

УДК 621.9.048.669.268

**А. В. Паустовский, Р. А. Алфинцева, Т. В. Куринная,
Н. М. Мордовец, В. Е. Шелудько, В. С. Терещенко,
Ю. В. Губин**

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ЛИТЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ni-Cr-Al, ЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ, ТИТАНОМ, КОБАЛЬТОМ И МАРГАНЦЕМ*

Исследованы структура, фазовый состав и микротвердость литых сплавов и электроискровых (ЭИ) покрытий системы Ni-Cr-Al, легированных кремнием, титаном, кобальтом и марганцем. Показано, что в них наблюдается трехфазная эвтектическая структура; кремний и титан повышают микротвердость, кобальт и марганец мало влияют на ее значение. Исследованы коэффициенты массопереноса при ЭИ легировании стали 45, показано, что максимальное его значение (0,75) наблюдается при легировании кобальтом. Исследованы микротвердость, износостойкость, а также жаростойкость ЭИ покрытий на стали 45. Установлено, что легирование кремнием и титаном повышает износостойкость и жаростойкость покрытий.

Ключевые слова: покрытие, электроискровое легирование, микротвердость, износостойкость, жаростойкость.

Досліджено структуру, фазовий склад та микротвердість литих сплавів та електроіскрових (ЕІ) покриттів системи Ni-Cr-Al легуваних кремнієм, титаном, кобальтом та марганцем. Показано, що в них спостерігається трьохфазна евтектична структура; кремній та титан підвищують микротвердість, кобальт та марганець мало впливають на її значення. Досліджено коефіцієнти масопереносу при ЕІ-легуванні сталі 45, показано, що максимальне його значення (0,75) спостерігається при легуванні кобальтом. Досліджено микротвердість, зносостійкість, а також жаростійкість ЕІ-покриттів на сталі 45. Встановлено, що легування кремнієм та титаном підвищує зносостійкість і жаростійкість покриттів.

Ключові слова: покриття, електроіскрове легування, микротвердість, зносостійкість, жаростійкість.

Investigated the article are the structure, phase composition and microhardness of cast alloys and ES-coatings of system Ni-Cr-Al doped by Si, Ti, Co and Mn. It is shown that three-phase eutectic structure is observed in them; Si and Ti raise microhardness, Co and Mn influence on its value slightly. Mass transfer factors are investigated at ES-alloying of Steel 45 and is shown that its maximum value (0,75) is observed when alloying Co. Investigated here are microhardness, wear- and heat-resistance of ES-coatings on the Steel 45. Doping by Si and Ti is determined to raise wear- and heat-resistance of the coatings.

Keywords: coating, electric spark alloying, microhardness, wear-resistance, heat-resistance

*Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины, грант 41.2/017

При исчерпании ресурсов прочности материалов используют разные технологии упрочнения и восстановления рабочих поверхностей, вследствие чего увеличивается ресурс работы основного материала. В этом случае наиболее эффективным является метод электроискрового легирования (ЭИЛ) компактным электродом. При выборе материала электрода учитываются два основных фактора: его химический состав, определяющий функциональное назначение покрытия, а также структурное состояние, зависящее от технологии изготовления электрода.

Основным принципом создания электродных материалов для износостойких покрытий является условие гетерогенности их структуры [1, 2]. Одним из вариантов такой структуры является наличие эвтектики, состоящей из твердых растворов на основе металлов с высокой растворимостью в подложке и фаз с высокой твердостью [3, 4].

Руководствуясь указанным принципом создания материалов для износостойких покрытий, в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины разработаны износостойкие сплавы из белых высокохромистых чугунов, легированных алюминием, которые использовались в качестве электродов для электроискрового легирования. Режимы ЭИ-легирования разработаны в Институте проблем материаловедения НАН Украины [5]. Было показано, что ЭИ-покрытия на стали 45 из чугуна доэвтектического состава, легированные 10% мас. Al, достигают толщины до 300 мкм и повышают при этом абразивную износостойкость стали 45 в 4 раза.

В Институте проблем материаловедения НАН Украины были разработаны электроискровые покрытия из сплавов Ni-Cr-Al, которые по фазовому составу и структуре находятся в области тройной эвтектики.

Проведенные исследования [6-8] показали, что ЭИ-покрытия повышают износостойкость конструкционных сталей в 2,0-2,5 раза, жаростойкость – в 5-7 раз, коэффициент массопереноса достигает 80-90 %. Был определен оптимальный состав компонентов в этом сплаве, в %мас. Ni – 50-50,5; Cr – 40-41; Al – 9,0-9,5. В дальнейшем этот сплав определен как 4А.

В данной работе исследованы структура, фазовый состав, износостойкость, а также жаростойкость ЭИ-покрытий из сплавов Ni-Cr-Al, легированных кремнием, титаном, кобальтом и марганцем.

При выборе легирующих элементов учитывалось, что элементы кремний и титан преимущественно образуют твердые растворы с замещением атомов алюминия в интерметаллиде NiAl. Легирующие добавки марганца и кобальта образуют твердые растворы замещения в α - и γ -твердых растворах на основе хрома и никеля.

Химический состав сплавов системы Ni-Cr-Al приведен в табл. 1.

Выплавку слитков массой 1 кг из указанных сплавов проводили в электропечи сопротивления в инертной атмосфере с использованием алундовых тиглей с последующим литьем в цилиндрические формы для получения образцов и электродов для ЭИЛ.

Таблица 1. Химический состав легированных сплавов на основе Ni-Cr-Al

Сплав	Содержание элементов, %мас.						
	Ni	Cr	Al	Si	Ti	Mn	Co
4А	50	41	9	-	-	-	-
4А Si	49	40	9	2	-	-	-
4А Ti	49	40	9	-	2	-	-
4А Mn	49	40	9	-	-	2	-
4А Co	48	38	9	-	-	-	4

Новые литые материалы

Для выплавки были использованы никель электролитический Н-0; хром рафинированный ЕРХ-0, чистотой 99,9 %; высокоочищенный алюминий 9,995. Кремний, титан, марганец и кобальт были взяты чистотой 99,9 %.

Данные по рентгенофазовому и микроструктурному исследованию литых сплавов совпадают с ранее проведенными в работах [6-8].

В литых сплавах наблюдается пластинчато-стержневая эвтектическая трехфазная структура, которая состоит из α -твердого раствора на основе хрома, γ -твердого раствора на основе никеля, а также β -твердого раствора на основе интерметаллида NiAl. Легирование сплава 4А добавками кремния, титана, марганца и кобальта практически не меняет морфологию эвтектики, которая наблюдается в базовом сплаве 4А (рис. 1)

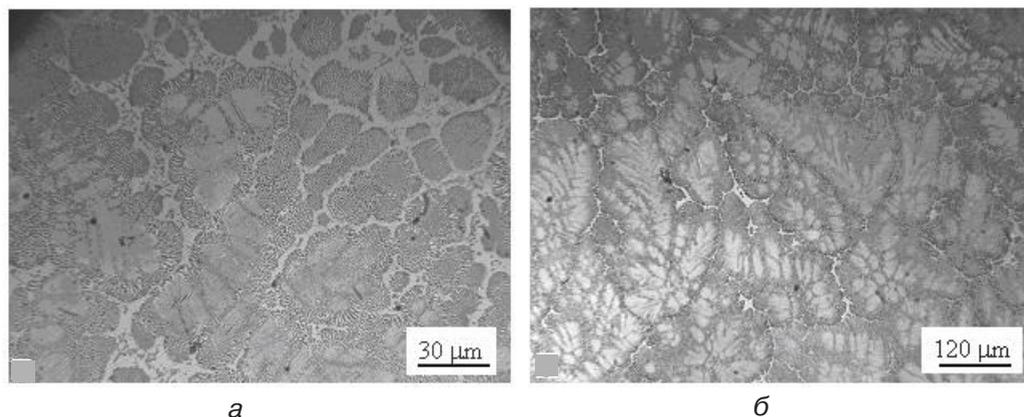


Рис. 1. Микроструктура литых сплавов: а – 4А, б – 4АСо

Микротвердость базового сплава Ni-Cr-Al составляет 7,5 ГПа. Добавки кремния и титана увеличивают микротвердость до 8,9 и 8,7 ГПа соответственно. Добавки марганца уменьшают твердость до 6,2 ГПа, а кобальта почти не влияют (7,4 ГПа) (табл. 2).

Электроискровое легирование сплавами 1-5 проводили на установке ЭФИ-46А на режиме 3: частота колебаний вибратора $\nu = 100$ Гц, сила тока короткого замыкания $I_{к.з} = 4$ А, рабочий ток $I_p = 1,5$ А, энергия, которая выделяется при единичном искровом разряде $E = 0,28$ Дж, время обработки 10 мин/см².

Кинетику ЭИЛ исследовали посредством определения следующих параметров: удельной эрозии анода Δa , удельного привеса катода Δk , измеренного за каждую минуту обработки 1 см² подложки. Коэффициент массопереноса определялся как среднее $k = \Delta k / \Delta a$ за 10 мин легирования. Значения микротвердости сплавов и ЭИ-покрытий из них, а также коэффициента массопереноса и толщины покрытий приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики ЭИ покрытий Ni-Cr-Al, легированных кремнием, титаном, марганцем и кобальтом

Сплав	Микротвердость, ГПа		Коэффициент массопереноса, к	Толщина ЭИ-покрытия, мм
	сплава	ЭИ-покрытия		
4А	7,5	9,8	0,62	0,292
4АSi	8,9	12,6	0,69	0,305
4АTi	8,7	11,3	0,57	0,235
4АMn	6,2	8,6	0,57	0,218
4АСо	7,4	9,3	0,75	0,380

Исследование микроструктуры (рис. 2) и микротвердости покрытий из сплавов (1-5) на подложке из стали 45 показало, что ее значения превышают микротвердость исходных сплавов. Это связано со структурными изменениями, происходящими в процессе легирования (образование метастабильных фаз с мелкокристаллической и аморфной структурой при высоких скоростях охлаждения).

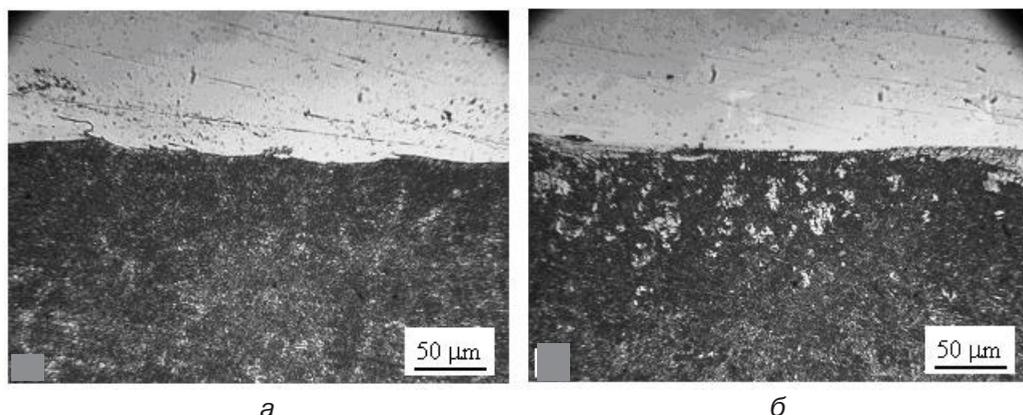


Рис. 2. Микроструктуры покрытий 4ATi (а) и 4AMn (б) на стали 45

Эффективность легирования каждого элемента определяли по значениям микротвердости и значениям коэффициента массопереноса, а также толщине покрытия, полученного при легировании 1 см² в течение 10 мин. Приведенные результаты свидетельствуют о преимуществе легирования эвтектических сплавов добавками кремния и кобальта.

Исследование характеристик трения защитных покрытий, полученных в режиме сухого трения на воздухе при комнатной температуре, проводили на машине трения МТ-68 при скорости скольжения $V = 10$ м/с и нагрузке 5 кг. Для исследования были использованы цилиндрические образцы диаметром 12 мм из стали 45, на торцы которых нанесены ЭИ-покрытия, контртелом служила термообработанная сталь 60Г. По ходу исследований фиксировали коэффициент трения (f) и интенсивность изнашивания образца I мкм/км.

Испытания полученных покрытий (табл. 3) показали, что значения износостойкости соответствуют значениям микротвердости покрытий. Износостойкость покрытий из сплавов 4ASi и 4ATi выше по сравнению с износостойкостью покрытий из сплавов 4A и 4AMn.

Жаростойкость покрытий при 900 °С на воздухе в течение 30 ч из разработанных сплавов исследовали методом измерения значений увеличения удельной массы образцов в виде кубиков из стали 45 размерами 10×10×10 мм с нанесенными ЭИ-покрытиями на каждую грань. Зависимость значений удельной массы образцов с покрытиями от времени окисления приведена на рис. 3.

Жаростойкость стали 45, легированной сплавами 4A, 4ASi, 4ATi, 4AMn, 4ACo, увеличивается в 2,8; 4; 4,3; 5,1; 4,6 раз соответственно.

Выводы

Структуры сплавов системы Ni-Cr-Al, легированных кремнием, титаном, марганцем и кобальтом состоят из тройной эвтектики, которая мало отличается

Таблица 3. Износостойкость покрытий на стали 45 из сплавов (1-5)

Покрытие	Толщина покрытия, мкм	I мкм, км	f
4A	360	24,3	0,34
4A Si	430	19,5	0,33
4A Ti	400	18,3	0,35
4A Mn	420	23,3	0,36
4A Co	500	18,9	0,31

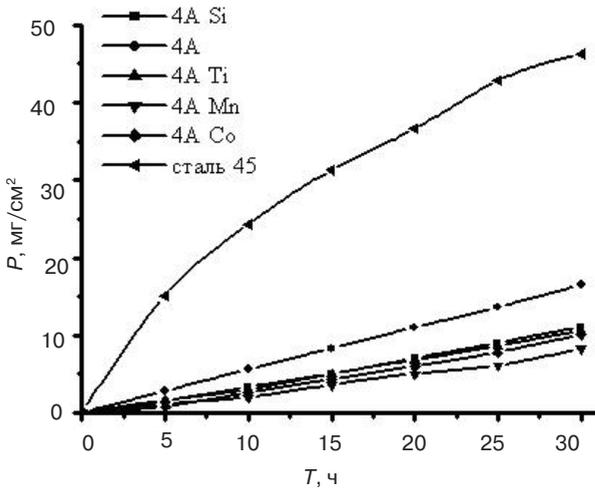


Рис. 3. Кинетические зависимости увеличения удельной массы образцов стали 45 с покрытиями от времени выдержки

от структуры базового сплава. Легирующие добавки кремния и титана, которые растворяются в интерметаллидной фазе, повышают ее микротвердость, а в целом и твердость легированного сплава. Соответственно к микротвердости изменяются и значения износостойкости. Износостойкость ЭИ-покрытий на стали 45 из литых сплавов 4ASi и 4ATi на 15-20 % выше износостойкости покрытий из сплава 4A. марганец и кобальт, которые растворяются в твердых растворах на основе никеля и хрома уменьшают или почти не изменяют твердость сплавов.

Легирующие добавки к разработанному сплавам по-разному влияют на коэффициенты массопереноса

при ЭИ-легировании стали 45. Наибольший коэффициент (0,75) наблюдается при ЭИ-легировании сплавом, содержащим добавку кобальта.

ЭИ-покрытия на стали 45 из сплавов Ni-Cr-Al, легированных кремнием, титаном, марганцем и кобальтом повышают жаростойкость в 2,8-5,1 раз.

Проведенные исследования показали перспективность сплавов Ni-Cr-Al, легированных кремнием, титаном, марганцем и кобальтом при применении их в качестве электродов для ЭИЛ конструкционных сталей.



Список литературы

1. Крагельский И. В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Киндрачук М. В., Душик Ю. А., Лучка М. В. Локальный характер напряженно-деформированного состояния композиционного материала, нагруженного силами трения // Порошковая металлургия. – 1994. – № 9/10. – С. 56-61.
3. Киндрачук М. В., Шурин А. К., Панарин В. Е. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения // Проблемы трения и изнашивания. – Киев: Техніка, 1981. – № 19. – С. 17-28.
4. Газотермические покрытия из порошковых материалов. / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко и др. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1987. – 543 с.
5. Свойства электроискровых покрытий из высокохромистых чугунов / А. В. Паустовский, Р. А. Алфинцева, В. С. Терещенко и др. // Процессы литья. – 2006. – № 4. – С. 95-99.
6. Свойства сплавов Ni-Cr-Al, полученных методом порошковой металлургии / Р. А. Алфинцева, Н. П. Бродниковский, А. В. Лаптев и др. // Порошковая металлургия. – 2003. – № 3/4. – С. 35-44.
7. Закономерности формирования электроискровых покрытий из сплавов системы Ni-Cr-Al-Y / А. В. Паустовский, Р. А. Алфинцева, Т. В. Куринная и др. // Порошковая металлургия. – 2004. – № 5/6. – С. 39-47.
8. Разработка электродных материалов для электроискрового упрочнения и восстановления изношенных поверхностей, структура и свойства покрытий / А. В. Паустовский, Ю. Г. Ткаченко, Р. А. Алфинцева и др. // ЭОМ. – 2011. – 47, № 2. – С. 30-36.

Поступила 20.03.2012