

Материаловедение и технологии материалов Material Science and Materials Engineering

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.9.048.4
doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-51-59

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Леонид Алексеевич Коневцов¹, Владимир Канчерович Хе^{2✉},
Евгений Давидович Ким³, Ксения Петровна Ерёмкина⁴

^{1, 2, 4} Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН; Хабаровск, Россия

³ Тихоокеанский государственный университет; Хабаровск, Россия

¹ konevts@yandex.ru ; 0000-0002-8820-6358

² khe@ngs.ru ; 0000-0001-7672-1013

³ jenva_1992g@mail.ru ; 0000-0002-0175-0503

⁴ bksemya_p@bk.ru ; 0000-0003-4782-4093

Аннотация

Цель исследования: получение и исследование металломатричных сплавов на основе интерметаллида NiAl с различной концентрацией Ni для формирования износостойких покрытий на стали 45.

Задачи, решению которых посвящена статья: получение электродных материалов на основе интерметаллида NiAl с различной концентрацией Ni и исследование их структуры; изучение массопереноса при ЭИЛ осаждении на сталь 45; исследование сравнительной износостойкости полученных покрытий.

Методы исследования: электродные сплавы получены методом жидкофазного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза; электроискровое легирование использовалось для создания износостойких покрытий; методом металлографического анализа изучена микроструктура полученных сплавов.

Новизна работы: впервые исследовалось влияние различных значений концентрации Ni на износостойкость NiAl электроискровых покрытий на стали 45.

Результаты исследования: микроструктура полученных сплавов состоит из легированных Cr и

Co зерен матрицы NiAl с различным соотношением Ni/Al, по границам которых расположены соединения всех компонентов сплава. При формировании покрытий методом ЭИЛ получены временные зависимости изменения эрозии анода, привеса катода и коэффициента массопереноса.

Выводы: выплавлены NiAl металломатричные сплавы с различной концентрацией Ni методом жидкофазного СВС при использовании шихты, состоящей из оксидов металлов и минеральных концентратов, содержащих вольфрам и цирконий; микроструктура полученных сплавов состоит из легированных Cr и Co зерен основы NiAl, по границам которой сконцентрированы соединения всех составляющих компонентов сплава, включая Zr и W; при формировании покрытий полученными сплавами с использованием ЭИЛ получены экспериментальные результаты эрозии анода, привеса катода, коэффициента массопереноса, при испытаниях на износостойкость установлено, что при увеличении концентрации Ni в сплаве износостойкость увеличивается.

Ключевые слова: металломатричные интерметаллидные материалы, легирование, покрытия, износостойкость.

Ссылка для цитирования:

Коневцов Л.А. Получение металломатричных сплавов для износостойких электроискровых покрытий / Л. А. Коневцов, В. К. Хе, Е. Д. Ким, К. П. Ерёмкина // // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 4. – С. 51-59. doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-51-59.

Original article
Open Access Article

PRODUCTION OF METAL MATRIX ALLOYS FOR WEAR-RESISTANT ELECTROSPARK COATINGS

Leonid Alekseevich Konevtsov¹, Vladimir Kancherovitch Khe^{2✉}, Evgeny Davidovich Kim³,
Ksenia Petrovna Eremina⁴

^{1, 2, 4} Institute of Materials Science at Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia

³ Pacific National University, Khabarovsk, Russia

¹ konevts@yandex.ru ; 0000-0002-8820-6358

² khe@ngs.ru ; 0000-0001-7672-1013

³ jenva_1992g@mail.ru ; 0000-0002-0175-0503

⁴ bksenya_p@bk.ru ; 0000-0003-4782-4093

The study objective is to obtain and study metal matrix alloys based on NiAl intermetallic compound with different concentrations of Ni for forming wear-resistant coatings on steel 45.

The problems to which the paper is devoted are: obtaining electrode materials based on NiAl intermetallic compound with different concentrations of Ni and studying their structure; studying the mass transfer during electrospark deposition on steel 45; studying the comparative wear resistance of the coatings obtained.

Research methods: electrode alloys are obtained by the method of liquid-phase self-propagating high-temperature synthesis; electro spark alloying is used to create wear-resistant coatings; the microstructure of the obtained alloys is studied by the method of metallographic analysis.

The novelty of the work: for the first time, the influence of different Ni concentration values on the wear resistance of NiAl electrospark coatings on steel 45 is studied.

Study results: the microstructure of the obtained alloys consists of doped Cr and Co grains of NiAl matrix with a different Ni/Al ratio, along the boundaries

of which the compounds of all alloy components are located. When forming coatings by electrospark method, time dependences of changes in anode erosion, cathode gain and mass transfer coefficient are obtained.

Conclusions: NiAl metal-based alloys with different concentrations of Ni were smelted using a liquid-phase SHS method using charge consisting of metal oxides and mineral concentrates containing tungsten and zirconium; the microstructure of the obtained alloys consists of doped Cr and Co grains based on NiAl, along which boundaries compounds of all the constituent components of the alloy are concentrated, including Zr and W. Experimental results of anode erosion, cathode gain, and mass transfer coefficient were obtained while forming the coatings with the alloys using electrospark method, and it was found during wear resistance tests that with an increase of Ni concentration in the alloy, the wear resistance increases.

Keywords: metal matrix alloy, intermetallic materials, alloying, coatings, wear resistance.

Reference for citing:

Konevtsov LA, Khe VK, Kim ED, Eremina KP. Production of metal matrix alloys for wear-resistant electrospark coatings. - *Transport Engineering*. – 2022. - № 4. - P. 51-59. doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-51-59.

Введение

Одной из основных задач современной науки о материалах является получение функциональных покрытий, которые обеспечивают повышение свойств поверхностей машин и механизмов: твёрдость, износостойкость, жаростойкость, и др. Для формирования покрытий используется большое количество традиционных и новых методов. Большинство новых методов основано на использовании источников концентрированных потоков энергии (КПЭ) таких как лазер, взрыв, электрическая искра и ряд других. К числу наиболее часто применяемых методов, основанных на использовании электрической искры, относятся электроэрозионная обработка, электроэрозионное диспергирование [1] и электроискровое легирование (ЭИЛ) [2, 3]. В основе метода ЭИЛ лежит полярный перенос эродированного материала анода (материал для нанесения) на катод (деталь). К важным преимуществам покрытий, получаемых методом ЭИЛ, можно отнести высокую адгезию материала покрытия к материалу детали, отсутствие терми-

ческих деформаций деталей при формировании покрытий, что обусловлено незначительным нагревом. Широкому внедрению в промышленное производство данного метода препятствуют такие его недостатки как недостаточный уровень автоматизации процесса низковольтного ЭИЛ и ограниченная номенклатура специализированных анодных материалов.

В большинстве работ, связанных с ЭИЛ, в качестве анодных материалов использовались стандартные твердые сплавы. Количество работ, где применялись другие материалы, значительно меньше [4]. Перспективными анодными материалами являются интерметаллидные сплавы, содержащие в составе фазы NiAl и Ni₃Al. Интерметаллидные сплавы на основе системы Ni-Al позволяют повысить эксплуатационные свойства (жаростойкость, износостойкость) сформированных покрытий. Исходя из анализа литературных источников, на практике находят применение сплавы с фазой Ni₃Al, а сплавы с фазой NiAl, хотя и имеют более высокие свой-

ства, распространены мало из-за повышенной хрупкости. Фаза NiAl, в соответствии с диаграммой состояния, имеет широкую область гомогенности с изменением содержания Ni от 42 до 70 ат.% в сплавах, что, по-видимому, оказывает существенное влияние на свойства таких сплавов при формировании покрытий методом ЭИЛ.

Анодные материалы, предназначенные для ЭИЛ, в основном производятся порошковым методом, что предопределяет их высокую стоимость. Наиболее экономически целесообразным методом получения

Материалы и методы

Анодные материалы получали методом жидкофазного СВС с использованием в качестве шихты порошков оксидов технической чистоты (NiO, Cr₂O₃, CoO) и минеральных концентратов (шеелит, бадделлит) Дальневосточного региона России. Восстановителем являлся порошок алюминия марки ПА-4 [5]. Для эффективного разделения металлического и шлакового расплавов использовали добавки плавикового шпата. Концентрации основных составляющих шихты рассчитывались по известной методике [6]. После предварительной сушки (150 °С) порошков в течение 20 минут их смешивали в смесителе активаторного типа. Металлотермическую плавку проводили в атмосфере воздуха с верхним поджигом шихты в футерованном тигле. В результате СВС процесса в тигле формируется спек. Внутри спека, в нижней его части, располагается слиток каплевидной формы. Элементный состав полученных анодных материалов приведен в табл. 1.

В качестве катодов при ЭИЛ использовали образцы стали марки 45 в состоянии поставки. Покрытия формировали с использованием электроискровой установки разработанной в Институте материаловедения ХНЦ ДВО РАН, в которой предусмотрена возможность изменять параметры электроискровых импульсов (длительность разрядных импульсов t_p , скважность

ания анодных материалов являются литейные технологии, но в этом случае структура анодных материалов зачастую дендритная и мелкозернистая. Поэтому все большее внимание исследователи уделяют методу жидкофазного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

В настоящей работе исследовали влияние изменения концентрации Ni в металлматричном комплекснолегированном сплаве на свойства и параметры покрытий, сформированных методом ЭИЛ.

$t_{ск}$, энергия разряда в импульсе E) в широком интервале. По результатам предварительных экспериментов были выбраны два режима: первый, обозначенный как ('), $t_p=40$ мкс, $t_{ск}=50$ %, $E'=3,12$ Дж); второй, обозначенный как (''), $t_p=80$ мкс, $t_{ск}=25$ %, $E''=14,4$ Дж (В дальнейшем режим 1 и режим 2 соответственно). Частота электроискровых импульсов во всех экспериментах не изменялась и составляла $f=500$ Гц.

Исследование микроструктуры анодных материалов и покрытий проводили с использованием оптического металлографического (*Altami MET 3* АПО) и растрового электронного (*SU-70 Hitachi*) микроскопов. Для оценки эффективности процесса ЭИЛ использовали суммы масс анода ($\Sigma\Delta a$) и катода ($\Sigma\Delta k$), и коэффициент массопереноса ($K= \Sigma\Delta a/\Sigma\Delta k$). Измерение масс анода и катода проводили гравиметрическим методом на электронных весах *Shinko Denshi HTR-220 CE* с точностью $\pm 10^{-4}$ г. Износостойкость покрытий исследовалась на приборе *CALOTEST CSM Instruments* при воздействии вращающегося корундового шарика диаметром 20 мм в условиях сухого трения. Износостойкость покрытий ($\gamma_{из.ст}$) рассчитывалась как $\gamma_{из.ст}=\Sigma I_{БП}/\Sigma I_{лс}$, где: $I_{БП}=51,8$ мкм – средняя величина износа образца без покрытия (значения получены в отдельном эксперименте); $I_{лс}$ износ с покрытием.

Таблица 1

Элементный состав анодных материалов

Table 1

Elemental composition of anode materials

Анодный материал, № п/п	Элементный состав анодных материалов ат, %							
	Ni	Al	Cr	Co	W	Si	Zr	Fe
1	51,8	29,6	10,5	3,4	1,5	1,2	1,2	0,18
2	47,4	35,7	9,6	2,9	1,9	1,2	0,85	0,17
3	45,5	33,1	9,6	4,1	1,8	0,7	0,9	0,3

Анодный материал, № п/п	Элементный состав анодных материалов ат, %							
	Ni	Al	Cr	Co	W	Si	Zr	Fe
4	43,8	38,5	9,5	4,1	1,6	1,1	0,9	0,2
5	42,9	39,7	9,5	3,8	2,2	0,8	0,9	0,2
6	41,2	43,9	9,5	2,19	1,2	1	0,6	0,2

Результаты

Исследование макроструктуры слитков экспериментальных плавков показало наличие примерно одинакового количества и размеров пор, характерных для слитков, полученных методом жидкофазного СВС на воздухе. Высокой скоростью кристаллизации, которая характерна для этого процесса, объясняется отсутствие в структуре дендритов и формирование мелкозернистого строения структурных составляющих.

Изучение микроструктуры (рис. 1) проводили на нетравленных шлифах в режиме отраженных электродов с использованием растрового электронного микроскопа. Общий вид микроструктуры в ис-

следуемых плавках существенно не отличается за исключением плавки 6, где видны игольчатые включения светлого оттенка. Кроме этого в металле плавки 4 видны более широкие межзёренные границы, состоящие из различных структурных составляющих.

Для исследования особенностей структурного строения металла плавков проводили микрорентгеноспектральный анализ по точкам (рис. 2). Результаты микрорентгеноспектрального анализа приведены в табл. 2. Содержание компонентов в структурных составляющих, имеющих сходный состав и строение, усредняли.

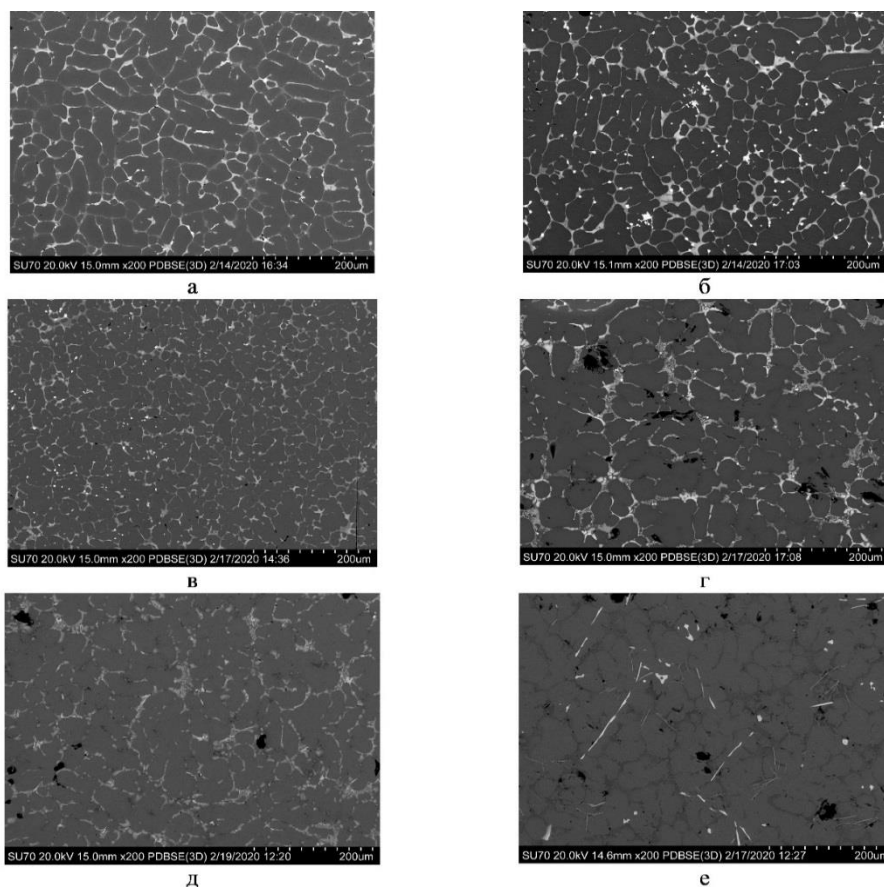


Рис. 1. Микроструктура анодных материалов: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6
 Fig. 1. Microstructure of anode materials

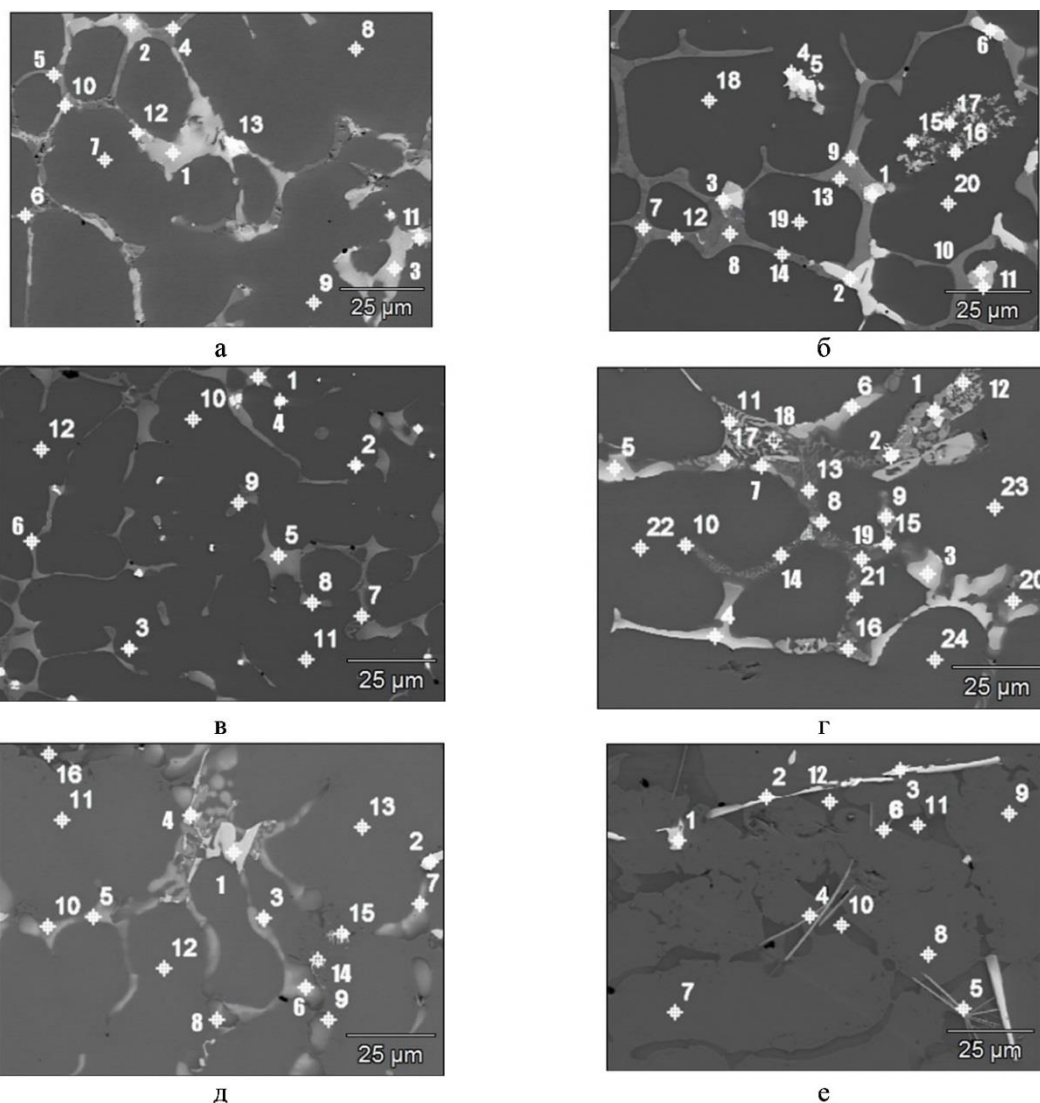


Рис. 2. Микроструктура и точки проведения микрорентгеноспектрального анализа анодных сплавов: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6.

Fig. 2. Microstructure and points of X-ray microanalysis of anode alloys: a – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6.

Таблица 2

Содержание элементов в точках анализа анодных материалов

Table 2

Element content at points of analysis of anode materials

Рис. 3а							
Точки анализа	Содержание элементов, ат.%						
	Al	Si	Cr	Co	Ni	Zr	W
1-3	4.95		80.58	0.74	5.74		7.98
4-6	1.15	18.54	74.62		3.25		2.44
7-9	47.21		4.02	1.41	47.37		
10	4.7		81.81	1.02	6.68		5.79
11-12			10.97		4.99	78.92	5.12
13			0.78		5.53	84.99	8.70
Рис. 3б							
1-6	3.75		53.49		5.11		37.64
7-9	29.98		60.18		3.11		6.73
10-11			2.47		5.93	77.99	13.62
12-14	5.48	16.87	71.63		1.88	0.57	3.55
15-17	15.39		38.78	0.36	14.42	18.17	12.88
18-20	52.13		3.14	1.79	42.94		

Рис. 3в							
Точки анализа	Содержание элементов, ат.%						
	Al	Si	Cr	Fe	Co	Ni	W
1-3			12.02	1.36		13.20	73.42
4-6	25.91		55.69	5.85	0.28	4.42	7.85
7-9	14.05	16.08	58.92	2.41		6.28	2.26
10-12	53.76		3.81	3.05	2.48	36.90	
Рис. 3г							
1-2			76.43		2.11		21.46
3-4	40.83		44.32		3.20		11.66
5-7	42.07		47.41		3.14		7.37
8-9	5.50	23.59	66.28		1.13		3.50
10-12	21.15	9.34	48.66	0.35	9.22	8.87	2.40
13-15	56.52	3.36	20.39	0.52	9.79	9.42	
16-18	6.61	22.21	67.17		1.32		2.69
19-21	59.08		35.22		2.29		3.41
22-24	59.94		3.10	2.16	34.80		
Рис. 3д							
1		3.11	39.94		3.66	51.15	2.14
2			79.89			3.39	16.72
3-4	8.90	1.80	36.18	0.48	9.08	42.71	0.85
5-7	59.72		31.53		2.67		6.08
8-10	59.57		34.96		2.74		2.72
11-13	56.81		2.64	2.38	38.16		
14-16	58.33	3.45	32.20		6.02		
Рис. 3е							
1			3.05	13.44		21.22	62.29
2-3	3.32			55.54		8.65	32.49
4-6	48.02			19.07	0.25	23.46	6.78
7-9	58.18			2.41	0.98	38.43	
10-12	59.9	0.99		35.80		2.60	0.71

Исходя из концентрации компонентов в зернах, формирующих матрицу сплавов (1 - точки 7 - 9, 2 - точки 18 - 20, 3 - точки 10 - 12, 4 - точки 22 - 24, 5 - точки 11-13, 6 - точки 7 - 9), провели расчет стехиометрического состава, который показал формирование интерметаллида системы Ni - Al. Согласно проведенным расчетам матрица сплавов представлена интерметаллидами переменного состава (1 - NiAl; 2 - NiAl_{1,2}; 3 - NiAl_{1,47}; 4 - NiAl_{1,74}; 5 - NiAl_{1,5}; 6 - NiAl_{2,3}). Интерметаллид NiAl является однофазным соединением и относится к бертоллидам, которые имеют широкую область гомогенности, что объясняет изменение концентрации Al. Кроме этого видно (табл. 2), что зерна матрицы (NiAl) содержат несколько изменяющееся содержание Cr и Co. Остальные фазы в сплавах находятся по границам зерен. Наиболее светлая фаза, как правило, содержащая W, Cr и Al располагается в виде локальных включений. Другие фазы с W, Cr, Al и Zr имеют серый оттенок и вытянуты. Все

структурные составляющие по границам зерен содержат Cr, что способствует дополнительному растворению в них W. Отмеченная закономерность объясняется неограниченной растворимостью Cr и W в жидком и твердом состояниях.

На рис. 3 приведены зависимости, характеризующие процесс получения покрытий методом ЭИЛ на образцах катодов стали 45 с использованием анодных материалов 1 - 6. Максимальную эрозию имеют анодные материалы 4 - 6, вне зависимости от скважности (рис. 3, а и б). Увеличение энергии электроискрового импульса (режим 2) приводит к росту эрозии анодного материала 4 до 2 раз (рис. 3, б). В противоположность эрозии, привес катода, который отражает толщину покрытий, максимален при использовании анодов 1, 3, 2 (рис. 3, в и г). Большая энергия электроискрового импульса (рис. 3, г) почти во всех случаях несколько увеличивает привес катода. Коэффициент массопереноса, по величине которого оценивается эффектив-

ность анодного материала при получении покрытий на конкретном катодном материале (сталь 45), приведен на рис. 3, д и е. На указанных рисунках приведены только анодные материалы 1 – 3, остальные (4 – 6)

не обозначены в связи с их минимальными значениями.

В табл. 3 приведены показатели износостойкости ($\gamma_{из}$) в зависимости от состава полученного сплава.

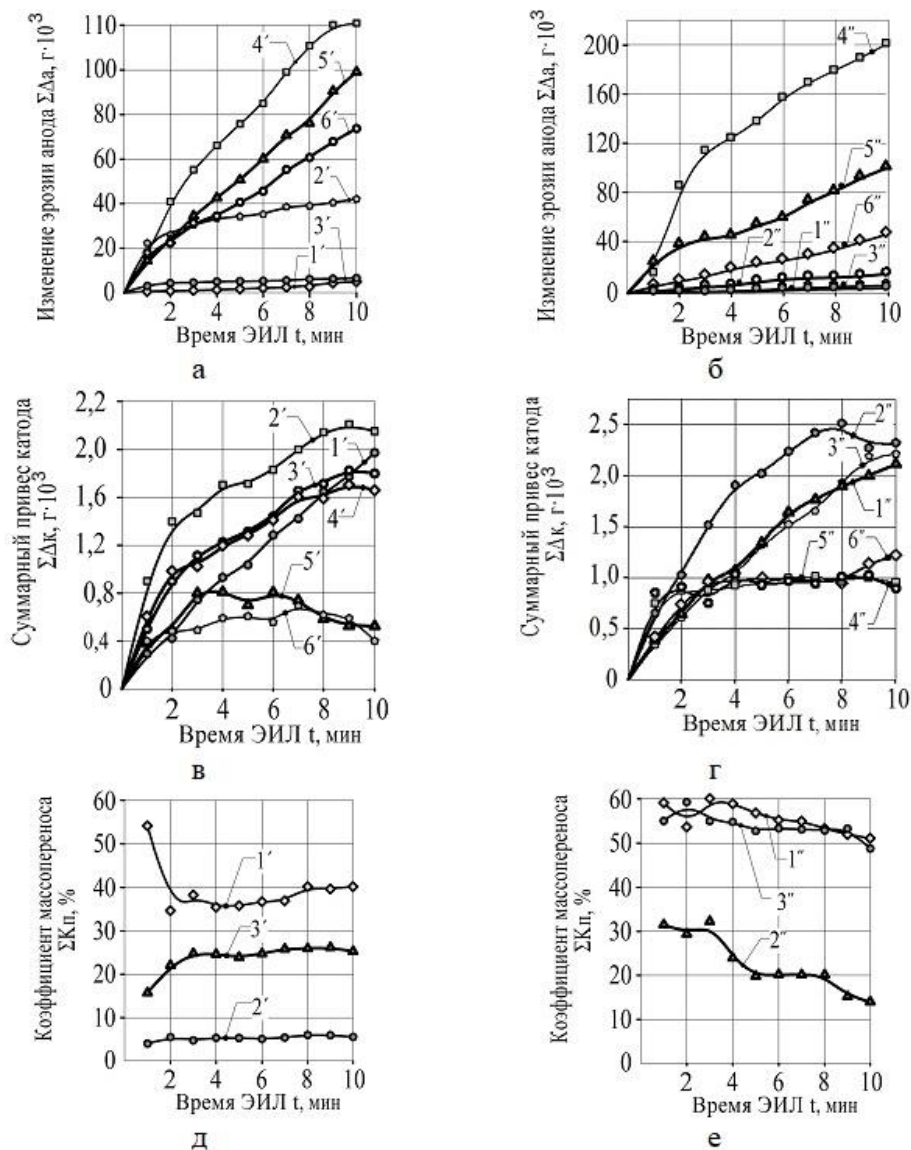


Рис. 3. Изменение эрозии анодов, массопереноса и коэффициента массопереноса в зависимости от состава анодного материала и времени обработки
Fig. 3. Changes in anode erosion, mass transfer and mass transfer coefficient depending on the composition of the anode material and processing time

Показатель износостойкости в зависимости от состава анодного материала

Таблица 3

Table 3

Wear resistance index depending on the composition of the anode material

Режимы ЭИЛ	Анодный материал, №					
	1	2	3	4	5	6
	Показатель износостойкости, $\gamma_{из}$					
Режим 1	5,4	2,2	1,9	2,3	2,6	2,1
Режим 2	6,1	3,6	2,9	4,0	1,8	2

Как следует из полученных результатов, с уменьшением содержания в шихте Ni износостойкость немонотонно снижается в последовательности 1 - 6. Наиболее существенно влияние режима нанесения

Выводы

1. Выплавлены NiAl металлматричные сплавы с различной концентрацией Ni методом жидкофазного СВС при использовании шихты, состоящей из оксидов металлов и минеральных концентратов, содержащих вольфрам и цирконий.

2. Микроструктура полученных сплавов состоит из легированных Cr и Co зерен основы NiAl, по границам которой сконцентрированы соединения всех со-

заметно при использовании составов 4, 2, 5, что объясняется высокой чувствительностью использованных сплавов к формированию оксидов.

ставляющих компонентов сплава, включая Zr и W.

3. При формировании покрытий полученными сплавами с использованием ЭИЛ получены экспериментальные результаты эрозии анода, привеса катода, коэффициента массопереноса, при испытаниях на износостойкость установлено, что при увеличении концентрации Ni в сплаве износостойкость увеличивается.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дворник М.И., Михайленко Е.А. Изменение состава порошков твердого сплава при электроэрозионном диспергировании в насыпном слое. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2019;15;10 (178):478-480.
2. Бурков А.А., Кулик М.А. Упрочнение FeCrMoWCBSi аморфных электроискровых покрытий карбидом вольфрама. *Письма о материалах*. 2021;11;3(43):304-308.
3. Химухин С.Н., Ри Х., Верхотуров А.Д., Ри Э.Х. Формирование структуры слоя на металлах и сплавах при электроискровой обработке. Хабаровск: ДВГУПС, 2010. 240 с.
4. Ри Х., Ри Э.Х., Химухин С.Н., Астапов И.А. Электродные материалы из белых чугунов для электроискровой обработки. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2012;01:8-13.
5. Khimukhin S.N., Eremina K.P. Microstructure peculiarities of intermetallic and composite coatings. *Solid State Phenomena*. 2021;316:783-788.
6. Гостищев В.В., Астапов И.А., Середюк А.В. и др. Высокотемпературный синтез композитов

на основе алюминидов никеля. *Неорганические материалы*. 2016;52;04:464-467.

7. Химухин С.Н., Гостищев В.В., Меднева А.В. и др. Интерметаллидные покрытия после испытания на жаростойкость. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2017;2 (55):125-133.
8. Химухин С.Н., Ерёмкина К.П., Ри Э.Х. и др. Структура интерметаллидных покрытий после термодиклирования. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2018;9 (70):26-32.
9. Gostishchev V.V., Astapov I.A., Khimukhin S.N. Fabrication of nickel-aluminum alloys with tungsten and molybdenum borides by the method of self-propagating high-temperature synthesis. *Inorg Mater Appl Res*. 2017;8(4):546-50.
10. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: Двадцать лет поисков и находок. Черноголовка: ИСМАН, 1989. 91 с.

1. Dvornik MI, Mikhaylenko EA. Change in the composition of hard alloy powders during electrospark dispersion in a filled layer. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2019;15;10 (178):478-480.
2. Burkov AA, Kulik MA. Hardening of FeCrMoWCBSi amorphous spark coatings with tungsten carbide. *Letters on Materials*. 2021;11;3(43):304-308.
3. Khimukhin SN, Ri H, Verkhoturov AD, Ri EH. Formation of the layer structure on metals and alloys during electrospark machining. Khabarovsk: DVGUPS; 2010.
4. Ri H, Ri EH, Khimukhin SN, Astapov IA. Electrode materials of white cast iron for electrospark machining. *Proceedings of the Southwest State*

University. Series: Engineering and Technologies. 2012;01:8-13.

5. Khimukhin SN, Eremina KP. Microstructure peculiarities of intermetallic and composite coatings. *Solid State Phenomena*. 2021;316:783-788.
6. Gostischev VV, Astapov IA, Seredyuk AV, et al. High-temperature synthesis of composites based on nickel aluminides. *Neorganicheskie Materiali*. 2016;52;04:464-467.
7. Khimukhin SN, Gostischev VV, Medneva AV, et al. Intermetallic coatings after heat resistance testing. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2017;2(55):125-133.
8. Khimukhin SN, Eremina KP, Ri EH. et al. The structure of intermetallic coatings after thermal cy-

cling. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2018;9(70):26–32.

9. Gostishchev VV, Astapov IA, Khimukhin SN. Fabrication of nickel–aluminum alloys with tungsten and molybdenum borides by the method of self-

propagating high-temperature synthesis. Inorg Mater Appl Res. 2017;8(4):546–50.

10. Merzhanov AG. Self-propagating high-temperature synthesis: twenty years of searches and finds. Chernogolovka: ISMAN; 1989.

Информация об авторах:

Коневцов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской Академии Наук, тел. +7(4212) 226598.

Хе Владимир Канчерович, младший научный сотрудник Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской Академии Наук, тел. +7(4212) 226598.

Konevtsov Leonid Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, phone: +7(4212) 226598.

Khe Vladimir Kancherovich, Junior Researcher at Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, phone: +7(4212) 226598

Ким Евгений Давидович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета, тел. +7(914) 2022752.

Ерёмина Ксения Петровна, кандидат технических наук, научный сотрудник Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской Академии Наук, тел. +7(4212) 226598.

Kim Evgeny Davidovich, Candidate of Technical Sciences, Lecturer of the Department of Foundry Production and Technology of Metals at Pacific National University, phone: +7(914) 2022752.

Eremina Ksenia Petrovna, Candidate of Technical Sciences, Researcher at Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, phone: +7(4212) 226598.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 21.12.2021; одобрена после рецензирования 19.01.2022; принята к публикации 21.03.2022. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 21.12.2021; approved after review on 19.01.2022; accepted for publication on 21.03.2022. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.