрытий методом высокоскоростного газопламенного напыления (ВГПН) осуществляли при следующих технологических параметрах:

- расход пропан-бутана 0,2 м³/ч, давление 4,5 атм;
- расход кислорода 0,5 м/ч, давление 7 атм;
- давление транспортирующих газов (воздуха и азота) 6 атм;
- дистанция напыления 120...150 мм;
- размер частиц <63 мкм.

Исследование жаростойкости покрытий проводили в температурном интервале 800...1000 °С на специально сконструированной установке путем периодического взвешивания непосредственно в печи при температуре испытаний.

Полученные результаты сравнивали с результатами испытаний нержавеющей стали 08Х17Т и стали 45, причем для стали 45 температуры испытаний были 700 и 800 °С в связи с ее низкой жаростойкостью.

Получение покрытий методом активированной дуговой металлизации (АДМ) было проведено с использованием установки АДМ при следующих параметрах:

- давление воздуха 6 атм;
- давление пропан-бутана 3 атм;
- напряжение 30 В, сила тока 250 А;
- дистанция напыления 100 мм

Параметры процесса нанесения покрытий методом электродуговой металлизации (ЭДМ), проведенного с использованием металлизатора ЭМ-14:

- давление воздуха 6,5 атм;
- напряжение 36 В, сила тока 80 А;
- дистанция напыления 100...120 мм

Покрытия наносили на образцы из стали 45 диаметром 10 мм с формой желудка.

Результаты эксперимента и обсуждение. Металлографический анализ напыленных покрытий (рис. 3) показал, что во всех случаях на поверхности образцов из стали 45 формируются плотные, однородные по структуре и составу покрытия, не имеющие дефектов и отслоений на границе с основой.

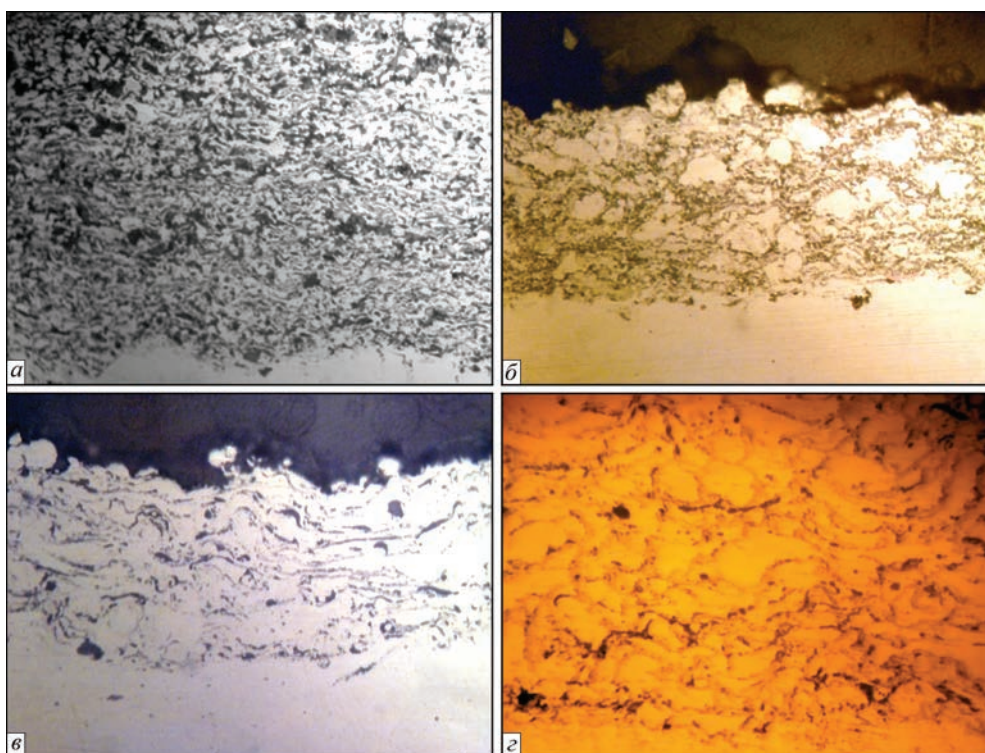


Рис. 3. Микроструктура (×400) покрытий: ПН (а), ВСГПН (б) из МХС порошка FeAlCr+CeO₂ и АДМ (в), ЭДМ (г) из порошковой проволоки Fe+Al+Cr+CeO₂

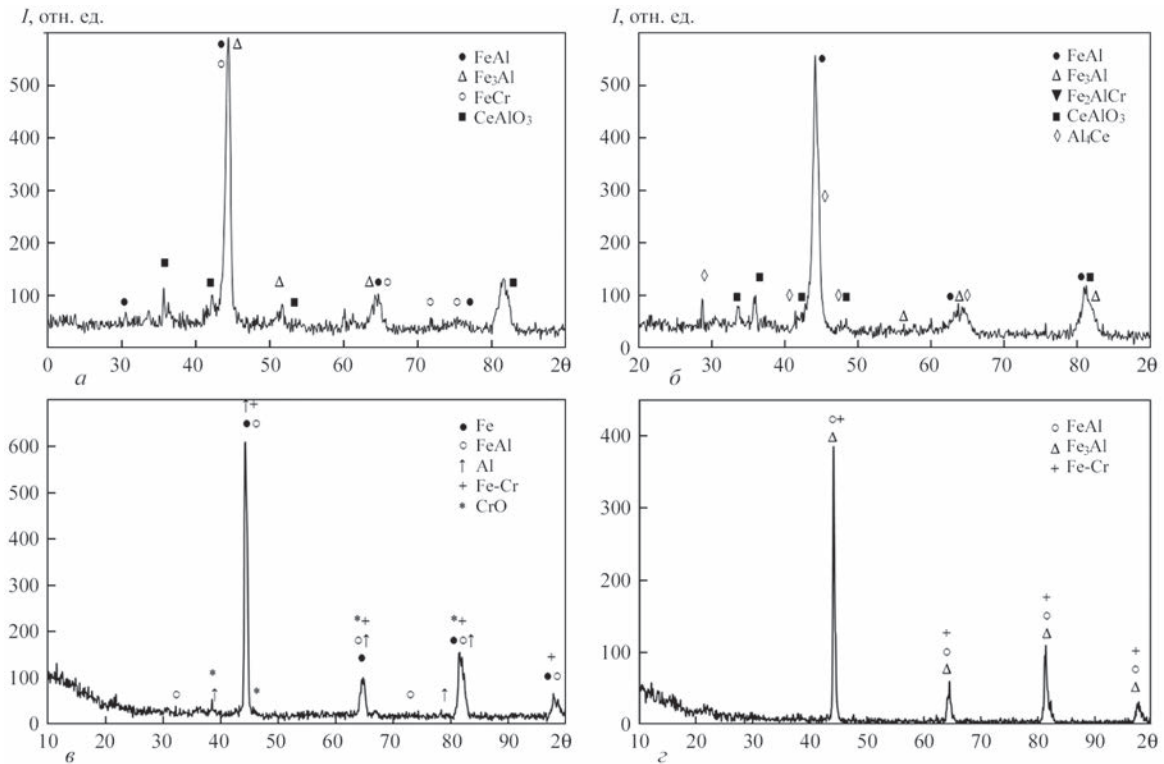


Рис. 4. Рентгенограммы покрытий: ПН (а), ВСГПН (б), из МХС порошка FeAlCr+CeO₂ и АДМ (в), ЭДМ (г) из порошковой проволоки Fe+Al+Cr+CeO₂

Методом РСФА установлено, что в процессе напыления покрытий из порошка FeAlCr+CeO₂ методами ПН и ВСГПН формируются покрытия, содержащие продукт межфазного взаимодействия компонентов напыляемого композиционного FeAlCr+CeO₂ порошка (КП), а также оксиды Fe₃O₄, FeAl₂O₄, CeAlO₃, образующиеся при окис-

лении частиц КП в процессе напыления. По качественному составу покрытия не отличаются (рис. 3, а, б) и (рис. 4, а, б), можно лишь отметить более высокое содержание оксидов в плазменных покрытиях по сравнению с ВСГПН, что вероятно связано с более высокой дисперсностью напыляемых частиц.

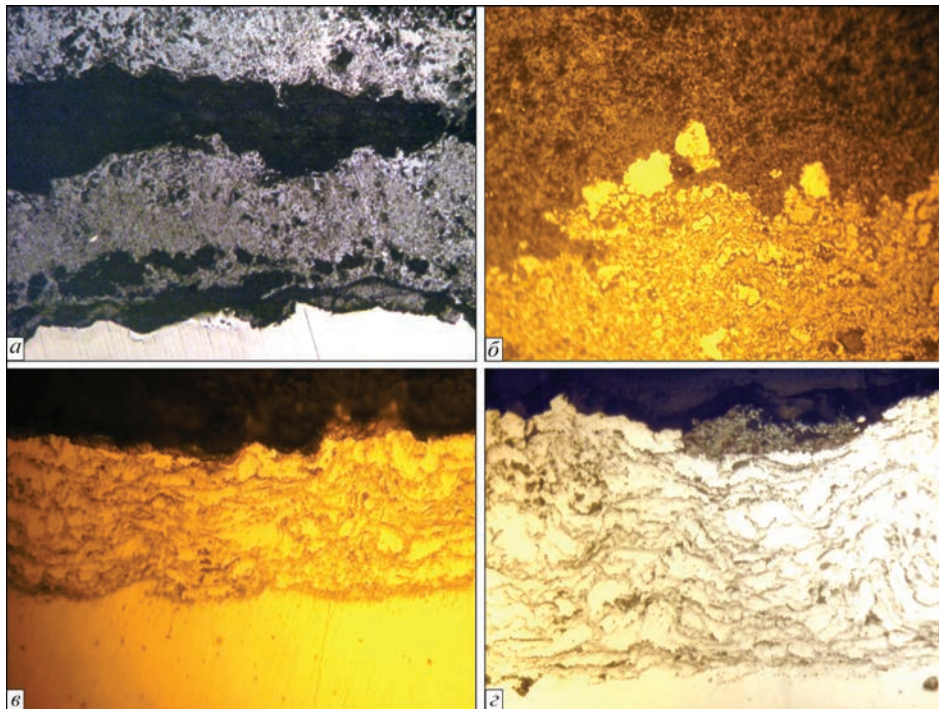


Рис. 5. Микроструктура (×400) ГТН покрытий, полученных из МХС-порошка FeAlCr+CeO₂ методом ПН (а), ВСГПН (б) и ПП Fe+Al+Cr+CeO₂, полученных методами АДМ (в) и ЭДМ (г), после испытаний на жаростойкость при 1000 °С

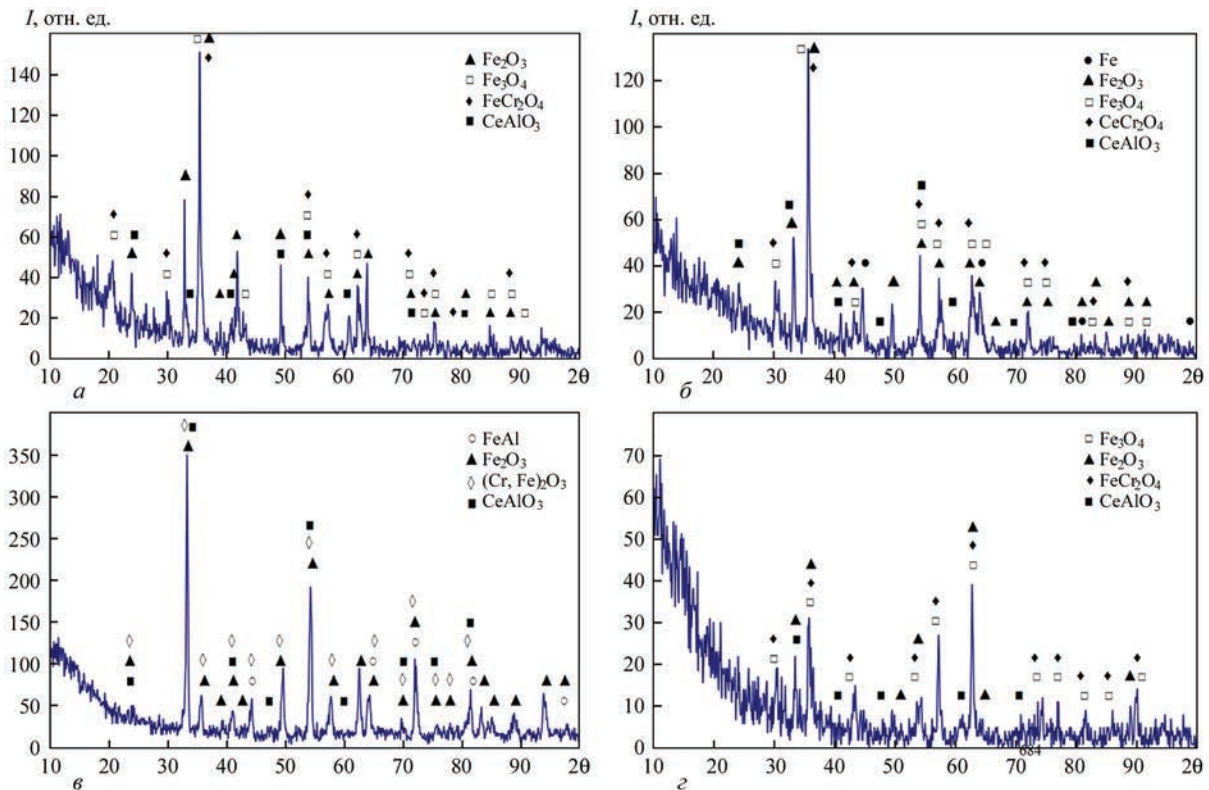


Рис. 6. Рентгенограммы ГТН-покрытий: ПН (а), ВСППН (б) из МХС порошка $FeAlCr+CeO_2$, и АДМ (в) и ЭДМ (з) из порошковой проволоки $Fe+Al+Cr+CeO_2$ после испытаний на жаростойкость при $1000\text{ }^\circ\text{C}$

В АДМ- и ЭДМ-покрытиях оксидные фазы методом РСФА (рис. 4, в, з) не обнаружены, как впрочем не обнаружено и следов SeO_2 . Отличие фазового состава АДМ и ЭДМ-покрытий, образующихся при напылении из порошковых проволок, заключается в том, что в АДМ-покрытии реакция между компонентами проволок Fe и Al в процессе напыления до конца не происходит и в покрытии содержатся данные элементы в чистом виде.

При металлографическом анализе покрытий, прошедших испытание на жаростойкость, было установлено, что плазменные и газопламенные покрытия (рис. 5, а, б) в процессе окисления растрескиваются и отслаиваются от основы, тогда как покрытия, нанесенные методами электродуговой металлизации (АДМ и ЭДМ), плотно прилегают к основе и не отслаиваются даже после испытаний при температуре $1000\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 ч. Согласно результатам РСФА (рис. 6) для всех типов покрытий на их поверхности обнаружены оксиды железа, сложные оксиды железа-хрома и оксид $CeAlO_3$, в том числе и в ЭДМ- и АДМ-покрытиях, которые в исходном состоянии не были выявлены.

На рис. 7 представлены кинетические зависимости окисления газотермических покрытий и незащищенных сталей сталь 45 и 08X17Т в температурном интервале $800\text{ }^\circ\text{C}$ на воздухе. Характер кривых свидетельствует о том, что механизм окисления во всех случаях подчиняется параболическому вре-

менному закону во всем исследованном температурном интервале $800\text{ }^\circ\text{C}$.

Одной из важных характеристик защитных жаростойких покрытий является прогноз долговечности их службы. Такой прогноз может быть сделан путем построения параметрических диаграмм жаростойкости [11].

Параметрическая диаграмма жаростойкости представляет собой зависимость потери (увеличения) массы материала покрытия при окислении от параметра жаростойкости. Параметр жаростойкости — это физическая величина, скорость изменения во времени которой пропорциональна (с обратным знаком) истинной скорости окисления материала покрытия, вычисленной по величинам относительных потерь (увеличения) его массы [12].

Методика построения параметрических диаграмм заключается в определении величин n и Q , где n — показатель степени параболической зависимости процесса окисления и Q — энергия активации.

Показатель n определяется из экспериментальной кинетической зависимости (рис. 7) удельного прироста (потери массы) q от времени t : $q^n = Kt$ (K — константа скорости окисления), которая при построении в логарифмических координатах $\lg q - \lg t$ преобразуется в линейную зависимость

$$n \lg q = \lg K + \lg t \text{ или } \lg q = \frac{1}{n} (\lg K + \lg t).$$

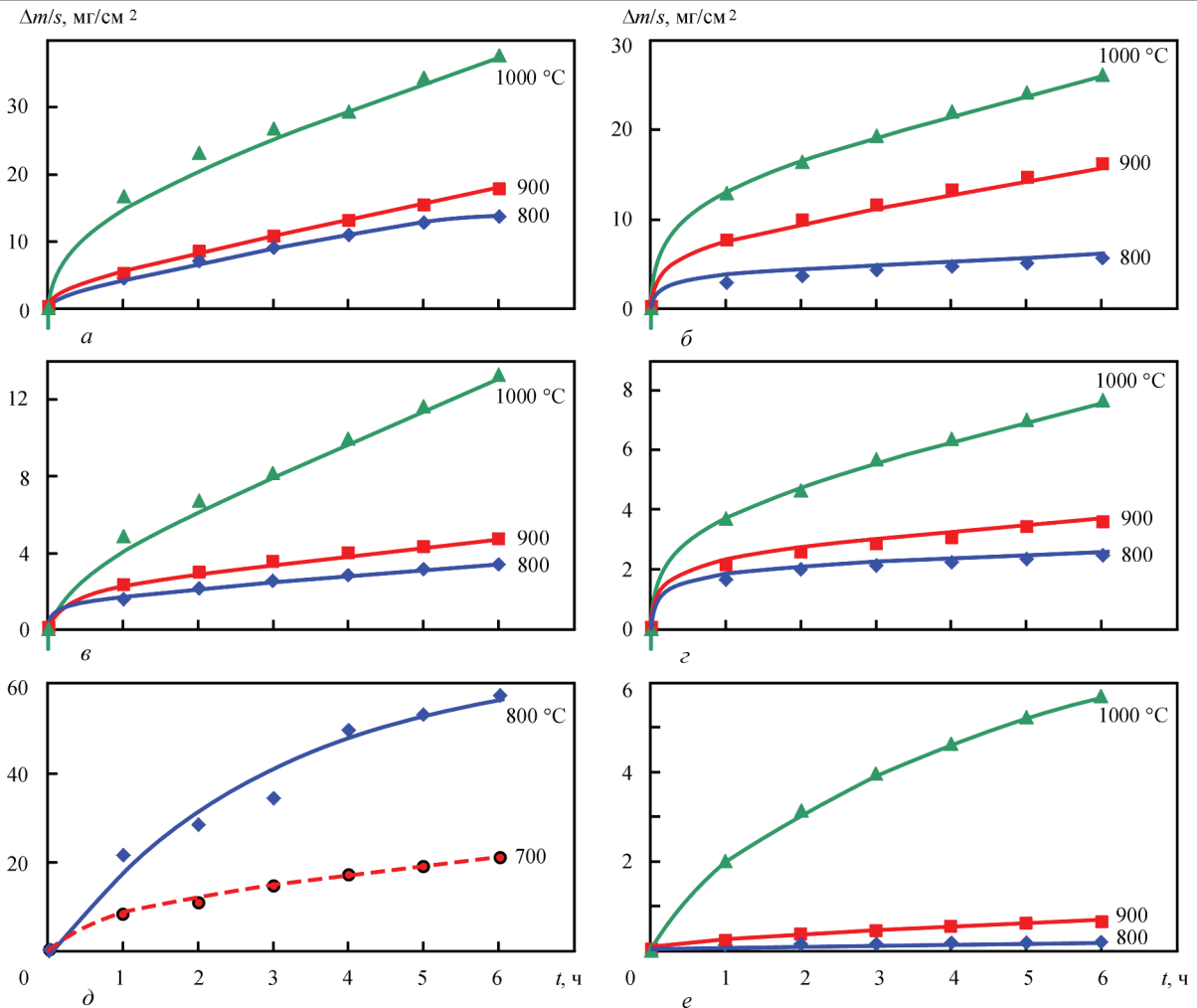


Рис. 7. Кинетические зависимости окисления газотермических покрытий и незащищенных сталей при температурах 800, 900 и 1000 °С на воздухе: а — ПН, б — ВСГПН, полученных из МХС-порошка FeAlCr+CeO₂ и в — АДМ, г — ЭДМ из ПП Fe+Al+Cr+CeO₂; д — сталь 45; е — сталь 08X17T

Отсюда $n = ctg\alpha$, в координатах время — $\Delta m/s$, мг/см², где α — угол наклона прямой к оси абсцисс, либо может быть рассчитан по формуле:

$$n = \lg \frac{t_2}{t_1} / \lg \frac{q_2}{q_1}, \quad (1)$$

где q_1 и q_2 (г/см²) — удельное увеличение (потеря) массы покрытия за время окисления, равное t_1 и t_2 соответственно. Точность расчета показателя степени n по формуле (1) тем выше, чем дальше отстоят друг от друга значения t_1 и t_2 .

Энергию активации Q процесса окисления определяют, используя температурную зависимость $K = K_0 \exp(-Q/RT)$ через тангенс угла φ , образуемый прямой после логарифмирования: $\lg K = \lg K_0 - lge$.

Энергию активации можно рассчитать также по формуле:

$$Q = \frac{n \lg(q_2 / q_1) R}{\lg e \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (2)$$

где e — основание натуральных логарифмов; R — универсальная газовая постоянная; q_1 и q_2 — удельное увеличение (потеря) массы при температурах T_1 и T_2 соответственно.

Как и при расчете величины n в этом случае рекомендуется выбирать значения T_1 и T_2 , достаточно далеко отстоящие друг от друга.

Величина параметра жаростойкости определяется исходя из величины энергии активации процесса окисления покрытия, рассчитанной по формулам (1) и (2), а также используя результаты испытаний, проведенных для получения зависимостей $\lg q - \lg t$ и $\lg q - 1/T$:

$$P = \frac{Q \lg e}{RT} - \lg t. \quad (3)$$

Результаты расчета параметра жаростойкости на примере ЭДМ-покрытия из порошковой проволоки Fe+Al+Cr+CeO₂ приведены в табл. 2, параметрические диаграммы — на рис. 8.

Таблица 2. Результаты расчета параметров жаростойкости ЭДМ покрытий

Температура, К	$10^3/T, 1/K$	Время окисления, ч	lgt	Удельный прирост массы, мг/см ²	lgq	$(Qlge)/RT$	Параметр жаростойкости P
1074	0,932	1	0	1,646	0,216	8,53	8,53
		2	0,301	1,964	0,293		8,2
		3	0,477	2,063	0,314		8,05
		4	0,602	2,178	0,338		7,9
		5	0,699	2,292	0,360		7,8
		6	0,778	2,397	0,379		7,75
1173	0,852	1	0	2,078	0,318	7,8	7,8
		2	0,301	2,492	0,396		7,5
		3	0,477	2,805	0,448		7,3
		4	0,602	3,038	0,482		7,2
		5	0,699	3,404	0,530		7,1
		6	0,778	3,511	0,545		7,02
1273	0,785	1	0	3,718	0,570	7,2	7,2
		2	0,301	4,671	0,670		6,88
		3	0,477	5,748	0,760		6,71
		4	0,602	6,424	0,810		6,58
		5	0,699	7,058	0,848		6,49
		6	0,778	7,672	0,885		6,41

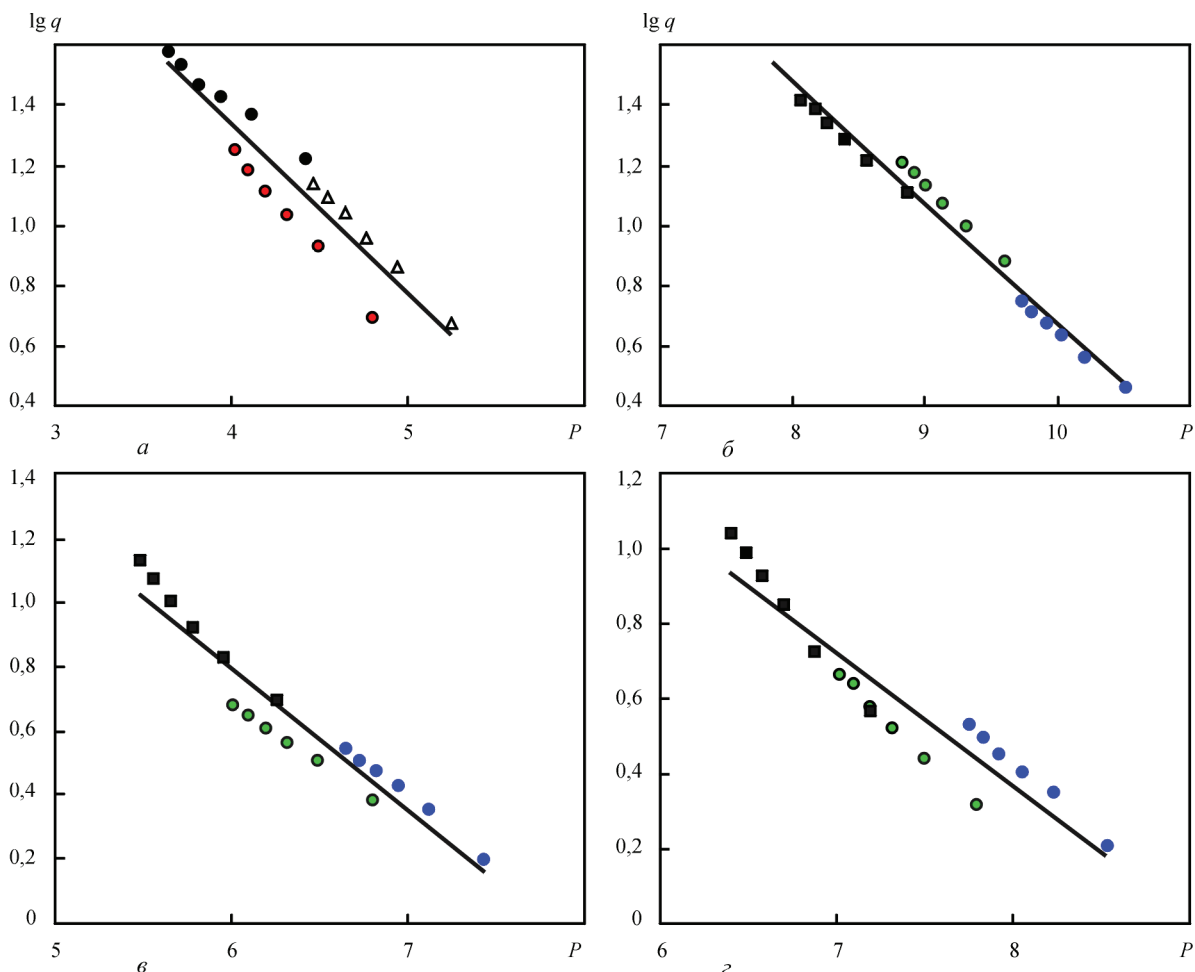


Рис. 8. Параметрические диаграммы жаростойкости для ПН (а) и ВСГПН (б) ЭДМ (в) и АДМ (г) по результатам испытаний на жаростойкость при температурах 800...1000 °С в течение 1...6 ч

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что газотермические покрытия из КП FeAlCr+CeO₂ и ПП Fe+Al+Cr+CeO₂ могут защи-

щать от окисления сталь 45, однако в разной степени в зависимости от метода нанесения.

Так, при температуре 800 °С стойкость ПН-покрытий превосходит сталь 45 более чем в 1,6 раза, ВСГПН-покрытие — в 12,5 раза, АДМ и ЭДМ-

покрытия соответственно в 23 и 26 раз. АДМ и ЭДМ-покрытия сохраняют устойчивость в окислительной среде на уровне нержавеющей стали 08X17T практически до 1000 °С. Это позволяет рекомендовать замену стали 08X17T на более дешевую сталь 45 с АДМ или ЭДМ-покрытием из ПП Fe+Al+Cr+CeO₂ для нанесения на внешние вторичные излучатели рекуператоров.

Примечание

Статья подготовлена на основе результатов выполнения проекта Программы «Ресурс-2» Р5.1.2 «Повышение долговечности работы рекуперативных теплообменников путем нанесения жаростойких излучающих покрытий для защиты поверхностей нагрева, которые работают в потоке продуктов сгорания топлива, и совершенствования конструкций внутренних вторичных излучателей».

Список литературы/References

1. Deevi S.C., Sikka V.K. (1996) Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*, 4, 5, 357–375.
2. Kai W., Lee S.H., Chiang D.L., Chu J.P. (1998) The high-temperature corrosion of Fe–28Al and Fe–18Al–10Nb in a H₂/H₂S/H₂O gas mixture. *Materials Sci. and Eng. A.*, 8, 1–2, 146–152.
3. Wei S., Xu B., Wang H. et al. (2007) High-temperature corrosion-resistance performance of electro-thermal explosion plasma spraying FeAl-base coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201, 5, 6768–6771.

4. Tortorelli P.F., Natesan K. (1998) Critical factors affecting the high-temperature corrosion performance of iron aluminides. *Materials Sci. and Eng. A*, 8, 1–2, 115–125.
5. Игнатов Д.В., Лазарев Э.М., Абрамова Н.В. (1974) Влияние редкоземельных металлов на кинетику и механизм окисления сплавов на никельхромовой основе. *Влияние физико-химической среды на жаропрочность металлических материалов*. Москва, Наука, сс. 68–72.
- Ignatov, D.V., Lazarev, E.M., Abramova, N.V. (1974) Effect of rare-earth metals on kinetics and oxidation mechanism of nickel-chromium-based alloys. *Influence of physicochemical medium on high-temperature resistance of metallic materials*. Moscow, Nauka, 68–72 [in Russian].
6. Nagai H., Takebayashi Y., Mitani H. (1981) Effect of dispersed oxides of rare earths and other reactive elements on the high temperature oxidation resistance of Fe–20Cr alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 12, 3, 435–442.
7. Xingwei M., Zhuji J., Shi Y., JiuJun X. (2009) Effect of La₂O₃ on microstructure and high-temperature wear property of hot-press sintering FeAl intermetallic compound. *Journal of Rare Earths*, 27, 6, 1031–1036.
8. Wang Y., Yan M. (2006) The effect of CeO₂ on the erosion and abrasive wear of thermal sprayed FeAl intermetallic alloy coatings. *Wear*, 8, 1201–1207.
9. Xiao Ch., Chen W. (2006) Sulfidation resistance of CeO₂-modified HVOF sprayed FeAl coatings at 700 °C. *Surface and Coatings Technology*, 8, 3625–3632.
10. Magnee A., Offergeld M., Leroy A. Lefort A. (1998) FeAl intermetallic coatings applications to thermal energy conversion advanced systems. *Proc. of the 15th ITSC*, France, Nice, pp.1091–1096.
11. Никитин В.И. (1976) *Расчет жаростойкости металлов*. Москва, Металлургия.
- Nikitin, V.I. (1976) *Calculation of heat resistance of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
12. Никитин В.И. (1981) Метод прогнозирования долговечности защитных покрытий. *Физ.-хим. механика материалов*, 3, 95–99.
- Nikitin, V.I. (1981) Method of prediction of life of protective coatings. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialov*, 3, 95–99 [in Russian].

ЖАРОСТІЙКІ ГАЗОТЕРМІЧНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДА FeAlCr З ДОБАВКОЮ CeO₂

Ю.С. Борисов¹, А.Л. Борисова¹, Т.В. Цимбаліста¹, Н.І. Капорик¹, М.А. Васильковська²

¹ІЗЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: borisov@paton.kiev.ua

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича НАН України, 03680, м. Київ, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: navas@ukr.net

Представлені результати дослідження жаростійкості покриттів, отриманих методами плазмового (ПН) і високошвидкісного газопламенного (ВСГПН) напилення з використанням композиційного порошку на основі FeAlCr з додаванням 2 мас. % CeO₂, а також методами електродугової (ЕДМ) і активованої дуговою металізацією (АДМ) із застосуванням порошкового дроту 98(82Fe+16Al+2Cr)+2CeO₂ (мас. %). Композиційний порошок був виготовлений методом механохімічного синтезу (МХС) шляхом обробки суміші порошків компонентів в планетарній млині. Випробування на жаростійкість проводили в середовищі повітря при 800, 900 і 1000 °С протягом 7 г ваговим методом. Структура покриттів після випробування на жаростійкість досліджена з застосуванням металографічного і рентгеноструктурного аналізу (РСФА). Встановлено, що в процесі випробувань у покриттів, отриманих методами ПН і ВСГПН, спостерігається явище відшарування, тоді як покриття, отримані методами ЕДМ і АДМ, зберігають щільний зв'язок з основою. Отримані кінетичні криві жаростійкості показали, що у всьому часовому інтервалі випробувань при 800...1000 °С механізм окислення підпорядковується параболічного закону. З використання даних кінетичних залежностей були побудовані параметричні діаграми жаростійкості, що дозволяють здійснювати оцінку довговічності досліджених захисних покриттів в діапазоні температур 800...1000 °С. Найбільш високу жаростійкість мають покриття FeAlCrCeO₂, отримані з порошкового дроту методами ЕДМ і АДМ, які при 1000 °С перевищують стійкість сталі 45 в 23...26 разів, і відповідають жаростійкості сталі 08X17T. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 8

Ключові слова: газотермічне напилення, електродугова металізація, покриття інтерметаліди залізо-алюміній, механохімічний синтез, композиційний порошок, порошковий дріт, параметрична діаграма жаростійкості, система FeAlCr–CeO₂

HEAT-RESISTANT THERMAL COATINGS BASED ON FeAlCr INTERMETALLICS WITH CeO₂ ADDITIVES

Yu.S. Borisov¹, A.L. Borisova¹, T.V. Tsymbalista¹, N.I. Kaporik¹, M.A. Vasilkovskaya²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Frantsevich Institute for Problems of Material Science, 3 Krzhizhanovskogo Str, 03680, Kyiv, Ukraine.

E-mail: kiparis-gpk@ukr.net

The paper presents the results of studying the heat resistance of coatings, produced by the methods of plasma (PS) and high-speed flame spraying (HSFS), using composite powder based on FeAlCr with addition of 2 wt.% CeO₂, as well as by the methods of arc spraying (AS) and activated arc spraying (AAS) with application of flux-cored wire of the following composition 98(82Fe+16Al+2Cr)+2CeO₂ (wt.%). Composite powder was prepared by the method of mechano-chemical synthesis (MChS) by treating a mixture of powder components in a planetary-type mill. Heat-resistance testing was performed in air at 800, 900 and 1000 °C for 7 hours by weight method. Coating structure after heat-resistance testing was studied with application of metallographic and X-ray structural analysis (RSPhA). It is found that during testing of coatings produced by PS and HSFS methods the delamination phenomenon is observed, whereas coatings produced by AS and AAS methods preserve a tight bond with the base. Obtained kinetic curves of high-temperature resistance showed that in the entire time interval of testing at 800 – 1000 °C the oxidation mechanism follows the parabolic law. The data of kinetic dependencies were used to plot the parametric heat resistance diagrams, allowing evaluation of fatigue life of the studied protective coatings in the temperature range of 800 – 1000 °C. The highest heat resistance is found in FeAlCrCeO₂ coatings produced by AS and AAS methods from flux-cored wire. At 1000 °C it exceeds the resistance of steel 45 23-26 times, and corresponds to heat resistance of 08Kh17T steel. 12 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: flame spraying, arc spraying, iron-aluminium intermetallics, mechano-chemical synthesis, composite powder, flux-cored wire, parametric heat-resistance diagram, FeAlCr-CeO₂ system

Поступила в редакцию 12.06.2019

ВЕДУЩАЯ ВЫСТАВКА В МИРЕ
СВАРКА • РЕЗКА • ОБРАБОТКА

LET'S JOIN
THE WORLD!

13.–17. сентября 2021

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ
СЕЙЧАС!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1 IN THE WORLD