



Влияние добавки хрома и режимов при электроискровом легировании алюмоматричным анодным материалом стали 45

С. В. Николенко¹, Л. А. Коневцов¹, П. С. Гордиенко²,
Е. С. Панин², С. А. Величко^{3*}

¹ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук» (г. Хабаровск, Российская Федерация)

²ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук» (г. Владивосток, Российская Федерация)

³ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева» (г. Саранск, Российская Федерация)

*velichko2005@yandex.ru

Введение. Электроискровое легирование используется для получения упрочняющих покрытий. К анодным материалам, обладающим уникальными свойствами, относят алюмоматричные композиционные материалы на основе алюминия. Цель работы – разработка новых анодных алюмоматричных композиционных материалов с высокими показателями эффективности при электроискровом легировании углеродистой стали 45.

Материалы и методы. В качестве подложки (катода) использовалась конструкционная углеродистая сталь 45. Алюмоматричные материалы выбраны в качестве анодных. Величину привеса катода и эрозию анода определяли гравиметрическим методом на электронных весах Shinko Denshi HTR-220 CE с точностью $\pm 10^{-4}$ г. Для исследования микроструктуры и металлографии поверхности анодных материалов использовался микроскоп EVO-50 XVP и Altami MET 3 АПО фирмы С. ZEISS. Для изучения покрытий на микроабразивный износ применялся прибор CALOTEST CSM Instruments.

Результаты исследования. Разработана методологическая схема достижения эффективности параметров электроискрового легирования и свойств легированного слоя в зависимости от состава анодного металломатричного композиционного материала на основе алюминия с добавлением хрома и режимов обработки. Для нанесения материала анода при электроискровом легировании установлен режим электроискровой установки «ИМЭЛ» с энергией импульсов 14,4 Дж. Найдено, что после электроискрового легирования стали 45 твердость и износостойкость поверхности возрастают в 2-3 раза, жаростойкость – в 5-18 раз.

Обсуждение и заключение. Получены ряды увеличения массы катода, эрозионной стойкости электродных материалов, коэффициента массопереноса, жаростойкости, твердости и износостойкости легированного слоя. Они являются удобным инструментом для достижения тех или иных параметров эффективности при электроискровом легировании в зависимости от выбранного анодного материала и режимов обработки.

Ключевые слова: электроискровое легирование, анодные металломатричные материалы, твердость, износостойкость, жаростойкость

© Николенко С. В., Коневцов Л. А., Гордиенко П. С., Панин Е. С., Величко С. А., 2021



Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние добавки хрома и режимов при электроискровом легировании алюмоматричным анодным материалом стали 45 / С. В. Николенко, Л. А. Конецов, П. С. Гордиенко [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202103.449-469](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.449-469) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 449–469.

Original article

Effect of Chromium Addition and Regimes during Electrospark Alloying with Aluminum Matrix Anode Material of Steel 45

S. V. Nikolenko^a, L. A. Konevtsov^a, P. S. Gordienko^b,
E. S. Panin^b, S. A. Velichko^{c*}

^a*Institute of Materials Science of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk, Russian Federation)*

^b*Institute of Chemistry of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation)*

^c*National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)*

*velichko2005@yandex.ru

Introduction. Electrospark alloying is used to produce hardening coatings. Anodic materials with unique properties include metal matrix composites based on aluminum. The aim of the work is to develop new aluminum matrix anode composite materials with high efficiency indicators during electrospark alloying of carbon steel 45.

Materials and Methods. Structural carbon steel 45 was used as the substrate (cathode). Aluminum matrix materials are chosen as the anode materials. The value of the cathode weight increment and the anode erosion were determined by the gravimetric method on the Shinko Denshi HTR-220 CE electronic scale with an accuracy of $\pm 10^{-4}$ g. To study the microstructure and metallography of the surface of the anode materials, the microscopes EVO-50 XVP and Altami MET 3 APO from S. ZEISS were used. The device CALOTEST CSM Instruments was used to study coatings for microabrasive wear.

Results. There is developed a methodological scheme for achieving the efficiency of the electric spark alloying parameters and the properties of the doped layer depending on the composition of the anodic metal matrix composite material based on aluminum with the addition of chromium and processing modes. The mode of Institute of Materials Science electrospark installation with pulse energy of 14.4 J was set for anode material application during electrospark alloying. It is established that after electric spark alloying of steel 45, the hardness and wear resistance of the surface increase by 2-3 times, and the heat resistance – by 5–18 times.

Discussion and Conclusion. The series of increasing the cathode mass, the erosion resistance of the electrode materials, mass transfer coefficient, heat resistance, hardness and wear resistance of the alloyed layer are obtained. The obtained series are a convenient tool for achieving various efficiency parameters in electric spark alloying depending on the selected anode material and processing modes.

Keywords: electric spark alloying, anodic metal matrix materials, hardness, wear resistance, heat resistance

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Nikolenko S.V., Konevtsov L.A., Gordienko P.S., et al. Effect of Chromium Addition and Regimes during Electrospark Alloying with Aluminum Matrix Anode Material of Steel 45. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):449-469. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.449-469>

Введение

В последнее время перед учеными-материаловедами стоят задачи по разработке технологических процессов получения упрочняющих покрытий, используемых в машиностроении, обладающих высокой твердостью, износостойкостью, жаростойкостью и другими свойствами. Для нанесения упрочняющих покрытий актуален метод электроискрового легирования (ЭИЛ). В основе метода ЭИЛ лежит электрическая искра как технологический инструмент, который разрушает электрод (анод) и формирует на поверхности детали (катоде) покрытия с заданными функциональными свойствами. Методом ЭИЛ можно наносить любой токопроводящий материал. К анодным материалам, обладающим уникальными механическими, технологическими и специальными свойствами, относят алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ) [1–4].

Весьма остро стоит вопрос о соответствии поверхностей деталей своему функциональному назначению. Важно решить проблемы повышения долговечности, надежности трибосопряжений, снижения энергозатрат [5; 6]. В связи с этим особое значение приобретают работы по созданию принципиально новых анодных антифрикционных материалов и электроискровых покрытий с гетерофазной структурой, в том числе стехиометрического состава интерметаллидов и нестехиометрического состава соединений АМКМ бертоллидного типа.

Введение в алюминиевые сплавы армирующих частиц микронных размеров с твердостью, отличной от матрицы, позволяет расширить область существования во фрикционном контакте вторичных структур вследствие возросшей гетерогенности.

При таком сочетании структур и фаз после обработки рабочих по-

верхностей деталей методом ЭИЛ анодом из АМКМ прогнозируется расширение температурных интервалов работы и повышение триботехнических свойств измененного поверхностного слоя [1; 3].

Цель работы – разработка новых анодных алюмоматричных композиционных материалов с высокими показателями эффективности при ЭИЛ углеродистой стали 45.

Обзор литературы

Для получения и упрочнения исполнительных поверхностей деталей предполагается использование эффективных физикохимических процессов и различных методов [4–7]. Среди таких технологий выделяется ЭИЛ [2; 4; 8].

При использовании в качестве анодных материалов интерметаллидов NiAl, Ni₃Al, TiAl в процессе ЭИЛ ряда алюминий-титановых систем (BT9, BT18, BT3-1), в частности Al_{7%}-Ti_{87%}-Mo_{3%}-Zr_{2%}, А. Д. Верхотуров обнаружил в составе легированного слоя (ЛС) значительное количество интерметаллидных фаз, обладающих высокой жаростойкостью: NiAl, TiN, Ni₃Ti, Al₃Ti, AlNi₃, а также γ Al₂O₃, Ti₃O₅, TiO₂ [2; 9–11]. При ЭИЛ систем Al_{8,2%}-Ti_{77%}-Zr_{12%}-Mo_{1%}-Nb_{1%} и Al_{7%}-Ti_{86%}-Mo_{3%}-Cr_{2,3%}-Zr_{0,5%}-Si_{0,4%} указанными интерметаллидами, помимо исходных материалов, в ЛС наблюдался интерметаллид AlTi₂ [12–15]. «Температуры, создаваемой в области разряда, было достаточно для разложения Ni₃Al и растворения Al в Ti с образованием новых интерметаллидов. Выявлено, что ЭИЛ указанными анодными материалами повышает микротвердость ЛС в 2 раза, в сравнении с микротвердостью основы, а также повышает износостойкость» [14]. При этом материал анода в основном переносится без значительного изменения фазового состава.

Впоследствии данные этих исследований сыграли роль в создании и использовании в качестве анодных материалов АМКМ, содержащих тугоплавкие компоненты. Показано создание АМКМ, содержащих тугоплавкие компоненты SiC, AlN, Si₃N₄ или BN, полученные методом искрового плазменного спекания [4]. При этом армирующий компонент диспергировался в непрерывном матричном компоненте, а композит обладал лучшими характеристиками, такими как прочность, жесткость, износостойкость, обрабатываемость, высокая теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения [9].

Особый интерес представляют АМКМ, усиленные твердыми частицами для повышения износостойкости, жаростойкости, твердости исполнительных поверхностей электроискровыми технологиями. В частности, актуальны АМКМ с добавками мелкодисперсных керамических частиц SiC [10–13], такие алюминиевые системы эффективны для использования в качестве исполнительных поверхностей трения изделий тормозных систем роторного или барабанного типа, Al₂O₃ – для цилиндров автомобильных двигателей, приводных валов грузовых автомобилей, шпилек шин [14–16]. Перспективными считаются работы по созданию АМКМ с добавками AlN [17; 18]; Si₃N₄ [19]; BN [20; 21]; квазикристаллов [22; 23], наночастиц [24]. Добавка к матричному Al позволяет увеличить область применения за счет значительного повышения уровня физико-механических и эксплуатационных свойств, расширения температурно-силовых интервалов работы изделий [25; 26].

Актуальность этой проблемы много лет мотивирует ученых США [27–29]. Исследования проводятся в Германии [30; 31], Японии [32–34], Китае [35; 36], а также в нашей стране [37; 38].

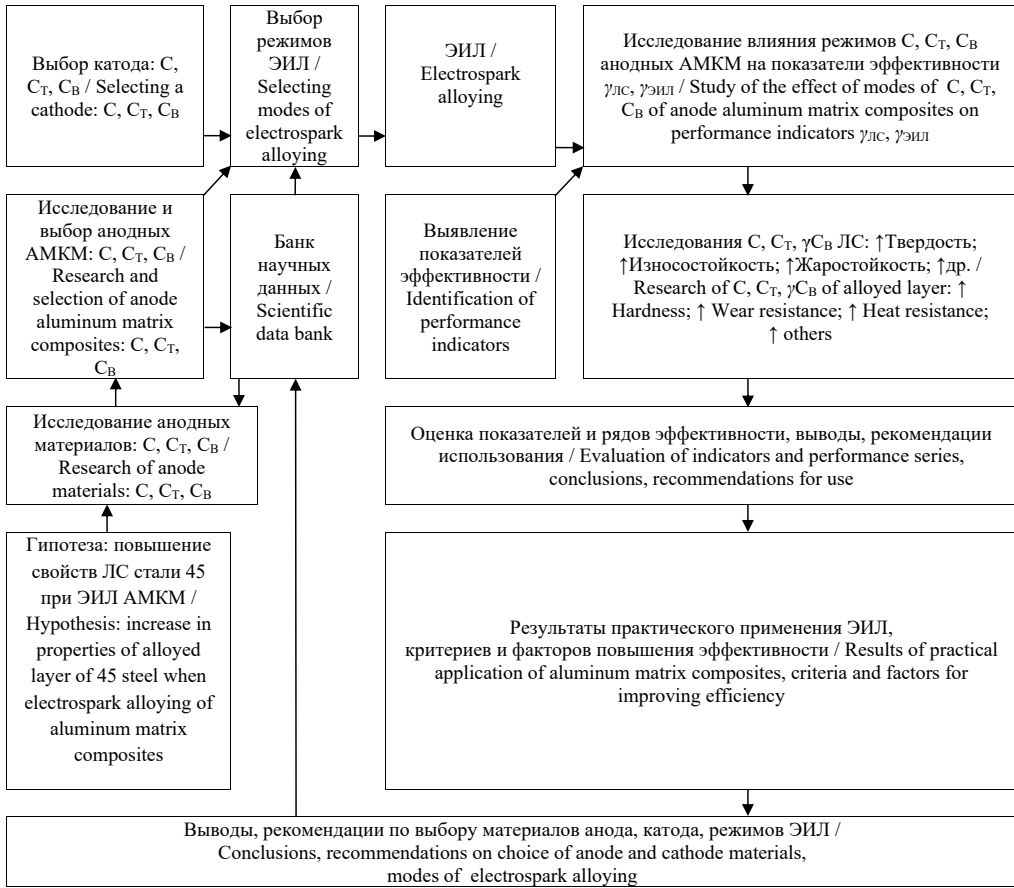
Материалы и методы

Процесс ЭИЛ физически основан на искровом разряде в газовой среде, при котором происходит преимущественно эрозия материала анода и перенос продуктов эрозии (ПЭ) на катод. На поверхности катода образуется ЛС модифицированной структуры и состава, что обусловлено перемещением и конвективным перемешиванием в микрощельной расплава материала при импульсных тепловых и механических нагрузках, возникающих при воздействии искрового разряда [4].

В качестве подложки (катода) использовалась конструкционная сталь 45, широко применяемая в машиностроении. В качестве анодных материалов выбраны АМКМ, которые получали методом металлотермии с учетом свойств алюминия, не образующего непрерывных твердых растворов с другими элементами [3]. Учитывалось, что Al образует ограниченные твердые растворы и химические соединения с различными элементами. Для исследований отобраны две группы алюмоматричных материалов: 1) А: Al-Ti-Ni-Zr; 2) Б: Al-Ti-Cr-Ni-Zr (далее А и Б).

Исследовались алюмоматричные материалы по методологической схеме (рис. 1), исходным звеном которой является формулировка гипотезы повышения свойств ЛС исполнительной рабочей поверхности стали 45 в результате ЭИЛ АМКМ, которая мотивировала создание научного банка данных ряда функциональных АМКМ для исследований с привлечением известных теоретических и практических сведений.

Такие анодные материалы были изготовлены для исследования состава, структуры, свойств. На основании полученных сведений по АМКМ и материалу катода, в соответствии с разработанной методологической схемой, был выполнен предварительный подбор ЭИЛ и проведены исследования



Р и с. 1. Методологическая схема исследований: С – состав; Ст – структура; γ_{C_B} – показатели свойств ЛС после ЭИЛ

F i g. 1. Methodological research framework: C – composition; C_T – structure; γ_{C_B} – property values alloyed layer after aluminum matrix composites

влияния режимов, состава, структуры и свойств АМКМ на показатели эффективности по формированию ЛС при ЭИЛ. Затем (в соответствии с указанной схемой) были выполнены исследования состава, структуры и свойств ЛС и других показателей эффективности ЭИЛ стали 45: твердости, износостойкости, жаростойкости.

В процессе ЭИЛ удельной поверхности (1 см²) определялось изменение массы исследуемых образцов катода стали 45 и эрозии анода от времени ЭИЛ с различными электрическими

параметрами. В качестве генератора импульсов при ЭИЛ использовалась установка, разработанная в ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук», со следующими режимами обработки: скважность $t_{ck} = 50\text{--}25\%$, длительность разрядных импульсов $t_p = 40\text{--}80$ мкс, рабочий ток $I_p = 195\text{--}225$ А, напряжение 40 В, частота разрядных импульсов $f = 500$ Гц. Для сравнения опытным путем выбраны два режима: 1) $t_{ck} = 50\%$, $t_p = 40$ мкс (далее режим $t_{ck} / t_p = 50 / 40$

обозначен как «'»); 2) $t_{\text{ск}} = 25$, $t_{\text{р}} = 80$ (режим 25 / 80, далее «"»). Максимальная энергия разряда в импульсе $E' = 3,12$ Дж при использовании режимов ЭИЛ 50 / 40 и $E'' = 14,4$ Дж при 25 / 80.

Величины привеса катода и эрозии анода определялись гравиметрическим методом на электронных весах Shinko Denshi HTR-220 CE с точностью $\pm 10^{-4}$ г. Для исследования микроструктуры поверхности анодных материалов, топологии и элементного состава покрытий использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) EVO-50 XVP фирмы C.ZEISS, оборудованный комплексом INCA ENERGY 350. Для металлографического, гранулометрического, дюраметрического анализов применялся микроскоп Altamі MET 3 АПО, дериватограф Q-1000. Исследования покрытий на микроабразивный износ проводились на приборе CALOTEST CSM Instruments путем воздействия вращающегося корундового шарика диаметром 20 мм на плоский образец с добавлением эмульсии, содержащей абразивные частицы Al_2O_3 ($d \sim 6$ мкм).

Результаты исследования

Общий вид поверхности и химический состав в местах забора проб образцов анодных материалов А и Б показан на рисунке 2.

Химический анализ в различных местах забора проб показал, что анодный материал А неоднороден, анализируемые по цвету фазы (светлая, серая, темная) состоят из следующих элементов (вес, %): Al (8,8–29,6), Ti (2,4–15,0), Ni (13,3–68,0), Zr (2,3–8,6); Б: Al (11,9–36,2), Ti (1,0–16,5), Ni (24–57,1), Zr (2,4–14,4), Cr (3,8–21,4).

Как показал рентгенофазовый анализ (РФА) анодных материалов А и Б, большой разброс отклонений величин, а также добавка Cr в материал Б являются следствием формирования различных фаз анодных материалов: А – Al_2NiTi ,

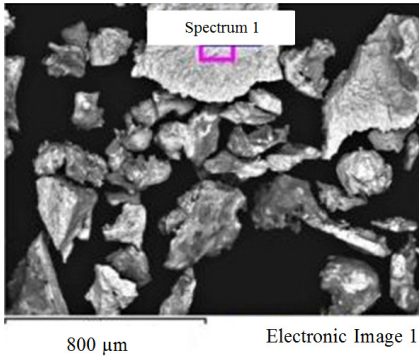
$\text{Al}_{0,42}\text{Ni}_{0,58}$, $\text{Ni}_{0,35}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{0,35}$, Al_3Zr_4 , $\text{Al}_5\text{Ni}_3\text{Zr}_2$; Б – $\text{Al}_{1,1}\text{Ni}_{0,9}$, Al_3Ni , Al_2Ti , Al_3Ti , $\text{Cr}_{0,7}\text{Ni}_{1,3}\text{Zr}$, Cr_2Ti , Al_3Zr_5 , NiTi.

Таким образом, полученные анодные материалы представляют собой систему фаз стехиометрического состава интерметаллидов и нестехиометрического состава соединений бертоллидного типа, характеризующихся переменной валентностью.

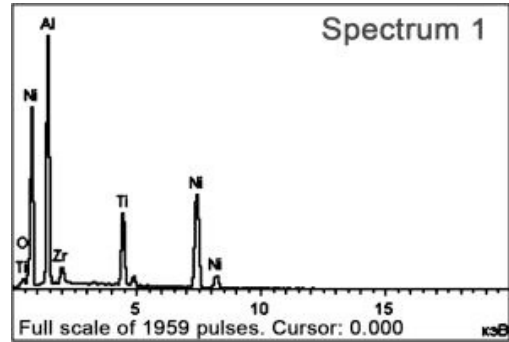
Для установления общих закономерностей эрозии АМКМ при ЭИЛ были выполнены исследования состава ПЭ по группам размеров (рис. 2), позволившие определить характер разрушения.

Элементный анализ (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия), проведенный на СЭМ, показал, что при ЭИЛ анодным материалом А" с режимами $t_{\text{ск}} / t_{\text{р}} = 25 / 80$ (рис. 2а) формируются крупные ПЭ хрупкофазного разрушения (частицы с размерами до 90–1 000 мкм), средние (30–90 мкм) и мелкие (менее 30 мкм), в том числе ПЭ парагазовой фазы (менее 10^{-4} мм). В состав крупных ПЭ входят в основном элементы, имеющие большое химическое сродство с кислородом: Al (22,6–29,1), Ti (10,2–13,4), Ni (50,1–59,2), Zr (2,9–5,6). ПЭ средних размеров (30–90 мкм) включают в себя следующие элементы: Al (22,2–22,7), Ti (8,6–12,1), Ni (14,0–53,6), Zr (6,1–7,6), оплавленный Fe (2,0–2,2). Мелкие ПЭ (менее 30 мкм) содержат Al (17,0–22,2), Ti (8,8–10,2), Ni (8,7–24,9), Zr (5,8–6,1) и оплавленный Fe (0,5–2,2). Как видно, с уменьшением размеров ПЭ в их составе уменьшается доля Ni, а доля матричного элемента Al, Ti и Zr меняется незначительно.

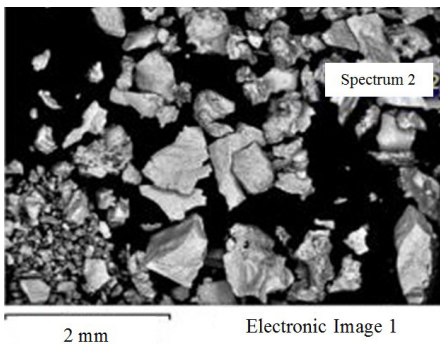
При ЭИЛ (режим $t_{\text{ск}} / t_{\text{р}} = 50 / 40$) анодным материалом Б' (рис. 2с) в ПЭ появляется Cr. Крупные ПЭ достигают 90–1 100 мкм и представлены следующими металлами: Al (34,3), Ti (1,4), Cr (3,4), Ni (59,1). Среди них встречаются оплавленные ПЭ Fe (1,8).



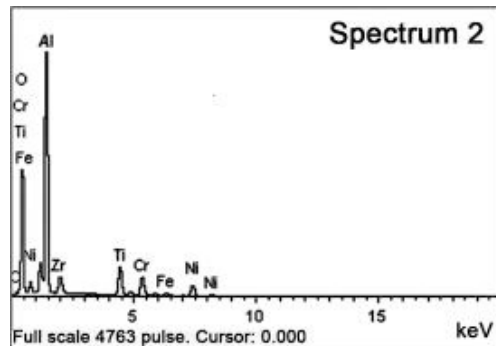
a)



b)



c)



d)

Р и с. 2. Общий вид поверхности и химический состав в местах заора проб образцов анодных материалов А и Б: а) микроструктура исследуемых анодных АМКМ Al-Ti-Ni-Zr; б) элементный состав в местах заора проб анодных АМКМ Al-Ti-Cr-Ni-Zr; в) микроструктура исследуемых анодных АМКМ Al-Ti-Ni-Zr; д) элементный состав в местах заора проб анодных АМКМ Al-Ti-Cr-Ni-Zr

Fig. 2. General surface view and chemical composition at the sampling sites of anode materials A and B: a) microstructure of the studied anode aluminum matrix anode materials Al-Ti-Ni-Zr; б) elemental composition at sampling sites of anode aluminum matrix anode materials Al-Ti-Cr-Ni-Zr; в) microstructure of the studied anode aluminum matrix anode materials Al-Ti-Ni-Zr; д) elemental composition at sampling sites of anode aluminum matrix anode materials Al-Ti-Cr-Ni-Zr

Частицы средних размеров 30–50 мкм содержат: Al (39,8), Ti (7,3), Cr (14,8), Ni (22,1), Zr (5,0) и оплавленный Fe (2,7). Мелкие ПЭ, менее 30 мкм: Al (27,2), Ti (6,8), Cr (6,0), Ni (6,8), Zr (5,9) и оплавленный Fe (1,4), в том числе ПЭ парогазовой фазы (менее 10^{-4} мм). С уменьшением размеров ПЭ в их составе незначительно меняется вес матричного элемента Al, почти на

порядок уменьшается вес связки Ni и возрастает вес тугоплавких добавок Ti, Cr и Zr.

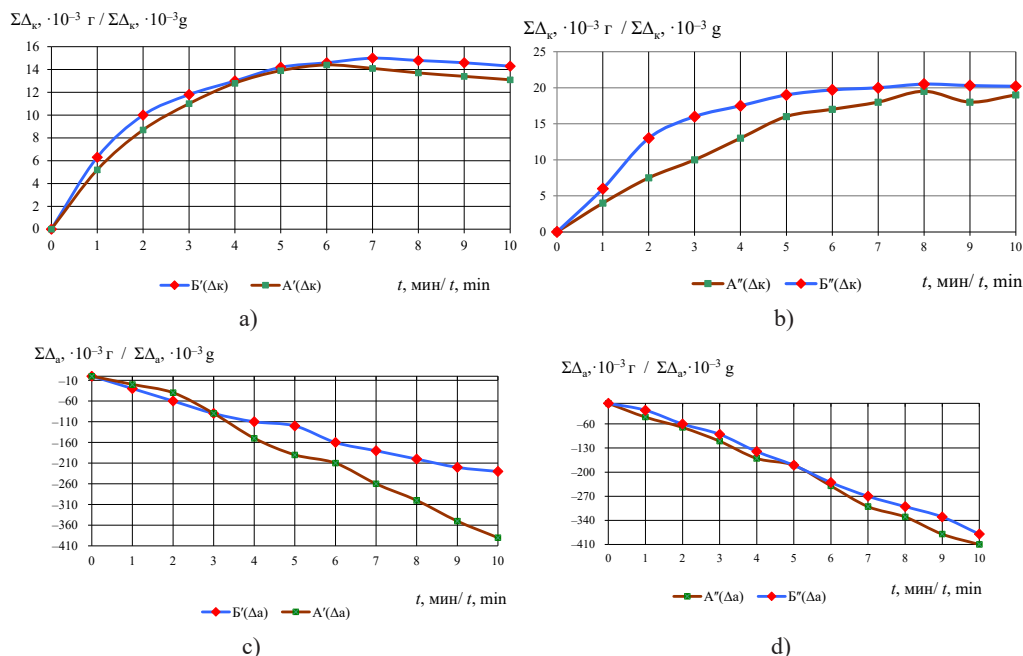
Исследования электропереноса АМКМ на подложку из стали 45 (рис. 3) подтвердили, что условия большего массопереноса при формировании ЛС обеспечиваются при низкой эрозионной стойкости анода и соотношении температур плавления анода

и катода $T_a < T_k$ [4; 5]. Величины суммарной эрозии $\Sigma\Delta_a$ (рис. 3с, 3д) при $t = 10$ мин ЭИЛ, созданных АМКМ, достигали значений $\Sigma\Delta_{a(10\text{мин})}$ от $231,7 \cdot 10^{-3}$ до $408,7 \cdot 10^{-3}$ г. Полученный ряд эрозионной стойкости $\Sigma\Delta_{a(\text{эп.ст.}10\text{мин})}^{-1}$ анодных материалов при изменении режимов обработки $B'' \rightarrow A'' \rightarrow A' \rightarrow B'$ (ряд 1*) показал, что наибольшей эрозионной стойкостью отличаются электродные материалы B' и A' ($\Sigma\Delta_{a(10\text{мин})} = 231,7 \cdot 10^{-3}$ и $385,9 \cdot 10^{-3}$ г соответственно) при режимах ЭИЛ $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 50/40$, а наименьшей – A'' и B'' ($\Sigma\Delta_{a(10\text{мин})} = 408,7 \cdot 10^{-3}$ и $392,3 \cdot 10^{-3}$ г соответственно) при $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 25/80$. Поэтому лучшие ожидаемые результаты массопереноса предполагалось получить при ЭИЛ анодными материалами при режимах B'' , A'' .

Экспериментально полученные кривые массопереноса $\Sigma\Delta_k$ при ЭИЛ ста-

ли 45 анодными материалами с режимами A' , B' , A'' , B'' относятся к классу «кривых Лазаренко» (рис. 3а, 3б) [2; 6]. Наибольшие значения величины массопереноса $\Sigma\Delta_k$ наблюдались при $t = 6-8$ мин при ЭИЛ удельной площади поверхности 1 см^2 , после чего до $t = 10$ мин процесс ЭИЛ стабилизировался и прироста $\Sigma\Delta_k$ не наблюдалось.

Во всех случаях при $t = 10$ мин и режимах $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 25/80$ величина значений $\Sigma\Delta_k$ была больше (в 1,4-1,5 раза), чем при режимах $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 50/40$, и достигала наибольших значений $\Sigma\Delta_k = 20,6 \cdot 10^{-3}$ г при $t = 8$ мин ЭИЛ анодным материалом B'' . При $t = 10$ мин наибольшее значение величины $\Sigma\Delta_k = 20,2 \cdot 10^{-3}$ г наблюдалось при ЭИЛ анодным материалом B'' , наименьшее $\Sigma\Delta_k = 13,1 \cdot 10^{-3}$ г – при ЭИЛ материалом A' . Получен ряд привеса исследуемых анодных материалов, с учетом изменения режимов обработки,



Р и с. 3. NURBS-кривые кинетики процесса ЭИЛ стали 45 анодными материалами А, Б при ЭИЛ с режимами: а), с) $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 50/40$; б), д) $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 25/80$

Fig. 3. NURBS-kinetics curves of the electrospark alloying process of steel 45 anode materials А, Б at electrospark alloying with the modes: а), с) $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 50/40$; б), д) $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 25/80$

$A' \rightarrow B' \rightarrow A'' \rightarrow B''$ (ряд 2*), из которого видно, что наибольший привес при $t = 10$ мин ЭИЛ у анодных хромсодержащих АМКМ А'' и Б'' ($\Sigma\Delta_k = 19,6 \cdot 10^{-3}$ и $20,2 \cdot 10^{-3}$ г соответственно при $t_{ck} / t_p = 25 / 80$) и наименьший у А' и Б' ($\Sigma\Delta_k = 13,1 \cdot 10^{-3}$ и $14,3 \cdot 10^{-3}$ г соответственно при $t_{ck} / t_p = 40 / 50$).

Коэффициент электропереноса во всех случаях имел наибольшие величины значений в первые 1–3 мин ЭИЛ, достигая $\Sigma K_{п.ср.} = 22\text{--}27\%$ при ЭИЛ анодными материалами с режимами А', Б', и наименьшие $\Sigma K_{п.ср.} = 4,8\text{--}5,1\%$ при А'', Б'' и $t = 10$ мин (рис. 4). В связи с формированием «вторичных структур» на поверхностях электродов значения величин $\Sigma K_{п.ср.}$ постепенно уменьшались из-за длительности процесса ЭИЛ и образования «вторичного» массопереноса.

Получен ряд средних значений коэффициента переноса $\Sigma K_{п.ср.}$ при ЭИЛ исследуемыми анодными материалами и режимами обработки (ряд 3*): $B'' \rightarrow A' \rightarrow A'' \rightarrow B'$.

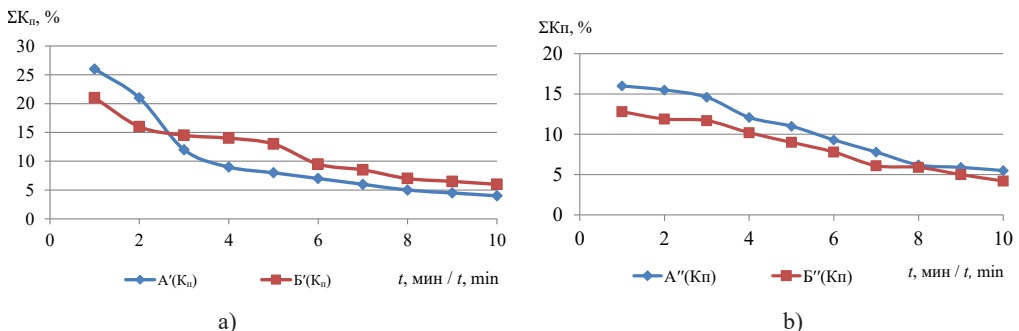
Как видно, полученные ряды 1–3 параметров эффективности ЭИЛ не совпадают между собой, в силу чего на практике используют предложенный А. Д. Верхотуровым критерий формирования ЛС: $\gamma_{ф.лс} = \Sigma\Delta_k \cdot t_{эил} \cdot \Sigma K_{п.ср.}$, где

$\Sigma K_{п.ср.} = \Sigma\Delta_{к.ср.} / \Sigma\Delta_{а.ср.}$, который также можно представить в виде ряда (ряд 4*) $A' \rightarrow B' \rightarrow B'' \rightarrow A''$, отражающего совокупность величин значений полученных рядов 1–3 [4]. Пользуясь данным критерием, можно увидеть, что наиболее неблагоприятные условия формирования обеспечиваются при ЭИЛ материалом А' ($\gamma_{ф.лс} = 13,1$), а при ЭИЛ А'' ($\gamma_{ф.лс} = 20,4$) условия формирования ЛС выше в 1,6 раза.

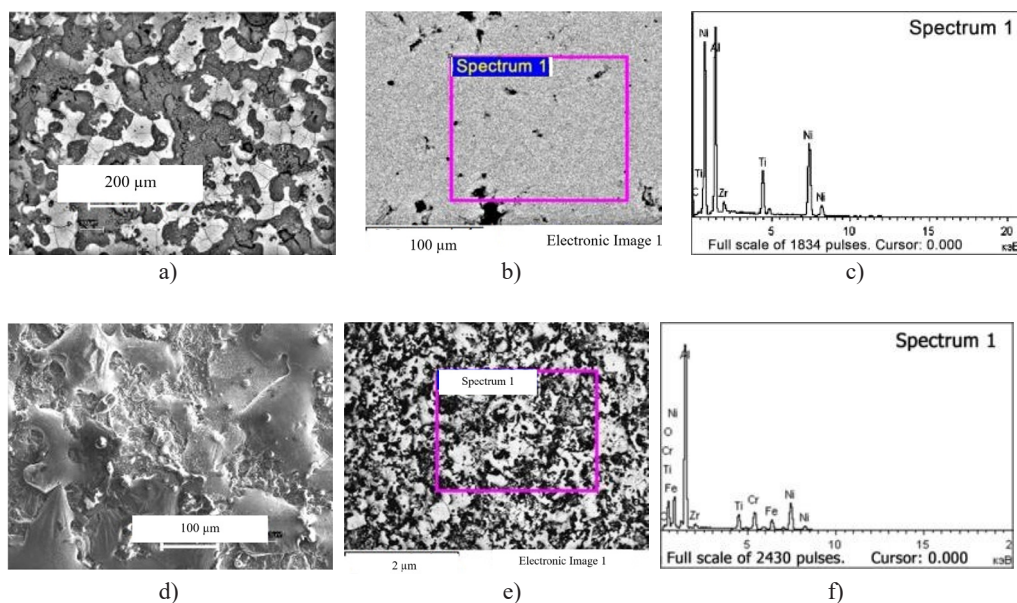
Исследование свойств ЛС и эффективности ЭИЛ

Элементный анализ показал, что состав ЛС имеет переменный характер в местах забора проб с преобладанием матричного алюминия, а также связующего никеля (рис. 5).

Выявлено, что при ЭИЛ анодным материалом А' (режим 50/40) формируется ЛС, который содержит С (3,0–4,4); О (2,5 (светлая фаза) и 23,6 (темная фаза)); Al (30,2–38,8); Ti (8,6–12,2); Ni (11,3–55,3 (светлая фаза)); Zr (1,7–6,3). При ЭИЛ А'' (25/80) С (3,8–4,4); О (3,0 (светлая фаза) и 20,4 (темная фаза)); Al (22,3–54,4); Ti (5,7–7,9); Ni (5,5–45,7); Zr (1,7–5,3). При ЭИЛ анодным хромсодержащим АМКМ Б' (режим 50/40) ЛС содержит С (2,3–6,1); О (1,5–26,2); Al (35,8–45,1); Ti (4,1–5,8); Cr (2,2–12,6); Ni (6,6–40,4); Zr (2,0–4,4);



Р и с. 4. NURBS-кривые изменения коэффициента массопереноса $\Sigma K_{п.ср.}$ при ЭИЛ стали 45 анодными материалами А, Б на режимах: а) $t_{ck} / t_p = 50 / 40$; б) $t_{ck} / t_p = 25 / 80$
 F i g. 4. NURBS-curves of the mass transfer coefficient $\Sigma K_{п.ср.}$ change during electrospark alloying of 45 steel with anode materials А and Б at regimes: а) $t_{ck} / t_p = 50 / 40$; б) $t_{ck} / t_p = 25 / 80$



Р и с. 5. Энергодисперсионная рентгеновая спектроскопия ЭИЛ покрытия:
 а) изображение поверхности после ЭИЛ анодными АМКМ Al-Ti-Ni-Zr; б) место забора
 пробы по поверхности; в) спектр S1 в месте забора пробы (концентрационные кривые
 распределения элементов); д) изображение поверхности после ЭИЛ анодными
 АМКМ Al-Ti-Cr-Ni-Zr; е) место забора пробы; ф) спектр

F i g. 5. Energy dispersive X-ray spectroscopy of electrospark alloying layer:
 a) surface image after electrospark alloying with anode aluminum matrix composites Al-Ti-Ni-Zr;
 b) surface sampling location; c) spectrum S1 at the sampling site (concentration curves of element
 distribution), d) surface image after electrospark alloying with anode aluminum matrix composites
 Al-Ti-Cr-Ni-Zr; e) surface sampling location; f) spectrum

при ЭИЛ Б'' (режим 25 / 80) С (4,1–10,4); О (2,4–23,6); Al (26,1–33,5); Ti (3,2–5,7); Cr (5,3–11,9); Ni (13,7–38,0); Zr (2,0–3,0). Установлено, что темная фаза содержит высокое количество кислорода и низкое Ni, а светлая – пониженное содержание кислорода и повышенное Ni, Zr и Cr (в светлой и серой фазах). С ужесточением режимов при ЭИЛ исследуемыми анодными материалами в ЛС снижается количество матричного материала Al, а также Ni и наблюдается небольшое снижение Ti, Zr, а также повышение Cr (при использовании Б).

Выявлено изменение элементного состава по глубине покрытия до $h = 180$ мкм при ЭИЛ анодным мате-

риалом А' (50 / 40). Нижний слой (90–180 мкм) содержит в основном Fe (89,8–94,3), а также С (5,7–15,2); О (17,2–23,0); Al (0,2–0,9). Средний (30–90 мкм) – С (10,2–31,4); О (6,0–17,2); Al (0,9–29,5); Ti (1,4–10,0); Fe (8,6–77,4); Ni (5,3–21,9); Zr (1,5–2,3). Верхний (0–30 мкм) – С (12,1–21,5); О (7,1–17,2); Al (10,4–18,0); Ti (1,40–9,42); Fe (8,1–8,6); Ni (5,3–32,6); Zr (3,3–5,6). При более жестких режимах обработки А'' (25 / 80) нижний слой (100–180 мкм) содержит Fe (до 85,2); С (14,0–33,3); О (7,1–30,1); Al (0,75–10,1). Средний – С (14,0–62,5); О (7,1–30,1); Al (0,8–10,1); Ti (1,4–5,5); Fe (4,9–20,3); Ni (до 22,0); Zr (до 1,5). Верхний – С (12,0–33,3);



O (2,6–7,1); Al (10,2–22,6); Ti (5,5–13,1); Fe (8,3–20,3); Ni (22,0–37,9); Zr (1,5–3,6). С увеличением глубины до 100–180 мкм в ЛС содержатся в основном элементы основы Fe, С, О с небольшим количеством в измененном слое матричного Al, а при ЭИЛ с более жесткими режимами E'' содержание Al, С, О возрастает. В средних и верхних слоях ЛС с уменьшением глубины уменьшается содержание Fe и возрастает количество Al, Ni, Ti и Zr, а при ЭИЛ с более жесткими режимами возрастает количество Ti, Al и уменьшается Zr.

При ЭИЛ анодным хромсодержащим АМКМ Б' (режим 50 / 40) нижний слой на глубине 90–180 мкм состоит из С (4,34–25,4); О (7,7–8,9); Al (до 1,1); Fe (до 94,5). Средний (30–90 мкм) – С (16,5–60,8); О (7,73–24,4); Al (5,0–28,5); Ti (2,64–5,1); Cr (0,4–9,8); Fe (5,1–57,3); Ni (13,7–38,0); Zr (1,1–1,3). Верхний (0–30 мкм) – С (25,5–61,5); О (8,6–27,9); Ti (до 2,6); Cr (0,38–5,70); Fe (5,1–7,0); Ni (32,4); Zr (2,0–2,97). При ужесточении режимов (25 / 80) нижний слой – С (4,3–31,5); О (4,5–10,5); Ti (0,7–4,8); Fe (до 84,8). Средний – С (31,0–46,1); О (1,42–10,5); Al (6,2–21,0); Ti (1,4–4,8); Cr (1,48–7,28); Fe (25,8); Ni (4,5–21,0); Zr (1,8–2,4). Верхний – С (31,5–36,6); О (1,4–14,8); Al (6,2–16,8); Ti (3,2–4,8); Cr (7,3–11,1); Fe (2,7–3,2); Ni (20,9–24,6); Zr (1,9–2,4). Таким образом, при ЭИЛ анодным АМКМ Б' измененный слой на глубине 90–180 мкм состоит преимущественно из Fe, а также С, О с небольшим количеством Al. С уменьшением глубины ЛС (30–90 мкм) содержание Fe сокращается, возрастает С, О и появляются связующий Ni и тугоплавкие Ti, Cr, Zr. В верхнем слое содержание Fe уменьшается на порядок и незначительно возрастает количество Cr и Zr. При ЭИЛ анодным материалом Б'' с более жесткими режимами (25 / 80) в нижнем слое (90–200 мкм), кроме материала основы, в небольшом количестве

появляется Ti; в среднем – Ti, Cr, Ni, Zr, Al, а в верхнем незначительно снижается Fe, Al и возрастает Ni, Cr.

Большой разброс значений величин элементного состава в различных местах забора проб позволяет предполагать, что при ЭИЛ стали 45 исследуемыми анодными АМКМ возможно формирование ЛС, содержащего большое разнообразие соединений стехио- и нестехиометрического состава, что и было подтверждено РФА. При этом выявлено, что наибольшее количество фаз нестехиометрического состава формируются при использовании хромсодержащего анодного АМКМ Б Al-Ti-Cr-Ni-Zr (табл. 1). Кроме того, РФА показал, что состав формируемого ЛС содержит до 40 % бертоллидных фаз переменной валентности при ЭИЛ с режимами E' и до 75 % с режимами E''. При ЭИЛ анодным материалом А образуется лишь по 1 бертоллидной фазе на всех режимах. При этом все они содержат Ni и практически все Al, который отсутствует лишь в одной из них при ЭИЛ А'. Наличие Ti также наблюдается лишь в одной бертоллидной фазе при ЭИЛ Б (Al-Ti-Cr-Ni-Zr) с режимами E' и E''.

Формирование большого разнообразия фаз при ЭИЛ можно объяснить с использованием критериев эрозионной стойкости Л. С. Палатника и термостойкости А. Д. Верхотурова, отражающих зависимости физико-механических и тепловых свойств ЛС [1; 2; 5]. Критерии отражают связь отношений периодов, соответствующих стадиям возникновения очагов плавления и интенсивного испарения в «ванне расплава» электродов при ЭИЛ, соотношения температур, теплопроводности и теплоемкости единицы объема.

Наибольшее разнообразие фаз (10) выявлено при ЭИЛ анодным материалом Б' (Al-Ti-Cr-Ni-Zr) с режимом 50 / 40 (табл. 1).

Фазовый состав ЛС при ЭИЛ стали 45
Phase composition of alloyed layer at electrospark alloying layer of steel 45

Режимы / Modes	А: Al-Ti-Ni-Zr	Б: Al-Ti-Cr-Ni-Zr
50 / 40	Al _{1,1} Ni _{0,9} ; Al ₂ NiTi; Al; Ni ₅ Zr	Al _{1,1} Ni _{0,9} ; (Al _{0,25} Ni _{0,25})(Al _{0,75} Ni _{0,75}); Ti _{0,64} Zr _{0,36} Ni; NiTi; Al ₃ Ti; ZrNiAl; Al ₄ Zr ₅ ; Al ₃ Ni ₂ ; Cr _{1,2} Ni _{0,8} Zr; AlCrNi
25 / 80	Al _{0,9} Ni _{1,1} ; Al ₂ NiTi; Zr ₂ Ni ₇	Al _{0,42} Ni _{0,58} ; Al _{0,3} Cr _{0,7} ; Zr ₂ Ni ₇ ; Ti _{27,5} Ni ₂₈ Al _{63,7}

Формирование различных фаз в составе ЛС определяет его физико-химические и эксплуатационные свойства. Выявлено, что после ЭИЛ исследуемыми анодными материалами на всех режимах микротвердость поверхности стали 45 возрастает более чем в 2 раза, а при ЭИЛ анодным материалом Б" увеличивается в 3,2 раза. Повышение твердости ЛС объясняется наличием выявленных фаз в составе ЛС. Получен ряд твердости ЛС (ряд 5*) А'→А''→Б'→Б'', в соответствии с которым при ЭИЛ АМКМ твердость стали 45 $\gamma_{ТВ(HV50)}$ возрастет в 2,1 раза при использовании режимов обработки А'; в 2,8 – при А'', а для материала Al-Ti-Cr-Ni-Zr с режимами Б' и Б'' – в 3,1 и в 3,2 раза соответственно.

«Исследования износостойкости поверхности стали 45 до и после ЭИЛ АМКМ показали, что она возрастает в 2-3 раза. Во всех случаях наблюдается быстрый рост износа в первые 2-3 мин (период приработки), далее процесс износа протекает более равномерно. При этом лучшие значения величин износостойкости получены после ЭИЛ анодным хромсодержащим АМКМ Б, показавшим лучшие значения величин во всех исследуемых режимах $\Sigma I_{лс}$ (Б" и Б') в 2,88 и 3,28 раза соответственно.

Меньшие значения повышения величин износостойкости получены для материала А $\Sigma I_{лс}$ (А" и А') в 2,3 и 2,2 раза соответственно»¹. Полученный ряд износостойкости ЛС А'→А''→Б'→Б''(ряд 6*) совпадает с рядом твердости. При этом износ стали 45 без покрытия составил $\Sigma I_{(ст45)} = 72 \cdot 10^{-4}$ г, а лучшие значения величин износостойкости при ЭИЛ в полученном ряду у анодного материала Б" и Б' $\Sigma I_{лс} = 22 \cdot 10^{-4}$ и $25 \cdot 10^{-4}$ г соответственно при режимах 25 / 80 и 50 / 40; худшие – А" и А' $\Sigma I_{лс} = 31 \cdot 10^{-4}$ и $33 \cdot 10^{-4}$ г.

Исследования жаростойкости при нагреве образцов со скоростью 100 °С / 10 мин до 800 °С и последующей выдержкой в течении 1 ч на воздухе показали, что после ЭИЛ поверхности образцов с использованием анодных АМКМ наблюдается значительно меньшее окисление в сравнении с образцами стали 45 без покрытия. В частности после ЭИЛ анодным материалом А" с режимом 25 / 80 жаростойкость поверхности возросла в 5,7 раза, при режимах А' и Б'' – в 7,4 и 7,6 раза соответственно. Наилучшие значения величин повышения жаростойкости (в 18,9 раза) наблюдались при ЭИЛ анодным хромсодержащим материалом Б' и режиме 50 / 40. Получен следующий ряд

¹ **Ким Е. Д.** Получение методом СВС-металлургии новых металломатричных сплавов и электродных материалов для электроискрового легирования: дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2020. 177 с.

жаростойкости ЛС стали 45 (ряд 7*): $A'' \rightarrow A' \rightarrow B'' \rightarrow B'$. Он не совпадает ни с одним из вышеуказанных рядов.

«При формировании ЛС важной составляющей оценки ЭИЛ является эффективность метода $\gamma_{\text{эф.элл}}$, которая зависит от свойств анодного материала, материала подложки, межэлектродной среды, режимов обработки, характера массопереноса, формирования «вторичных структур» ЛС и его разрушения под действием импульсных термомеханических нагрузок, времени $t_{\text{элл}}$, удельной площади поверхности $1 \text{ см}^2_{\text{элл}}$, других факторов» [1]. Составляющими звеньями эффективности формирования ЛС $\gamma_{\Sigma\text{эф.лс}}$ являются критерий формирования ЛС $\gamma_{\text{ф.лс}}$ и суммарный показатель свойств ЛС $\gamma_{\Sigma\text{св.лс}}$, зависящий от свойств ЛС, определяемых показателями его функционального назначения: твердость $\gamma_{\text{тв(Нв)}}$; жаростойкость $\gamma_{\text{жар(ΣНr)}}$; износостойкость $\gamma_{\text{изн(ΣИлс)}}$ и др. Важным может быть суммарный показатель энергозатрат $\gamma_{\text{эф.элл}} / E$, например, при сравнении метода ЭИЛ с другими методами формирования покрытий [2; 6]:

$$\begin{aligned} \gamma_{\Sigma\text{св.лс}} &= \gamma_{\text{тв(Нв)}} \cdot \gamma_{\text{жар(ΣНr)}} \cdot \gamma_{\text{изн(ΣИлс)}}, \text{ др.}, \\ \gamma_{\Sigma\text{эф.лс}} &= \gamma_{\text{ф.лс}} \cdot \gamma_{\Sigma\text{св.лс}}, \\ \gamma_{\text{эф.элл}} / E &= \gamma_{\text{ф.лс}} \cdot \gamma_{\Sigma\text{св.лс}} / E. \end{aligned}$$

В рассматриваемом случае показатель $\gamma_{\Sigma\text{эф.лс}}$ является обобщающим для составляющих его частных показателей $\Sigma\Delta_{\text{к}}$, $\Sigma\Delta_{\text{а}}$, $K_{\text{п.ср.}}$, $\gamma_{\text{ф.лс}}$. Одним из важнейших показателей формирования ЛС является $\gamma_{\text{ф.лс}}$, который зависит от анодного материала, режимов, времени обработки, исследуемых величин скважности $t_{\text{ск}}$, длительности разрядного импульса $t_{\text{р}}$. Используя энергетический показатель $\gamma_{\text{эф.элл}} / E$, можно дать оценку эффективности процесса ЭИЛ по затрачиваемой энергии при формировании ЛС, так как массоперенос «анод – катод» зависит как от длительности и частоты импульсов, так и от

энергии в импульсе: $E' = 3,12 \text{ Дж}$, $E'' = 14,4 \text{ Дж}$. Некоторые показатели эффективности при ЭИЛ стали 45 АМКМ анодными материалами и ряды значений величин параметров приведены в таблице 2.

Полученные ряды являются удобным инструментом для формулировки рекомендаций достижения тех или иных параметров эффективности при ЭИЛ в зависимости от выбора анодного материала и режимов обработки. Например, для получения большей величины привеса катода при ЭИЛ исследуемыми анодными АМКМ следует использовать материал Б'', обеспечивающий в 1,5 раза больший привес, чем материал А', и назначать режим с энергией $E'' = 14,4 \text{ Дж}$, дающий в 1,8 раза меньшую эрозионную стойкость в сравнении с Б'. Если будет поставлена задача экономии анодного АМКМ, то, наоборот, следует использовать материал Б', обеспечивающий в 1,3 раза меньший электромассоперенос, в 18,9 раза более высокую жаростойкость, в сравнении с А'', и в 1,8 раза более высокую эрозионную стойкость, чем Б'. Для получения больших значений величин твердости и износостойкости следует применять материал и режимы Б''. Ряд критерия формирования ЛС показывает, что наиболее высокие значения величин обеспечивает анодный АМКМ с режимами А'' – более чем в 1,5 раза в сравнении с А'. Однако суммарную эффективность свойств при формировании ЛС можно достичь при выборе анодного хромсодержащего материала Б'' (Al-Ti-Cr-Ni-Zr), показывающего значения величин в 4,2-4,3 раза лучшие, чем при ЭИЛ в тех же режимах материала Al-Ti-Ni-Zr. Если же будет поставлена задача экономии энергии, то суммарный эффект при ЭИЛ показывает ряд эффективности энергозатрат, в соответствии с которыми анодный АМКМ Б' (Al-Ti-Cr-Ni-Zr)

Некоторые значения величин, полученных при исследованиях
Some values obtained during the research

Режим / Modes	A' (50 / 40)	B' (50 / 40)	A'' (25 / 80)	B'' (25 / 80)	Ряды значений величин параметров / Series of parameter values
$\Sigma\Delta_{\kappa(10\text{мин})}$	13,10000	14,30000	19,60000	20,20000	A' → B' → A'' → B''
$\Sigma K_{\text{п.ср.}}$	0,10000	0,11400	0,10400	0,08500	B'' → A' → A'' → B'
$\gamma_{\text{ф.лс}}$	13,10000	16,30000	20,40000	17,20000	A' → B' → B'' → A''
$\gamma_{\text{тв(Нv)}}$	2,08000	3,06000	2,77000	3,20000	A' → A'' → B' → B''
$\gamma_{\text{жар}(\Sigma Hr)}$	7,64000	18,90000	7,38000	5,73000	A'' → A' → B'' → B'
$\gamma_{\text{изн}(\Sigma \text{Илс})}$	2,18000	2,88000	2,32000	3,28000	A' → A'' → B' → B''
$\Sigma\Delta_{\text{а(эп.ст.10мин)}}^{-1}$	0,00259	0,00432	0,00255	0,00244	B'' → A' → A'' → B'
$\gamma_{\Sigma\text{эф.эил}}$	1,14000	4,74000	1,91000	8,31000	A' → A'' → B' → B''
$\gamma_{\text{эф.эил}} / E$	0,36000	1,52000	0,13000	0,58000	A'' → A' → B'' → B'

Примечание: $\Sigma\Delta_{\kappa(10\text{мин})}$ – привес катода, $\cdot 10^{-3}$ г; $\Sigma\Delta_{\text{а(эп.ст.10мин)}}^{-1}$ – эрозионная стойкость анода, $1/\text{г} \cdot 10^{-3}$.
Note: $\Sigma\Delta_{\kappa(10\text{мин})}$ – cathode weight, $\cdot 10^{-3}$ g; $\Sigma\Delta_{\text{а(эп.ст.10мин)}}^{-1}$ – anode erosion resistance, $1/\text{g} \cdot 10^{-3}$.

использовать выгоднее в 2,6–2,8 раза при тех же условиях с режимами $E' = 3,12$ Дж. При этом ряд эффективности энергозатрат совпадает с рядом жаростойкости ЛС для всех исследуемых анодных АМКМ и режимов.

Обсуждение и заключение

При ЭИЛ стали 45 АМКМ ЛС содержит большое разнообразие соединений стехио- и нестехиометрического составов: до 40 % бертоллидных фаз переменной валентности при ЭИЛ с режимами E' и до 75 % с режимами E'' . Все бертоллидные фазы содержат Ni, и практически все – Al. Наибольшее количество фаз нестехиометрического состава формируется при использовании анодного хромсодержащего материала Al-Ti-Cr-Ni-Zr.

После ЭИЛ стали 45 новыми анодными АМКМ твердость

и износостойкость поверхности возрастают в 2-3 раза, жаростойкость – в 5–18 раз. Лучшие значения свойств ЛС получены для анодного материала Al-Ti-Cr-Ni-Zr с добавкой Cr при режимах $E'' = 14,4$ Дж.

Получены ряды увеличения массы катода $\Sigma\Delta_{\kappa}$, эрозионной стойкости электродных материалов $\Sigma\Delta_{\text{а(эп.ст.)}}^{-1}$, коэффициента массопереноса $K_{\text{п.ср.}}$, эффективности формирования ЛС $\gamma_{\text{ф.лс}}$, жаростойкости $\gamma_{\text{жар}(\Sigma Hr)}$, твердости $\gamma_{\text{тв(Нv)}}$, износостойкости ЛС $\gamma_{\text{изн}(\Sigma \text{Илс})}$, суммарной эффективности свойств ЛС $\gamma_{\Sigma\text{эф.эил}}$, энергетической эффективности ЭИЛ $\gamma_{\text{эф}} / E$ и приведены примеры их использования для формулировки рекомендаций по достижению требуемых параметров искрового воздействия при ЭИЛ сталей, созданных анодными АМКМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Панфилов, А. А.** Особенности металлургических процессов при выплавке алюмоматричных композиционных сплавов / А. А. Панфилов, Е. С. Прусов, В. А. Кечин // *Литейщик России*. – 2018. – № 11. – С. 10–13. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36455377> (дата обращения: 15.05.2021). – Рез. англ.
2. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров, В. И. Иванов, А. С. Дорохов [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201803.302-320 // *Вестник Мордовского университета*. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 302–320. – Рез. англ.
3. Использование функционально-градиентных материалов при электроискровом легировании углеродистых сталей / С. В. Николенко, П. С. Гордиенко, Л. А. Коневцов [и др.] // *Технология машиностроения*. – 2019. – № 10. – С. 5–13. – URL: http://www.ic-tm.ru/info/10_28 (дата обращения: 15.05.2021).
4. Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов / В. Д. Власенко, В. И. Иванов, В. Ф. Аулов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201902.218-233 // *Инженерные технологии и системы*. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 218–233. – Рез. англ.
5. Композиционные СВС-материалы на основе карбида и никелида титана, легированные тугоплавким нанокomпонентом / Ю. С. Погожев, Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов [и др.] // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2012. – № 2. – С. 24–32. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17896181> (дата обращения: 15.05.2021).
6. Nano-Scale Multilayered-Composite Coatings for the Cutting Tools / А. А. Vereshchaka, А. S. Vereshchaka, О. Mgaloblishvili [et al.]. – DOI 10.1007/s00170-014-5673-2 // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 72, Issue 1. – Pp. 303–317.
7. **Верещака, А. А.** Функциональные покрытия для режущих инструментов / А. А. Верещака // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2015. – № 4 (48). – С. 25–36. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24985862> (дата обращения: 15.05.2021). – Рез. англ.
8. Consolidation of Aluminum-Based Metal Matrix Composites via Spark Plasma Sintering / G. A. Sweet, M. Brochu, R. L. Hexemer Jr. [et al.]. – DOI 10.1016/j.msea.2015.09.027 // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 648. – Pp. 123–133.
9. Fabrication and Properties of SiCp/Al Composites by Pulsed Electric Current Sintering / M. Yang, D. Zhang, X. Gu, L. Zhang. – DOI 10.1007/s10853-005-1814-1 // *Journal of Materials Science*. – 2005. – Vol. 40. – Pp. 5029–5031.
10. Effect of Fabrication Process on the Microstructure and Dynamic Compressive Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering / J.-T. Zhang, L.-Sh. Liu, P.-Ch. Zhai [et al.]. – DOI 10.1016/j.matlet.2007.04.118 // *Materials Letters*. – 2008. – Vol. 62, Issue 3. – Pp. 443–446.
11. Thermal Conductivity of Spark Plasma Sintering Consolidated SiCp/Al Composites Containing Pores: Numerical Study and Experimental Validation / K. Chu, C. Jia, W. Tian [et al.]. – DOI 10.1016/j.compositesa.2009.10.001 // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2010. – Vol. 41, Issue 1. – Pp. 161–167.
12. Processing of Al/SiC Composites in Continuous Solid-Liquid Co-Existent State by SPS and Their Thermal Properties / K. Mizuuchi, K. Inoue, Y. Agari [et al.]. – DOI 10.1016/j.compositesb.2012.02.004 // *Composites Part B: Engineering*. – 2012. – Vol. 43, Issue 4. – Pp. 2012–2019.
13. Preparation and Mechanical Properties of SiC-Reinforced Al6061 Composite by Mechanical Alloying / N. Parvin, R. Assadifard, P. Safarzadeh [et al.]. – DOI 10.1016/j.msea.2008.05.004 // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol. 492, Issue 1–2. – Pp. 134–140.
14. Properties of Submicron AlN Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composite / J. Wang, D. Yi, X. Su [et al.]. – DOI 10.1016/j.matdes.2008.04.039 // *Materials and Design*. – 2009. – Vol. 30, Issue 1. – Pp. 78–81.
15. Preparation of Metal Matrix Aluminum Alloys Composites Reinforced by Silicon Nitride and Aluminum Nitride through Powder Metallurgy Techniques / E. R. Araujo, M. S. Souza, F. A. Filho *Electrotechnologies and electrical equipment in agriculture*

[et al.]. – DOI [10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.259](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.259). – Текст : электронный // Materials Science Forum. – 2012. – Vol. 727–728.

16. Effects of SiC Particle Size on CTEs of SiCp/Al Composites by Pulsed Electric Current Sintering / M. J. Yang, D. M. Zhang, X. F. Gu, L. M. Zhang. – DOI [10.1016/j.matchemphys.2005.10.019](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.10.019) // Materials Chemistry and Physics. – 2006. – Vol. 99, Issue 1. – Pp. 170–173.

17. **Saberi, Y.** On the Role of Nano-Size SiC on Lattice Strain and Grain Size of Al/SiC Nanocomposite / Y. Saberi, S. M. Zebarjad, G. H. Akbari. – DOI [10.1016/j.jallcom.2009.05.009](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.009) // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 484, Issue 1–2. – Pp. 637–640.

18. **Tang, F.** Solid State Sintering and Consolidation of Al Powders and Al Matrix Composites / F. Tang, I. Anderson, S. Biner. – DOI [10.1016/S1471-5317\(03\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(03)00004-X) // Journal of Light Metals. – 2002. – Vol. 2, Issue 4. – Pp. 201–214.

19. The Dynamic Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering with Powders Prepared by Mechanical Alloying Process / J. Zhang, H. Shi, M. Cai [et al.]. – DOI [10.1016/j.msea.2009.08.067](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.08.067) // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 527, Issue 1–2. – Pp. 218–224.

20. Microstructural and Mechanical Study of an Al Matrix Composite Reinforced by Al-Cu-Fe Icosahedral Particles / G. Laplanche, A. Joulain, J. Bonneville [et al.]. – DOI [10.1557/jmr.2010.0118](https://doi.org/10.1557/jmr.2010.0118) // Journal of Materials Research. – 2010. – Vol. 25, Issue 5. – Pp. 957–965.

21. Application of SHS Processes for in Situ Preparation of Alumomatrix Composite Materials Discretely Reinforced by Nanodimensional Titanium Carbide Particles (Review) / A. P. Amosov, A. R. Luts, E. I. Latuhin, A. A. Ermoshkin. – DOI [10.3103/S1067821216020024](https://doi.org/10.3103/S1067821216020024) // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2016. – Vol. 57. – Pp. 106–112.

22. **Панфилов, Л. А.** Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов / Л. А. Панфилов, Е. С. Прусов, В. А. Кечин // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2013. – № 2 (99). – С. 210–217. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20173605> (дата обращения: 15.05.2021). – Рез. англ.

23. Influence of SiC and Al₂O₃ Particulate Reinforcements and Heat Treatments on Mechanical Properties and Damage Evolution of Al-2618 Metal Matrix Composites / M. Tan, Q. Xin, Z. Li [et al.]. – DOI [10.1023/A:1017591117670](https://doi.org/10.1023/A:1017591117670) // Journal of Materials Science. – 2001. – Vol. 36, Issue 8. – Pp. 2045–2053.

24. **Gupta, N.** The Solidification Processing of Metal-Matrix Composites: The Rohatgi Symposium / N. Gupta, K. G. Satyanarayana. – DOI [10.1007/s11837-006-0236-0](https://doi.org/10.1007/s11837-006-0236-0) // JOM. – 2006. – Vol. 58, Issue 11. – Pp. 92–94.

25. **Song, M.** Effects of Volume Fraction of SiC Particles on Mechanical Properties of SiC/Al Composites / M. Song. – DOI [10.1016/S1003-6326\(09\)60040-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60040-6) // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2009. – Vol. 19, Issue 6. – Pp. 1400–1404.

26. **Narayanasamy, R.** Effect of Particle Size of SiC in Aluminium Matrix on Workability and Strain Hardening Behaviour of P/M Composite / R. Narayanasamy, T. Ramesh, M. Prabhakar. – DOI [10.1016/j.msea.2008.11.037](https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.037) // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 504, Issue 1–2. – Pp. 13–23.

27. **Wannasin, J.** Fabrication of Metal Matrix Composites by a High-Pressure Centrifugal Infiltration Process / J. Wannasin, M. C. Flemings // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 169, Issue 2. – Pp. 143–149. – URL: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=483666> (дата обращения: 15.05.2021).

28. **Bauria, R.** Processing and Properties of Al–Li–SiCp Composites / R. Bauria, M. K. Surappa. – DOI [10.1016/j.stam.2007.07.004](https://doi.org/10.1016/j.stam.2007.07.004) // Science and Technology of Advanced Materials. – 2007. – Vol. 8, Issue 6. – Pp. 494–502.

29. Трибологические характеристики и коррозионная стойкость покрытий, полученных методами электроискрового легирования, импульсного катодно-дугового испарения и гибридной технологии с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr-Dy₂O₃ / А. Д. Сытченко, А. Н. Шевейко, Е. А. Левашов, Ф. В. Кирюханцев-Корнеев. – DOI [10.17073/0021-3438-2020-2-73-79](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79) // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2020. – № 2. – С. 73–79. – Рез. англ.

30. Эрозионная и абразивная стойкость, механические свойства и структура покрытий TiN, Ti–Cr–Al–N и Cr–Al–Ti–N, полученных методом CFUBMS / Ф. В. Кирюханцев-Корнеев, Дж. Фири, В. И. Гладков [и др.]. – DOI [10.1134/S0044185619050127](https://doi.org/10.1134/S0044185619050127) // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2019. – Т. 55, № 5. – С. 546–556.
31. **Kiryukhantsev-Korneev, Ph. V.** Comparative Study of Coatings Formed by Electrospark Alloying Using TiC–NiCr and TiC–NiCr–Eu2O3 Electrodes / Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev, A. D. Sytchenko, E. A. Levashov. – DOI [10.3103/S1067821219060099](https://doi.org/10.3103/S1067821219060099) // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2019. – Vol. 60, Issue 6. – Pp. 662–672.
32. Гибридная технология осаждения твердых износостойких покрытий, сочетающая процессы электроискрового легирования, катодно-дугового испарения и магнетронного напыления / А. Н. Шевейко, К. А. Купцов, Ф. В. Кирюханцев-Корнеев [и др.]. – DOI [10.17073/1997-308X-2018-4-92-103](https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-92-103) // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2018. – № 4. – С. 92–103. – Рез. англ.
33. Review of Metal Matrix Composites with High Thermal Conductivity for Thermal Management Applications / X. Qu, L. Zhang, M. Wu, S. Ren. – DOI [10.1016/S1002-0071\(12\)60029-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60029-X) // Progress in Natural Science: Materials International. – 2011. – Vol. 21, Issue 3. – Pp. 189–197.
34. The Fabrication Process and Mechanical Properties of SiCp/Al–Si Metal Matrix Composites for Automobile Air-Conditioner Compressor Pistons / H. S. Lee, J. S. Yeo, S. H. Hong, D. J. Yoon. – DOI [10.1016/S0924-0136\(01\)00680-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00680-X) // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 113, Issue 1–3. – Pp. 202–208.
35. **Hunt Jr., W. H.** Aluminum Metal Matrix Composites Today / W. H. Hunt Jr. – DOI [10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.71](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.71) // Materials Science Forum. – 2000. – Vol. 331–337. – Pp. 71–84.
36. **Suganuma, K.** Whisker/Matrix Interface Microstructure in 6061 Aluminum Composite Reinforced with α -Silicon Nitride Whisker / K. Suganuma. – DOI [10.1163/156855494X00030](https://doi.org/10.1163/156855494X00030) // Composite Interfaces. – 1994. – Vol. 2. – Pp. 15–27.
37. Processing and Surface Properties of Al–AlN Composites Produced from Nanostructured Milled Powders / H. Abdoli, E. Saebnouri, S. K. Sadrnezhad [et al.]. – DOI [10.1016/j.jallcom.2009.10.121](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.121) // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 490, Issue 1–2. – Pp. 624–630.
38. Thermal Conductivity Behavior of SPS Consolidated AlN/Al Composites for Thermal Management Applications / B. Dun, X. Jia, C. Jia [et al.]. – DOI [10.1007/s12598-011-0222-8](https://doi.org/10.1007/s12598-011-0222-8) // Rare Metals. – 2011. – Vol. 30, Issue 2. – Pp. 189–194.

Поступила 20.05.2021; одобрена после рецензирования 25.06.2021; принята к публикации 05.07.2021

Об авторах:

Николенко Сергей Викторович, и. о. директора ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук» (680042, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153), доктор технических наук, Researcher ID: [A-4229-2012](https://orcid.org/0000-0003-4474-5795), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4474-5795>, nikola1960@mail.ru

Коневцов Леонид Алексеевич, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук» (680042, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153), кандидат технических наук, Researcher ID: [H-4087-2018](https://orcid.org/0000-0002-7212-3953), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7212-3953>, konevts@narod.ru

Гордиенко Павел Сергеевич, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук» (690022, Российская Федерация, г. Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, д. 159), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: [AAS-7040-2021](https://orcid.org/0000-0003-1537-2977), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1537-2977>, pavel.gordienko@mail.ru

Панин Евгений Савельевич, научный сотрудник ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук» (690022, Российская Федерация, г. Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, д. 159), кандидат химических наук, Researcher ID: [AAS-7013-2021](https://orcid.org/0000-0002-8980-275X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8980-275X>, panin26@yandex.ru

Величко Сергей Анатольевич, профессор кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, Researcher ID: G-9021-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, velichko2005@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

- С. В. Николенко – формулирование основной концепции исследования и анализ результатов.
- Л. А. Коневцов – методическое руководство.
- П. С. Гордиенко – план статьи и ее написание.
- Е. С. Панин – экспериментальные исследования.
- С. А. Величко – формирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Panfilov A.A., Prusov E.S., Kechin V.A. Features of Metallurgical Processes at the Melting of Aluminum Matrix Compositional Alloys. *Liteyshchik Rossii = Foundryman of Russia*. 2018; (11):10-13. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36455377> (accessed 15.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Verkhoturov A.D., Ivanov V.I., Dorokhov A.S., et al. Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospark Alloying. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018; 28(3):302-320. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>
3. Nikolenko S.V., Gordienko P.S., Konevtsov L.A., et al. [Use of Functionally Graded Materials in Electrospark Alloying of Carbon Steels]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Technology of Mechanical Engineering*. 2019; (10):5-13. Available at: http://www.ic-tm.ru/info/10_28 (accessed 15.05.2021). (In Russ.)
4. Vlasenko V.D., Ivanov V.I., Aulov V.F., et al. Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2019; 29(2):218-233. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
5. Pogozhev Yu.S., Levashov Ye.A., Kudryashov A.Ye., et al. [Composite SHS Materials Based on Titanium Carbide and Nickelide, Alloyed with Refractory Nanocomponents]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2012; (2):24-32. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17896181> (accessed 15.05.2021). (In Russ.)
6. Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Mgaloblishvili O., et al. Nano-Scale Multilayered-Composite Coatings for the Cutting Tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014; 72(1):303-317. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5673-2>
7. Vereshchaka A.A. Functional Coatings for Cutters. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2015; (4):25-36. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24985862> (accessed 15.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Sweet G.A., Brochu M., Hexemer Jr. R. L., et al. Consolidation of Aluminum-Based Metal Matrix Composites via Spark Plasma Sintering. *Materials Science and Engineering: A*. 2015; 648:123-133. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.027>
9. Yang M., Zhang D., Gu X., Zhang L. Fabrication and Properties of SiCp/Al Composites by Pulsed Electric Current Sintering. *Journal of Materials Science*. 2005; 40:5029-5031. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1814-1>



10. Zhang J.-T., Liu L.-Sh., Zhai P.-Ch., et al. Effect of Fabrication Process on the Microstructure and Dynamic Compressive Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering. *Materials Letters*. 2008; 62(3):443-446. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.118>
11. Chu K., Jia C., Tian W., et al. Thermal Conductivity of Spark Plasma Sintering Consolidated SiCp/Al Composites Containing Pores: Numerical Study and Experimental Validation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010; 41(1):161-167. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.001>
12. Mizuuchi K., Inoue K., Agari Y., et al. Processing of Al/SiC Composites in Continuous Solid-Liquid Co-Existent State by SPS and Their Thermal Properties. *Composites Part B: Engineering*. 2012; 43(4):2012-2019. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.02.004>
13. Parvin N., Assadifard R., Safarzadeh P., et al. Preparation and Mechanical Properties of SiC-Reinforced Al6061 Composite by Mechanical Alloying. *Materials Science and Engineering A*. 2008; 492(1-2):134-140. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.004>
14. Wang J., Yi D., Su X., et al. Properties of Submicron AlN Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composite. *Materials and Design*. 2009; 30(1):78-81. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.039>
15. Araujo E.R., Souza M.S., Filho F.A., et al. Preparation of Metal Matrix Aluminum Alloys Composites Reinforced by Silicon Nitride and Aluminum Nitride through Powder Metallurgy Techniques. *Materials Science Forum*. 2012; 727-728. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.259>
16. Yang M.J., Zhang D.M., Gu X.F., Zhang L.M. Effects of SiC Particle Size on CTEs of SiCp/Al Composites by Pulsed Electric Current Sintering. *Materials Chemistry and Physics*. 2006; 99(1):170-173. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.10.019>
17. Saberi Y., Zebarjad S.M., Akbari G.H. On the Role of Nano-Size SiC on Lattice Strain and Grain Size of Al/SiC Nanocomposite. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009; 484(1-2):637-640. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.009>
18. Tang F., Anderson I., Biner S. Solid State Sintering and Consolidation of Al Powders and Al Matrix Composites. *Journal of Light Metals*. 2002; 2(4):201-214. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(03\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(03)00004-X)
19. Zhang J., Shi H., Cai M., et al. The Dynamic Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering with Powders Prepared by Mechanical Alloying Process. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 527(1-2):218-224. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.08.067>
20. Laplanche G., Joulain A., Bonneville J., et al. Microstructural and Mechanical Study of an Al Matrix Composite Reinforced by Al-Cu-Fe Icosahedral Particles. *Journal of Materials Research*. 2010; 25(5):957-965. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2010.0118>
21. Amosov A.P., Luts A.R., Latuhin E.I., Ermoshkin A.A. Application of SHS Processes for in Situ Preparation of Alumomatrix Composite Materials Discretely Reinforced by Nanodimensional Titanium Carbide Particles (Review). *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016; 57:106-112. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1067821216020024>
22. Panfilov A.A., Prusov E.S., Kechin V.A. Problems and Prospects of Development of Production and Application Alyumomatrixnykh of Composite Alloys. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseeva = Works of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University*. 2013; (2):210-217. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20173605> (accessed 15.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Tan M., Xin Q., Li Z., et al. Influence of SiC and Al₂O₃ Particulate Reinforcements and Heat Treatments on Mechanical Properties and Damage Evolution of Al-2618 Metal Matrix Composites. *Journal of Materials Science*. 2001; 36(8):2045-2053. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1017591117670>
24. Gupta N., Satyanarayana K.G. The Solidification Processing of Metal-Matrix Composites: The Rohatgi Symposium. *JOM*. 2006; 58(11):92-94. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0236-0>
25. Song M. Effects of Volume Fraction of SiC Particles on Mechanical Properties of SiC/Al Composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2009; 19(6):1400-1404. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60040-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60040-6)

26. Narayanasamy R., Ramesh T., Prabhakar M. Effect of Particle Size of SiC in Aluminium Matrix on Workability and Strain Hardening Behaviour of P/M Composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 504(1-2):13-23. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.037>
27. Wannasin J., Flemings M.C. Fabrication of Metal Matrix Composites by a High-Pressure Centrifugal Infiltration Process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005; 169(2):143-149. Available at: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=483666> (accessed 15.05.2021). (In Eng.)
28. Bauria R., Surappa M.K. Processing and Properties of Al–Li–SiCp Composites. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2007; 8(6):494-502. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stam.2007.07.004>
29. Sytchenko A.D., Sheveyko A.N., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V. Tribological Characteristics and Corrosion Resistance of Coatings Obtained by Electrospark Alloying, Pulsed Cathodic Arc Evaporation and Hybrid Technology Using TiNiCr and TiNiCr–Dy2O3 Electrodes. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = News of Higher Schools. Non-Ferrous Metallurgy*. 2020; (2):73-79. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79>
30. Kiryukhantsev-Korneev F.V., Phiri J., Gladkov V.I., [et al.]. [Erosion and Abrasion Resistance, Mechanical Properties and Structure of Coatings TiN, Ti–Cr–Al–N и Cr–Al–Ti–N, obtained by CFUBMS method]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Surface Physicochemistry and Material Protection*. 2019; 55(5):546-556. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0044185619050127>
31. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sytchenko A.D., Levashov E.A. Comparative Study of Coatings Formed by Electrospark Alloying Using TiC–NiCr and TiC–NiCr–Eu2O3 Electrodes. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2019; 60(6):662-672. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1067821219060099>
32. Sheveyko A.N., Kuptsov K.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V., et al. Hybrid Technology Combining Electrospark Alloying, Cathodic Arc Evaporation and Magnetron Sputtering for Hard Wear-Resistant Coating Deposition. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = News of Higher Schools. Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2018;(4):92-103. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-92-103>
33. Qu X., Zhang L., Wu M., Ren S. Review of Metal Matrix Composites with High Thermal Conductivity for Thermal Management Applications. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2011; 21(3):189-197. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0071\(12\)60029-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60029-X)
34. Lee H.S., Yeo J.S., Hong S.H., Yoon D.J. The Fabrication Process and Mechanical Properties of SiCp/Al–Si Metal Matrix Composites for Automobile Air-Conditioner Compressor Pistons. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001; 113(1-3):202-208. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00680-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00680-X)
35. Hunt Jr. W.H. Aluminum Metal Matrix Composites Today. *Materials Science Forum*. 2000; 331-337:71-84. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.71>
36. Suganuma K. Whisker/Matrix Interface Microstructure in 6061 Aluminum Composite Reinforced with α -Silicon Nitride Whisker. *Composite Interfaces*. 1994; 2:15-27. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1163/156855494X00030>
37. Abdoli H., Saebnouri E., Sadrnezhad S.K., et al. Processing and Surface Properties of Al–AlN Composites Produced from Nanostructured Milled Powders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010; 490(1-2):624-630. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.121>
38. Dun B., Jia X., Jia C., et al. Thermal Conductivity Behavior of SPS Consolidated AlN/Al Composites for Thermal Management Applications. *Rare Metals*. 2011; 30(2):189-194. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12598-011-0222-8>

Received 20.05.2021; approved after reviewing 25.06.2021; accepted for publication 05.07.2021

*About the authors:*

Sergey V. Nikolenko, Acting Director of Institute of Materials Science of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (153 Tikhookeanskaya St., Khabarovsk 680042, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Researcher ID: [A-4229-2012](https://orcid.org/0000-0003-4474-5795), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4474-5795>, nikola1960@mail.ru

Leonid A. Konevtsov, Senior Researcher, Institute of Materials Science of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (153 Tikhookeanskaya St., Khabarovsk 680042, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: [H-4087-2018](https://orcid.org/0000-0002-7212-3953), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7212-3953>, konevts@narod.ru

Pavel S. Gordienko, Leading Researcher, Institute of Chemistry of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (159 Vladivostok Centenary Prospect, Vladivostok 690022, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: [AAS-7040-2021](https://orcid.org/0000-0003-1537-2977), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1537-2977>, pavel.gordienko@mail.ru

Eugenii S. Panin, Researcher, Institute of Chemistry of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (159 Vladivostok Centenary Prospect, Vladivostok 690022, Russian Federation), Cand.Sc. (Chem.), Researcher ID: [AAS-7013-2021](https://orcid.org/0000-0002-8980-275X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8980-275X>, panin26@yandex.ru

Sergey A. Velichko, Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Researcher ID: [G-9021-2018](https://orcid.org/0000-0001-6254-5733), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, velichko2005@yandex.ru

Contribution of the authors:

S. V. Nikolenko – formulation of the basic research concept and analysis of the results.

L. A. Konevtsov – methodological guide.

P. S. Gordienko – writing the draft.

E. S. Panin – experimental studies.

S. A. Velichko – formulation of conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.