

УДК 621.9.025.7

Жаростійкість електроіскрових покриттів зі сплавів системи Ni – Cr – Al – Y

О. В. Паустовський, кандидат технічних наук
Р. А. Алфінцева, кандидат технічних наук
Ю. В. Губін, Т. В. Курінна, В. С. Терещенко

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, Київ

Досліджена жаростійкість сталі 45, сплавів системи Ni – Cr – Al – Y та електроіскрових покриттів цих сплавів на сталі 45 при 900 °C і витримці 20 годин на повітрі. Показано, що жаростійкість сплавів Ni – Cr, Ni – Cr – Al та Ni – Cr – Al – Y на два порядки більша жаростійкості сталі 45, а жаростійкість сталі з покриттями на порядок більша порівняно з жаростійкістю сталі 45 (збільшення маси зразка сталі досягає 90 мг/см², сталі з покриттями Ni – Cr – Al – Y 2,0 – 2,5 мг/см²).*

З розвитком аерокосмічної, авіаційної, суднобудівної, енергомашинобудівної і металообробної техніки виникла необхідність у створенні нових матеріалів з більш високими параметрами жароміцності і жаростійкості.

Усі жаростійкі покриття незалежно від методу їх нанесення і умов експлуатації повинні бути надійним буфером проти дифузії агресивних компонентів, мати міцне зчеплення з підкладкою і високі механічні властивості. В якості основних елементів для жаростійких покриттів використовуються в основному нікель, хром, алюміній, кремній.

В даний час розроблені технологічні методи нанесення покриттів, кожен з яких має свої оптимальні області використання. До цих методів відноситься метод електроіскрового легування (ЕІЛ), який забезпечує високі значення міцності зчеплення, можливість зміцнення тугоплавкими металами та з'єднаннями, низьку енергоємність, простоту технологічної операції.

В останній час з'явилися роботи, присвячені жаростійким захисним покриттям із сплавів системи Ni – Cr – Al – Y.

В залежності від вмісту хрому та алюмінію ці сплави використовували в якості жароміцних матеріалів (по масі) (Cr < 12 %, Al < 2,5 %) [1 – 4], для покриттів, які наносять газотермічними методами (Cr < 17 – 22 %, Al < 5 – 10 %) [5 – 8], а також для електронноструменевих покриттів (Cr < 20 – 22 %, Al < 11 – 13 %) [9].

В Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України розроблені сплави системи Ni – Al, Ni – Cr – Al, Ni – Cr – Al – Y і Ni – Cr – NiAl, призначені для електроіскрового легування. Їх фазовий склад знаходиться в області подвійної або потрійної евтектики, яка

*Робота виконана при підтримці Міністерства освіти і науки України, грант М/113-2014

складається з твердих розчинів на основі нікелю, хрому та інтерметаліду NiAl. Було визначено оптимальний склад елементів, який одночасно забезпечує високу зносостійкість і жаростійкість (39 – 41 % Cr і 9 – 11 % Al, 52 – 44 % Ni).

В роботах [10 – 15] вивчені структура і фізико-механічні властивості розроблених сплавів, а також електроіскрових покриттів з них на конструкційних сталях та сплавах титану. Показано, що сформовані покриття мають високу твердість, зносостійкість в умовах сухого тертя ковзання, яка перевищує зносостійкість конструкційних сталей у 2 – 4 рази і сплавів титану у 3 – 4 рази.

Мета даної роботи – дослідження жаростійкості сталі 45 з електроіскровими покриттями сплавами системи Ni – Cr – Al – Y. В якості електродів для електроіскрового легування були взяті сплави Ni – Cr, Ni – Cr – Al, Ni – Cr – Al – Y, які одержані методами гарячого пресування і лиття. Хімічний склад одержаних сплавів приведено в таблиці.

Хімічний склад Ni – Cr – Al – Y сплавів, досліджених на жаростійкість

Сплав	% (по масі)	% (ат.)	% (об.)
1А	Ni – 50,5	Ni – 47,5	Ni – 45,2
	Cr – 49,5	Cr – 52,5	Cr – 54,8
4А	Ni – 50,0	Ni – 43,2	Ni – 38,3
	Cr – 41,0	Cr – 39,0	Cr – 38,9
	Al – 9,0	Al – 16,9	Al – 22,8
5А	Ni – 42,0	Ni – 33,0	Ni – 27,4
	Cr – 39,0	Cr – 34,0	Cr – 31,6
	Al – 19,0	Al – 32,5	Al – 41,0
6А	Ni – 49,3	Ni – 42,4	Ni – 37,5
	Cr – 39,2	Cr – 38,6	Cr – 38,1
	Al – 9,5	Al – 17,9	Al – 23,0
	Y – 2,0	Y – 1,1	Y – 1,4

Гарячепресовані сплави були одержані за технологією, розробленою в ІПМ НАН України (подрібнення та змішування порошків нікелю, хрому і алюмінію з наступним гарячим пресуванням) [11]. Мікроструктура гарячепресованих сплавів являє собою суміш фазових складових з твердих розчинів α , γ і β на основі хрому, нікелю та інтерметаліду NiAl відповідно. В сплаві 6А додатково виявлені інтерметалідні фази, які містять ітрій [12].

Видавку сплавів Ni – Cr – Al – Y проводили в електродуговій печі з вольфрамовим електродом у середовищі високо очищеного аргону. Литі сплави мають евтектичну структуру: в сплаві 1А евтектика ($\alpha + \gamma$) суміш твердих розчинів на основі хрому і нікелю, в сплаві 5А евтектика ($\alpha + \beta$) (β -твердий розчин на основі інтерметаліду NiAl). Сплави 4А и 6А мають структуру трифазної евтектики з твердих розчинів ($\alpha + \gamma + \beta$) на основі хрому, нікелю та інтерметаліду NiAl [13].

Зіставлення гарячепресованих і литих сплавів показало, що структура гарячепресованих сплавів складається з рівномірно розташованих фаз на основі хрому, нікелю та інтерметаліду NiAl, які в 5 – 10 разів менше розмірів фаз в литих зразках.

Електроіскрове легування зразків сталі 45 кубічної форми 1x1x1 см здійснювали на установці ЭФИ-46А на III режимі (частота коливань вібратора – 100 Гц, сила струму короткого замикання $I_{к.з.} = 4$ А, робочий струм $I_p = 1,5$ А, тривалість нанесення кожної грані – 10 хв, енергія, яка виділяється при одному іскровому розряді $E = 0,28$ Дж, що в результаті давало товщину покриттів 600 – 700 мкм.

Мікроструктурні, рентгенофазові та мікрорентгеноспектральні дослідження показали, що електроіскрові покриття зі сплаву 1А на сталі 45 складаються в основному з твердих розчинів нікелю, хрому, заліза і карбиду FeC. При легуванні сплавом 4А (литим та гарячепресованим) в покритті додатково виявлені інтерметаліди NiAl і Ni₃Al, а також окис NiO·3Al₂O₃. В покритті зі сплаву 5А виявлені в основному фази твердого розчину на основі хрому і інтерметаліди NiAl. В електроіскровому покритті зі сплаву 6А виявлені додатково інтерметаліди Al₃Y, AlNiY.

Електронномікроскопічні дослідження ЕІ покриттів литих та гарячепресованих сплавів при 3000 кратному збільшенні показали, що структура їх складається з твердих розчинів на основі нікелю, хрому, заліза, а також інтерметалідних фаз, які включають алюміній та ітрій [14, 15].

Жаростійкість зразків вихідних сплавів, а також сталі 45 з ЕІ покриттями досліджували при 900 °С на повітрі, вагу зразків визначали через проміжки 2, 4, 5, 10, 15 і 20 годин витримки.

Кінетичні криві окислення литих та гарячепресованих сплавів 1А, 4А, 5А, 6А наведені на рис. 1 – 4. На рис. 5 приведена кінетична крива окислення сталі 45. Збільшення маси зразків протягом витримки залежить від їх фазового складу. Максимальне збільшення (1,27 мг) спостерігається в литому сплаві 1А. В сплаві 4А збільшення маси зразків зменшується до 0,36 мг/см². Найменший приріст маси (0,24 мг/см²) спостерігається в литому сплаві 6А за рахунок присутності інтерметалідних фаз з ітрієм, які характеризуються більш високою жаростійкістю.

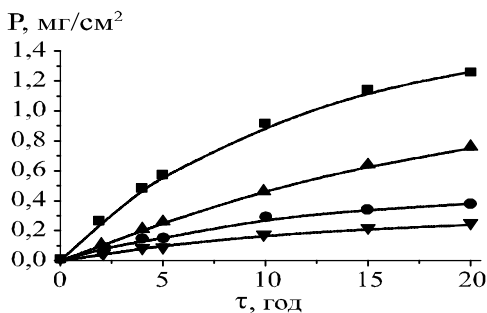


Рис. 1. Кінетика окислення литих сплавів Ni – Cr – Al при 900 °С. Сплави: —■— 1А, —●— 4А, —▲— 5А, —▼— 6А.

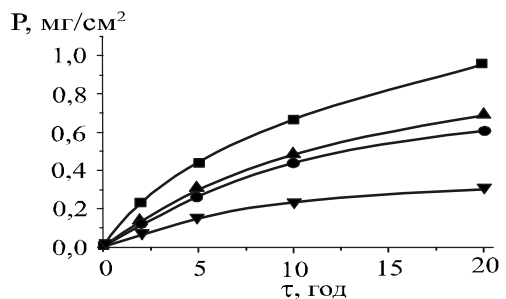


Рис. 2. Кінетика окислення гарячепресованих сплавів системи Ni – Cr – Al при 900 °С. Сплави: —■— 1А, —●— 4А, —▲— 5А, —▼— 6А.

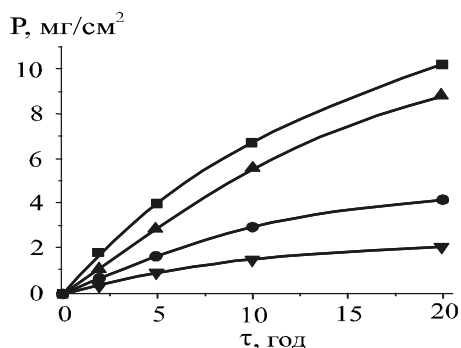


Рис. 3. Кінетика окислення електроіскрових покриттів з литих сплавів системи Ni – Cr – Al при 900 °С. Сплави: —■— 1А, —●— 4А, —▲— 5А, —▼— 6А.

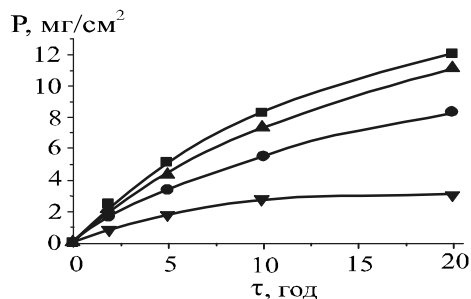


Рис. 4. Кінетика окислення електроіскрових покриттів з гарячепресованих сплавів системи Ni – Cr – Al при 900 °С. Сплави: —■— 1А, —●— 4А, —▲— 5А, —▼— 6А.

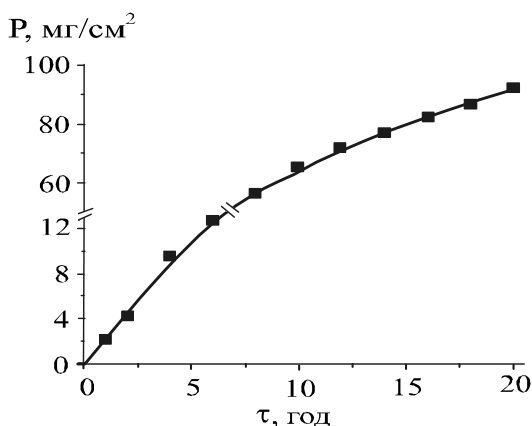


Рис. 5. Кінетика окислення сталі 45 при 900 °С.

Жаростійкість сплаву 5А вище за жаростійкість сплаву 1А за рахунок більш високої жаростійкості інтерметалідної фази в сплаві 5А порівняно з γ -твердим розчином на основі нікелю ($0,75 \text{ мг/см}^2$).

Жаростійкість гарячепресованих сплавів 1А вища за жаростійкість литих сплавів ($0,9 \text{ мг/см}^2$), що пов'язано з особливістю структурного стану після гарячого пресування.

Рівномірність розподілу фаз в покритті призводить до

підвищення жаростійкості при однаковому елементному складі сплавів [16, 17]. Зіставлення жаростійкості сталі 45 з ЕІ покриттями, одержаними методами лиття та гарячого пресування показали наступне: приріст маси сталі з ЕІ покриттями з литих сплавів досягає значень 10,20, 3,80, 8,6 та $2,0 \text{ г/см}^2$, з гарячепресованих – 11,80, 7,80, 10,6 та $2,8 \text{ г/см}^2$ для сплавів 1А, 4А, 5А і 6А відповідно.

Приріст маси зразків сталі 45 з покриттями більше, ніж приріст маси компактних електродів в 5 – 10 разів, однак це в 5 – 10 разів менше, ніж приріст маси зразків сталі без покриття (рис. 5).

Найбільше підвищення жаростійкості сталі 45 спостерігається при легуванні її сплавом 6А ($2,0$ та $2,8 \text{ мг/см}^2$ відповідно) для литого та гарячепресованого покриття.

Висновки Жаростійкість розроблених сплавів системи Ni – Cr – Al – Y при 900 °С вища за жаростійкість сталі 45 на два порядки (збільшення для сталі 45 складає 90 мг/см^2 , для сплаву 1А – $1,2 \text{ мг/см}^2$, для сплаву 6А –

0,2 мг/см²). Жаростійкість сталі 45 з покриттями зі сплавів системи Ni – Cr – Al – Y при 900 °С збільшується на порядок (для сталі з E1 покриттям 1A – 10 мг/см², для сталі з E1 покриттям 6A – 2,5 мг/см²).

Література

1. Корнилов И.И. Физико-химические основы жаропрочности сплавов. – М.: АН СССР, 1961. – 516 с.
2. Гецов Л.Б. Жаростойкость материалов лопаток газовых турбин // Энергомашиностроение – 1978. – 2. – С. 29 – 33.
3. Симс Ч. Жаропрочные сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
4. Банных О.А. Перспективы создания жаропрочных и жаростойких сплавов и интерметаллических соединений. Новые металлические материалы. – Киев: ИЭС АН УССР, 1980. – С. 187 – 192.
5. Алфинцева Р.А. Исследование влияния редкоземельных элементов на жаростойкость защитных покрытий. Жаростойкие неорганические покрытия. – Ленинград: Наука, 1990. – С. 189 – 191.
6. Алфинцева Р.А. Новые композиционные порошковые материалы для газотермического нанесения жаростойких и износостойких покрытий. Сб. трудов семинара ЕЭК ООН “Новые материалы и их применение в машиностроении”. – С. 27 – 28.
7. Алфинцева Р.А. Основные физико-механические свойства износо- и жаростойких газотермических покрытий из материалов на основе никрома // Порошковая металлургия. – 1997. – № 1/2. – С. 123 – 126.
8. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов. – Киев: Наук. думка, 1987. – 544 с.
9. Мовчан Б.А. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев: Наук. думка, 1983. – 231 с.
10. Паустовский А.В. Формирование электроискровых покрытий из эвтектического сплава Ni – Cr – Al – Y // ФХММ. – 2003. – № 3. – С. 93 – 96.
11. Алфинцева Р.А. Свойства сплавов Ni – Cr – Al, полученных методом порошковой металлургии // Порошковая металлургия. – 2003. – № 3/4. – С. 35 – 44.
12. Паустовский А.В. Закономерности формирования электроискровых покрытий из сплавов системы Ni – Cr – Al – Y // Там же. – 2004. – № 5/6. – С. 39 – 47.
13. Паустовский А.В. Зависимость свойств электроискровых покрытий Ni – Cr – Al – Y от технологии изготовления электродов // Техника машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 71 – 74.
14. Паустовский А.В. Свойства электроискровых покрытий Ni – Cr – Al – Y // Порошковая металлургия. – 2009. – № 7/8. – С. 79 – 86.
15. Паустовский А.В. Исследование кинетики массопереноса при электроискровом легировании стали 45 электродами Ni – Cr – NiAl // Перспективные материалы. – 2009. – № 1. – С. 86 – 90.
16. Таран Ю.Н. Структура эвтектических сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 312 с.
17. Банных О.А. Жаропрочные и жаростойкие материалы. – М.: Наука, 1987. – 173 с.

Одержано 21.07.15

А. В. Паустовский, Р. А. Алфинцева, Ю. В. Губин, Т. В. Куринная, В. С. Терещенко
**Жаростойкость электроискровых покрытий из сплавов
системы Ni – Cr – Al – Y**

Резюме

Исследована жаростойкость стали 45, сплавов системы Ni – Cr – Al – Y и электроискровых покрытий из этих сплавов на стали 45 при 900 °С и выдержке 20 часов на воздухе. Показано, что жаростойкость сплавов Ni – Cr, Ni – Cr – Al и Ni – Cr – Al – Y на два порядка больше жаростойкости стали 45, а жаростойкость стали с покрытиями на порядок больше в сравнении с жаростойкостью стали 45 (увеличение массы образца стали достигает 90 мг/см², стали с покрытиями Ni – Cr – Al – Y 2,0 – 2,5 мг/см²).

А. В. Paustovskiy, R. A. Alfintseva, Yu. V. Gubin, T. V. Kurinnaya, V. S. Tereschenko
Heat-resistance of spark coatings Ni – Cr – Al – Y alloys system

Summary

The heat resistance of 45 steel, alloys of Ni – Cr – Al – Y and electric-spark coatings of these alloys on steel 45 at 900 °C and holding for 20 hours in air is investigated. It is shown that the heat resistance of Ni – Cr alloy and Ni – Cr – Al – Y alloys is in two degree higher than resistant of steels 45, and the heat resistance of coated steel is one order higher in comparison with the heat-resistant of steel 45 (increasing weight of steel sample reaches 90 mg/cm², steel with Ni – Cr – Al – Y coating reaches 2,0 – 2,5 mg/cm²).

УДК 669.018.95:539.4.015:665.3:621.762.5

*Структура та властивості розпилених
порошків евтектичного сплаву $V_4C - TiB_2$*

П. І. Лобода, доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України

Ю. І. Богомол, кандидат технічних наук

О. І. Білій*, кандидат технічних наук

Національний технічний університет України «КПІ», Київ

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Методом відцентрового плазмового розпилення пресовок, сформованих із суміші порошків карбіду бору і дибориду титану, був одержаний порошок евтектичного сплаву системи $V_4C - TiB_2$ з розмірами частинок 100 – 500 мкм, мікроструктура якого представляє собою матрицю з V_4C , армовану волокнистими і пластинчастими включеннями TiB_2 . Така мікроструктура дозволяє реалізувати на рівні окремо взятих частинок механізми зміцнення типові для спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів. Дослідження технологічних і механічних властивостей одержаного порошку евтектичного сплаву системи $V_4C - TiB_2$ показали перспективність його використання в якості абразивного матеріалу, а також для газотермічного напilenня зносостійких покриттів.

Матеріали з використанням карбіду бору все ширше застосовуються у промисловості завдяки унікальному комплексу фізико-механічних