



Разработка технологического процесса получения и исследование металлокерамических электродов на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY

И.А. Назарько^{a,b}✉, А.П. Чижиков^b , М.С. Антипов^b , П.М. Бажин^{a,b}

^a Российский университет дружбы народов имени, Москва, Российская Федерация

^b Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, Черноголовка, Российская Федерация
✉ nazarkovanya@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 ноября 2025 г.
Доработана: 21 января 2026 г.
Принята к публикации: 5 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Представлен разработанный технологический процесс получения металлокерамических электродов на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с последующим деформированием (свободное СВС-сжатие), предназначенных для нанесения покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания новых электродов с улучшенными физико-механическими характеристиками для повышения износостойкости и долговечности машиностроительных деталей при одновременном снижении стоимости и энергоёмкости процессов нанесения защитных покрытий. Показано, что ЭИЛ является перспективным методом упрочнения поверхностей, эффективность которого в значительной степени определяется свойствами применяемых электродных материалов. Предложена комплексная технологическая схема, включающая приготовление порошковых заготовок, синтез и получение компактных материалов методом свободного СВС-сжатия и оценку их механических и структурных характеристик. Фазовый состав изучен методом рентгеноструктурного анализа (РФА), а особенности строения — методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Установлены закономерности влияния состава и параметров свободного СВС-сжатия на формирование структуры и эксплуатационные свойства полученных металлокерамических электродов. Показано, что разработанный подход обеспечивает получение электродов с улучшенным комплексом свойств, перспективных для применения в технологии ЭИЛ с целью повышения износостойкости и надёжности деталей машиностроения.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электрод, металлокерамический композит, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, СВС-сжатие, карбид титана

Вклад авторов

Назарько И.А. — проведение исследований, написание текста, подготовка статьи к публикации, методология, формальный анализ; Чижиков А.П. — проведение исследований, методология; Антипов М.С. — проведение исследований, методология; Бажин П.М. — разработка концепции исследования, научное руководство, написание текста, формальный анализ. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.



Финансирование

Работа подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания ИСМАН, код (шифр) научной темы № ЦИТИС — 125021201986-5.

Для цитирования

Назарько И.А., Чижиков А.П., Антипов М.С., Бажин П.М. Разработка технологического процесса получения и исследование металлокерамических электродов на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 170–181. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-170-181> EDN: KWZCUV

Development of a Technological Process for Producing and Investigation of Cermet Electrodes Based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY

Ivan A. Nazarko^{a,b}✉, Andrey P. Chizhikov^b, Mikhail S. Antipov^b, Pavel M. Bazhin^{a,b}

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bMerzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation

✉ nazarkovanya@yandex.ru

Article history

Received: November 29, 2025

Revised: January 21, 2026

Accepted: February 5, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. This study presents a developed technological process for producing cermet electrodes based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY using self-propagating high-temperature synthesis followed by deformation (free SHS compression), intended for applying coatings via electro spark alloying (ESA). The relevance of the study is determined by the need to create new electrodes with improved physical and mechanical characteristics to enhance the wear resistance and service life of machine components while reducing the cost and energy intensity of protective coating application processes. It is shown that ESA is a promising surface hardening method, the efficiency of which is largely determined by the properties of the electrode materials used. A comprehensive technological scheme is proposed, including the preparation of powder preforms, synthesis and production of compact materials by free SHS compression, and evaluation of their mechanical and structural characteristics. The phase composition was studied using X-ray diffraction (XRD), and the structural features were examined by scanning electron microscopy (SEM). The regularities of the influence of the component composition and parameters of free SHS compression on the structure formation and operational properties of the cermet electrodes have been established. It is shown that the developed approach ensures the production of electrodes with an improved combination of properties, promising for application in ESA technology to enhance the wear resistance and reliability of machine components.

Keywords: electro spark alloying, electrode, cermet composite, self-propagating high-temperature synthesis, SHS compression, titanium carbide

Authors' contribution

Nazarko I.A. — conducting research, writing, preparing an article for publication, methodology, formal analysis; Chizhikov A.P. — conducting research, methodology; Antipov M.S. — conducting research, methodology; Bazhin P.M. — developing a research concept, scientific guidance, writing, formal analysis. All the authors have read the final version of the article and approved it.

Funding

The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the ISMAN state assignment, scientific topic code No. CITIS — 125021201986-5.

For citation

Nazarko IA, Chizhikov AP, Antipov MS, Bazhin PM. Development of a technological process for producing and investigation of cermet electrodes based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):170–181. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-170-181> EDN: KWZCUV

Введение

Нанесение защитных покрытий является одним из ключевых направлений современной технологии машиностроения, поскольку именно поверхностный слой в большинстве случаев определяет износостойкость, прочность, коррозионную устойчивость и общий ресурс работы деталей машин и инструмента [1–4]. В условиях интенсификации режимов эксплуатации, повышения нагрузок и ужесточения требований к надежности возрастает потребность в материалах, способных сохранять функциональные свойства при одновременном воздействии механического износа, агрессивных сред и повышенных температур [5–7]. В связи с этим разработка новых технологических подходов к модификации поверхностей и созданию эффективных защитных покрытий является актуальной научно-технической задачей [8; 9].

В настоящее время для нанесения защитных покрытий широко применяются такие методы, как газопламенное и плазменное напыление, электродуговые [1; 10] и лазерные технологии [11], ионно-плазменное осаждение и их различные модификации [12]. Однако указанные методы, как правило, характеризуются высокой стоимостью оборудования, значительными энергозатратами, ограниченной мобильностью и существенным тепловым воздействием на материал, что может приводить к структурным изменениям и ухудшению механических свойств основы, на которую наносится защитное покрытие [7; 13; 14].

На этом фоне электроискровое легирование (ЭИЛ) рассматривается как перспективная альтернатива, обладающая рядом существенных преимуществ: локальный характер обработки, минимальное тепловое влияние, отсутствие необходимости в вакууме и защитных атмосферах, возможность упрочнения труднодоступных участков, мобильность и сравнительно низкая стоимость используемого оборудования [1; 15–17]. Тем не менее эффективность ЭИЛ в решающей степени определяется свойствами электродного материала, от которого зависят интенсивность массопереноса, структура формируемого слоя, эксплуатационные характеристики покрытия и, как следствие, ресурс работы детали или инструмента.

Наиболее распространенными электродными материалами для ЭИЛ являются сплавы на основе карбидов вольфрама и титана с металли-

ческой связкой (WC–Co, WC–TiC–Co и др.) [3; 7; 18]. Несмотря на относительно высокую твердость и износостойкость таких материалов, они обладают рядом недостатков, включая высокую стоимость сырья, ограниченную коррозионную стойкость, склонность к хрупкому разрушению и недостаточную адаптивность к изменению режимов легирования. Это указывает на наличие научно-технологического пробела, связанного с отсутствием универсальной методики целенаправленного проектирования электродных материалов для ЭИЛ с оптимальным комплексом свойств [19–20].

В качестве перспективного подхода к решению данной проблемы рассматривается использование метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [21–22] с последующим сжатием (СВС-сжатие), позволяющего получать плотные металлокерамические материалы с заданным фазовым составом и контролируемой структурой [10; 23–24]. Метод СВС-сжатия отличается высокой энергоэффективностью, технологической гибкостью и возможностью варьирования компонентного состава в широких пределах, что делает его привлекательным для разработки электродных материалов нового поколения [25].

В настоящей работе объектом исследования являются металлокерамические композиты на основе системы TiC–NiCr с дополнительным легированием алюминием и иттрием, предназначенные для использования в качестве электродов для ЭИЛ. Центральной научной проблемой является отсутствие комплексной, экспериментально отработанной технологической схемы, охватывающей все стадии создания электродного материала — от подбора компонентного состава и параметров СВС-сжатия до оценки физико-механических, электрических и структурных характеристик конечного изделия.

Цель исследования — разработка технологического процесса получения и исследование металлокерамических электродов на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY методом свободного СВС-сжатия для ЭИЛ. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: разработка технологического способа получения электродов; исследование их механических свойств; анализ фазового состава методом рентгеноструктурного фазового анализа и исследование микроструктуры с использованием СЭМ

для установления закономерностей «состав — структура — свойства».

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к проектированию и получению электродов для ЭИЛ, реализующего сквозную технологическую цепочку от синтеза до функциональной оценки. Практическая значимость состоит в возможности целенаправленного создания конкурентоспособных электродов для ЭИЛ, обеспечивающих его повышение износостойкости и долговечности машиностроительных деталей.

1. Материалы и методы

В качестве исходных компонентов использовались коммерческие порошки титана, технического углерода (сажи), никель-хромового сплава

(NiCr) с добавлением алюминия и иттрия (табл. 1). Добавка Al служит дополнительным экзотермическим агентом и модификатором структуры, а Y — эффективным элементом, улучшающим граничную структуру карбидных зерен и термическую стабильность композита. Компонентный состав и массовое соотношение порошков представлены в табл. 2.

Предварительная подготовка компонентов (этап 2). Для исключения влияния адсорбционной влаги на точность дозировки и стабильность процесса горения все порошки подвергали изотермической выдержке в сушильном шкафу СНОЛ – 3,5 при температуре 50 ± 2 °C в течение 24 ч. Данный режим выбран для минимизации риска поверхностного окисления порошков, возможного при высоких температурах.

Таблица 1. Характеристики порошков

Порошок	Марка порошка	Чистота реагента, %	Размер частиц, мкм
Ti	ПТС-1	99,0	45
C	П-803	99,1	1
NiCr	ПР-12Х18Н10Т	97,0	45
NiCrAl	МЕТСО-451	97,0	56
NiCrAlY	АМДРУ-962	97,0	53

Источник: выполнено И.А. Назарько.

Таблица 2. Массовое соотношение порошковых компонентов

№	Обозначение состава	Содержание исходных реагентов, масс, %				
		Ti	C	NiCr	NiCrAl	NiCrAlY
1	TiC–NiCr	56	14	30	–	–
2	TiC–NiCrAl	56	14	–	30	–
3	TiC–NiCrAlY	56	14	–	–	30

Источник: выполнено И.А. Назарько.

Методика приготовления шихты (этап 3).

Расчетную массу каждого компонента взвешивали на лабораторных весах CAS MWP-1500 с точностью 0,1 %. Механическое перемешивание проводилось в шаровой мельнице в течение 4 ч. В качестве мелющих тел использовались цилиндры из стали марки 12Х18Н10Т с отношением их массы к массе порошковой смеси, равным 3,5:1. После смешивания и просеивания через сито с размером ячейки 2,5 мм для удаления мелющих тел, смесь повторно помещают в сушильный

шкаф на 2 или более часов для удаления излишней влаги, внесенной в процессе смешения.

Методика получения порошковых заготовок (этап 4). Изготовление шихтовых заготовок (прессовок) осуществлялось методом холодного одноосного прессования на гидравлическом прессе Геркулес-40. С целью изучения температуры и скорости горения готовили заготовки диаметром 25 мм. Давление прессования варьируется для получения заготовок с относительной плотностью в диапазоне 50–75 % от теоретической. Для полу-

чения компактов готовят шихтовые заготовки с размерами $60 \times 90 \times 12$ мм с оптимальной относительной плотностью. Сформированные заготовки визуально контролируют на отсутствие трещин и расслоений.

Методика определения температуры и скорости горения (этап 4.1). Определение температуры и скорости горения проводилось по следующей методике. В шихтовую заготовку (масса 35 г, диаметр 25 мм) помещали две вольфрам-рениевые термопары BP5/BP20, установленные по вертикальной оси на расстоянии 10 мм друг от друга. Их сигналы регистрировались при помощи АЦП QMBOX1-40-50. Прохождение фронта горения через каждую термопару фиксировалось по изменению температуры. Величину скорости горения вычисляли как отношение расстояния между термопарами к временному интервалу между этими событиями

Методы РФА и СЭМ (этап 7.1). Для определения фазового состава синтезированных материалов был проведен рентгеноструктурный фазовый анализ на дифрактометре ДРОН-3. Качественная идентификация фаз проводилась по положению дифракционных пиков на полученных рентгенограммах, а их относительное содержание оценивалось по интенсивности отражений.

Микроструктура образцов исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1450.

Измерение механических характеристик (этап 7.2). С помощью динамического нанотвердомера Наноскан-4Д были определены механические характеристики полученных образцов – твердость (H), модуль упругости (E), упругое восстановление (η), работы пластической и упругой деформации. Индентирование проводили в соответствии со стандартом ISO 14577-1:2002 на полированных поперечных сечениях образцов в центральной части с нагрузкой 0,5 Н алмазным наконечником типа Берковича. Время нагружения составило 10 с, время выдержки под нагрузкой 2 с; расстояние между отпечатками не менее: $x = 15$ мкм и $y = 12$ мкм.

2. Результаты

В работе проведена разработка и оптимизация технологического процесса получения электродов на основе TiC–NiCr, легированных алюминием и иттрием. Общая схема разработанного и оптимизированного многостадийного технологического процесса, отражающая последовательность операций и обратные связи для корректировки параметров, представлена на рис. 1.

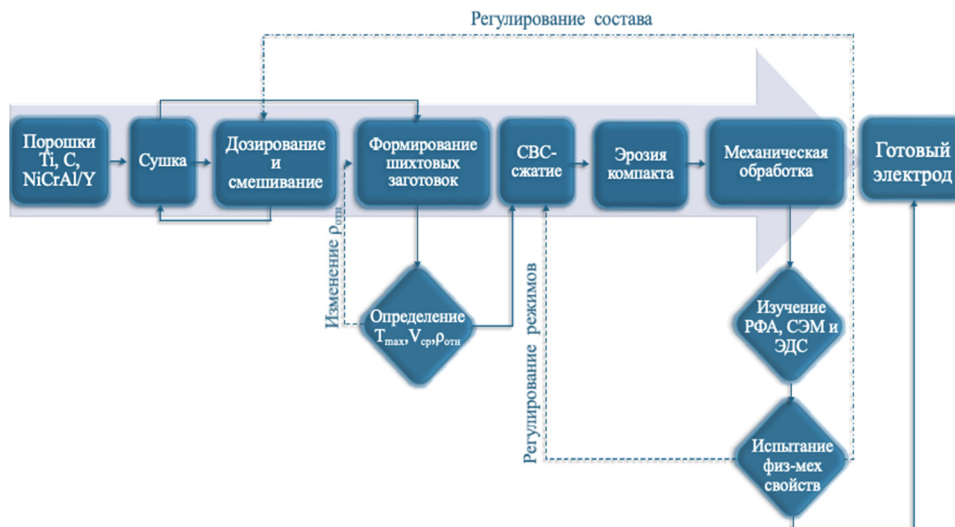


Рис. 1. Блок-схема процесса получения электродов методом СВС-сжатия

Источник: выполнено И.А. Назарко.

На первоначальных этапах технологического процесса (этапы 1–3 на рис. 1) осуществляется приготовление и подготовка исходных по-

рошковых реагентов в соответствии с их массовыми соотношениями, приведёнными в табл. 2. Из порошковой смеси готовят заготовки задан-

ных формы и размеров для проведения изучения характеристик горения и получения компактов в условиях свободного СВС-сжатия. Критическим фактором, определяющим пригодность синтезированного материала для пластической деформации после прохождения волны горения, являются температурно-временные условия его получения, которые напрямую зависят от параметров горения шихтовой заготовки. На эти параметры существенное влияние оказывает уровень относительной плотности шихтовой заготовки, который предварительно подбирается экспериментальным путем перед самим процессом СВС-сжатия.

Для выбора оптимальной плотности в работе были проведены исследования по изучению характеристик горения (этап 4.1). В настоящей работе экспериментально исследовались заготовки

на основе систем TiC–NiCrAl (относительная плотность 0,68–0,76) и TiC–NiCrAlY (0,69–0,77). Для каждого состава на основе полученных экспериментальных термограмм были определены максимальная температура ($T_{\max}$) и скорость горения (V). Сводные графики зависимостей этих параметров от относительной плотности приведены на рис. 2.

После выбора оптимальных параметров заготовки проводят получение компактов методом свободного СВС-сжатия (этап 5). Заготовка (рис. 3) с оптимальной плотностью с торца иницируется вольфрамовой спиралью для запуска процесса горения. В момент, когда фронт горения проходит весь объем, но продукт еще находится в пластичном высокотемпературном состоянии, к нему прикладывают давление плунжером прессы.

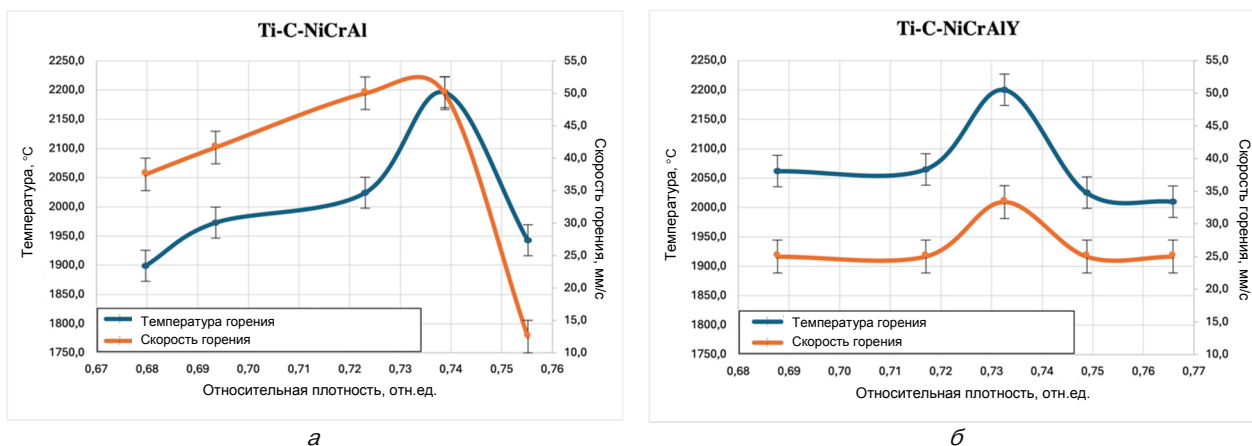


Рис. 2. Графики зависимости температуры и скорости горения от относительной плотности заготовки для составов:

а — TiC–NiCrAl; б — TiC–NiCrAlY

Источник: выполнено И.А. Назарько.

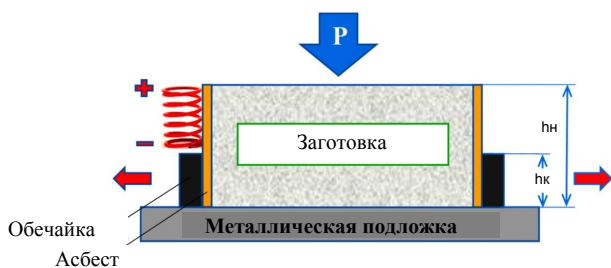


Рис. 3. Схема заготовки перед свободным СВС-сжатием

Источник: выполнено П.М. Бажиным.

Ключевыми оптимизируемыми параметрами являются величина приложенного давления и время задержки между временем прохождения

волны горения по всему образцу и началом сжатия. Правильный выбор этих параметров позволяет устранить макропоры, получить высокую плотность. Сразу после прессования для снятия термических напряжений образец подвергают низкотемпературному воздействию при 500 °С с последующим медленным охлаждением (~12 ч). После остывания печи, полученные компакты подвергают черновой механической обработке (этап 6) на плоскопараллельном шлифовальном станке для устранения поверхностных дефектов. С целью получения необходимых габаритов полученный компакт подвергается электроэрозионной резке на следующем этапе.

Далее полученные образцы были подвергнуты всестороннему анализу для оценки их структуры и свойств. В рамках данного исследования был выполнен структурно-фазовый анализ и с помощью СЭМ-анализа была изучена структура, установлены распределение и размеры основных фаз и легирующих элементов (Al, Y).

В работе были также проведены испытания механических свойств, полученных материалов. Ключевыми параметрами являются микротвердость, модуль упругости и др. Этот этап является решающим для всего оптимизационного цикла. Если результаты не соответствуют целевым показателям, процесс возвращается назад на предыдущие этапы, как показано на блок-схеме (см. рис. 1) пунктирными стрелками. Корректировка может идти по двум направлениям: сначала возврат к изменению режимов синтеза (изменение давления и времени задержки) или же возврат к начальной корректировке исходного состава порошковой смеси, включая изменение процентного соотношения основных компонентов и количества легирующих добавок. Таким образом, цикл синтеза, обработки и анализа повторяется до достижения оптимального комплекса свойств.

После подтверждения оптимальных характеристик образец переходит к финальной механической обработке для придания рабочей формы (этап 8). Получение электрода заданного размера для нанесения покрытий методом ЭИЛ или готовой детали более сложной конфигурации выполняется на электроэрозионном станке.

Таким образом, представленный на рис. 1 технологический процесс и описанные методики позволяют целенаправленно управлять процессом свободного СВС-сжатия для получения металллокерамических электродов на основе TiC–NiCr с модифицированной структурой и заданными функциональными свойствами.

3. Обсуждение

Анализ графиков зависимости температуры и скорости горения от относительной плотности (см. рис. 2) показал, что наблюдается немонотонная зависимость: при начальном увеличении плотности температура и скорость горения растут вследствие улучшения контакта между частицами, но после прохождения экстремума начинают снижаться из-за интенсификации теплоотвода. Таким образом, для каждого состава были установлены оптимальные плотности, соот-

ветствующие максимальному тепловыделению: 0,74 для TiC–NiCrAl и 0,73 — для TiC–NiCrAlY, при которых синтезированные материалы будут дольше находиться в пластичном состоянии при последующем сдвиговом деформировании, что является ключевым фактором для улучшения их структуры и свойств.

С целью оптимизации процесса свободного СВС-сжатия были проведены эксперименты по варьированию времени задержки и давления прессования. Установлено, что давление прессования существенным образом влияет на пористость получаемых компактов. Так, при его значении менее 10 МПа пористость полученных компактов максимальна и составила до 10 %. С увеличением этого параметра пористость снижается и достигается менее 2 % при давлении прессования 30 МПа. Дальнейшее увеличение давления не приводит к существенному изменению пористости, а при превышении его значения более 100 МПа приводит к разрушению получаемых компактов. Был определен оптимальный интервал времени задержки перед приложением давления, который составил 2–4 с после прохождения волны горения по всему образцу. При приложении давления сразу после прохождения волны горения и менее 2 с в материале процессы фазо- и структурообразования протекают не в полной мере, что сказывается на формировании неравновесных и промежуточных фаз. При увеличении этого параметра более 4 с материал теряет свои пластичные свойства и способность к получению компактных материалов.

На основе проведенного РФА (параметры элементарной ячейки образцов представлены в табл. 3) установлено, что все электроды состоят из карбида титана и нихромовой матрицы (рис. 4). При добавлении алюминия в синтезированном материале обнаружен интерметаллид со стехиометрией $Al_{1,1}Ti_{0,9}$, что можно отнести к нестехиометрической модификации γ -TiAl. Отклонение от стехиометрии создает в кристаллической решетке дефекты (атомы алюминия замещают атомы титана), которые создают внутренние напряжения, мешающие движению дислокаций, что приводит к дополнительному упрочнению нихромовой матрицы. При этом небольшой избыток алюминия в полученном интерметаллиде улучшает смачиваемость частиц TiC при синтезе и последующем деформировании, что уменьшает пористость в полученных электродах. Введение

дополнительно иттрия в исходную смесь за счет его высокой химической активности способствует образованию в результате синтеза сложных алюминатов иттрия. Образование интерметаллидов благоприятно будет сказываться при дальнейшем нанесении покрытий методом ЭИЛ при использовании полученных электродов, так как они снижают температуру плавления электродного материала и улучшают его смачиваемость по отношению к стальной подложке. Это

увеличит коэффициент переноса электродного материала и обеспечит повышенную адгезию получаемого покрытия. К тому же в процессе работы покрытия под нагрузкой избыточный алюминий из нестехиометрической фазы будет легче вступать в реакцию с кислородом из окружающего воздуха, образуя нанослой оксида алюминия, что создаст эффект самосмазывания, за счет чего произойдет снижение адгезионного износа пары трения.

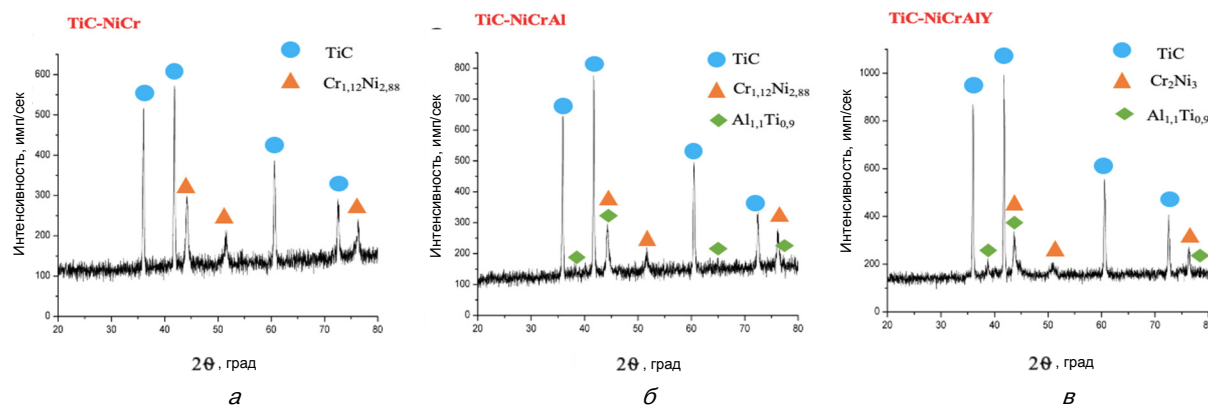


Рис. 4. Результаты РФА электродов:

а — TiC–NiCr; б — TiC–NiCrAl; в — TiC–NiCrAlY

Источник: выполнено И.А. Назарько.

Таблица 3. Результаты РФА и параметры элементарной ячейки

Состав электрода	Фаза	Тип решетки	PDF-2 группа	Размер решетки, Å
TiC–NiCr	TiC	Кубическая (Fm-3m)	10-89-3828	a = 4,3178
	Cr _{1,12} Ni _{2,88}		30-65-5559	a = 3,54
TiC–NiCrAl	TiC	Кубическая (Fm-3m)	32-1383	a = 4,3274
	Cr _{1,12} Ni _{2,88}		30-65-5559	a = 3,54
	Al _{1,1} Ti _{0,9}	Тетрагональная (P4/mmm)	55-0252	a = 3,9885 , c = 4,0808
TiC–NiCrAlY	TiC	Кубическая (Fm-3m)	30-65-8804	a = 4,322
	Cr ₂ Ni ₃		30-65-6291	a = 3,579
	Al _{1,1} Ti _{0,9}	Тетрагональная (P4/mmm)	55-0252	a = 3,9885 , c = 4,0808

Источник: выполнено И.А. Назарько.

На основе проведенного СЭМ анализа установлено, что полученные электроды состоят из округлых частиц карбида титана, расположенных в матрице из смеси интерметаллидов. На основе полученных микрофотографий (рис. 5) установлено, что средний размер частиц TiC с добавлением алюминия и иттрия снижается с 4,4 (TiC–NiCr) [26] до 3,4 (TiC–NiCrAl) и 3,1 (TiC–NiCrAlY) мкм соответственно. При этом максимальный размер частиц TiC составил 9 мкм для электрода TiC–NiCr, 6 мкм — TiC–NiCrAl и 5 мкм —

TiC–NiCrAlY. В результате синтеза образованные интерметаллидные соединения с алюминием располагаются на поверхности растущих карбидных зерен, что создает барьер для диффузии углерода и титана к зерну TiC. Добавление алюминия и иттрия вызывает синергетический эффект, который приводит к еще большему измельчению частиц TiC, чем при их раздельном использовании. Образованные сложные алюминаты иттрия также располагаются на границе зерен TiC, что препятствует диффузии атомов титана и углерода к ним.

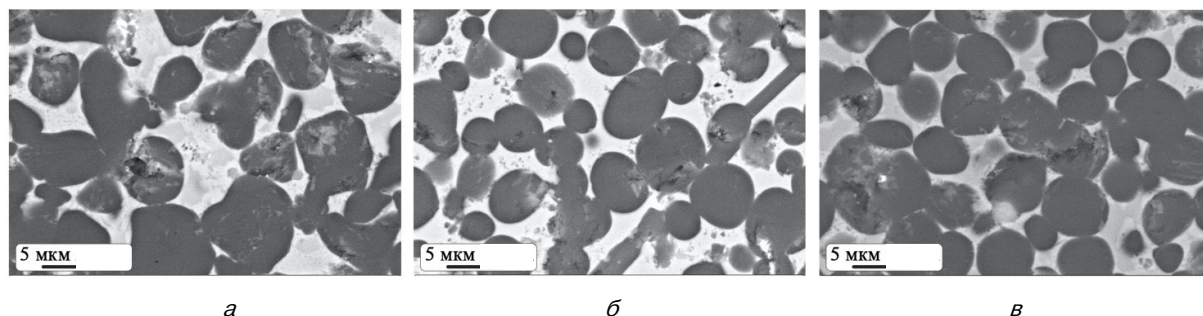


Рис. 5. Изображения микроструктуры электродов, полученные методом СЭМ:

a — TiC–NiCr; *б* — TiC–NiCrAl; *в* — TiC–NiCrAlY

Источники: выполнено П.М. Бажиным.

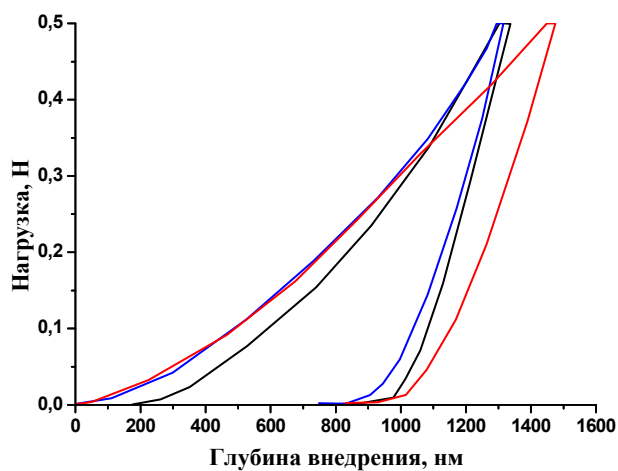


Рис. 6. Зависимости нагружение/разгрузка для электродов:

— TiC–NiCr; — TiC–NiCrAl; — TiC–NiCrAlY

Источники: выполнено А.П. Чижиковым.

На рис. 6 приведены характерные зависимости при индентировании электродов трех изучаемых составов, которые имеют вид для упругопластических тел, но с явным смещением в сторону упругости по мере легирования алюминием и иттрием. Для электрода TiC–NiCr наблюдается наибольшая площадь между линиями нагружения и разгрузки, что соответствует наибольшей работе пластической деформации, равной 181,4 нДж (табл. 4). Для электрода TiC–NiCrAl кривая нагружения становится заметно круче за счет роста твердости до 15,4 ГПа, а кривая разгрузки более «вертикальная» (смещается правее), что свидетельствует о росте модуля упругости. Для электрода TiC–NiCrAlY кривая нагружения самая крутая, что говорит о максимальном сопротивлении материала внедрению индентора. Полученные кривые нагружения плавные, без выраженных скачков, что подчеркивает об отсутствии микрорастрескивания или наличии пор в изучаемых электродах.

Таблица 4. Средние значения механических характеристик электродов

Электрод	Твердость (H), ГПа	Модуль упругости (E), ГПа	Упругое восстановление (η), %	Работа упругой деформации, нДж	Работа пластической деформации, нДж	H	H ³
TiC–NiCr	13,0	305	34,8	94,8	181,4	0,042	0,023
TiC–NiCrAl	15,4	365	33,8	87,8	162,5	0,042	0,028
TiC–NiCrAlY	16,9	395	34,7	84,7	156,5	0,043	0,031

Источники: выполнено А.П. Чижиковым

На основе экспериментальных зависимостей по индентированию были измерены механические характеристики полученных электродов. Установлено, что дополнительное легирование алюминием и иттрием приводит к их изменению за счет формирования дополнительных фаз и

изменению размера карбидных зерен (табл. 3). Как видно из табл. 4, дополнительное легирование алюминием и иттрием приводит не только к повышению твердости, модуля упругости полученных материалов, но и к снижению работ упругой и пластической деформации. При этом упру-

гое восстановление практически не изменяется для всех изучаемых электродов и находится на уровне 34–35 %. В процессе формирования структуры атомы иттрия образуют дисперсные фазы с иттрием, которые локализуются на границах зерен TiC, препятствуя их миграции. Это будет обеспечивать сохранение мелкозернистой структуры даже в условиях термического воздействия при электроискровых разрядах. На основе закона Холла — Петча можно утверждать, что рост твердости и модуля упругости говорит об измельчении структурных составляющих в электродах. При этом высокая плотность межзеренных границ и наличие хрупких интерметаллидных фаз ограничивают свободный пробег дислокаций, что закономерно ведет к снижению работы пластической деформации и общей энергоемкости разрушения материала.

Для полученных электродов соотношение H/E характеризует упругость и способность материала сопротивляться износу без повреждения структуры. Этот параметр несколько выше для электрода TiC–NiCrAlY, что может характеризовать эффективность переноса материала в процессе ЭИЛ и более лучшее качество формируемого диффузионного слоя. За счет повышенного значения соотношения $H/E = 0,043$ материал электрода состава TiC–NiCrAlY обладает повышенной упругой связью, из-за чего при электроискровых разрядах будут формироваться меньшие по размерам микрокапли. Это позволит получить на стальной поверхности более гладкое и плотное покрытие, что критично для защиты стали от коррозии и износа. При меньших значениях соотношения H/E электрод будет более склонен к хрупкому выкрашиванию целыми макрочастицами, что скажется на увеличении толщины наносимого покрытия, но при этом снизит его сплошность.

Соотношение H^3/E^2 определяет предельную нагрузку, которую может выдержать электрод до того, как начнет необратимо разрушаться. Как видно из табл. 4, это соотношение повышается от 0,023 до 0,031 с дополнительным легированием алюминием и иттрием. С повышением данного соотношения материал сопротивляется в большей степени образованию микрократеров, даже при экстремальных точечных давлениях. Электрод TiC–NiCrAlY имеет максимальное соотношение H^3/E^2 , что указывает на работу полученного покрытия при его использовании в упругом режиме. За счет этого электрод TiC–NiCrAlY

можно рекомендовать для нанесения покрытий в прецизионных парах трения, где критичен минимальный износ и требуется низкий коэффициент трения. Для этого электрода необходимо использовать низкую энергию разряда при ЭИЛ, чтобы избежать возникновения внутренних напряжений и растрескивания покрытия при кристаллизации на стальной основе. Для электрода TiC–NiCrAl соотношение $H^3/E^2 = 0,028$, что указывает на формирование покрытия при ЭИЛ, обладающим большей жесткостью, в отличие от использования электрода TiC–NiCr ($H^3/E^2 = 0,023$), но при этом оно будет менее хрупким, чем покрытие, полученное электродом с иттрием. Электрод TiC–NiCr можно рекомендовать для нанесения покрытий на стальные детали, работающие в условиях сильных ударов или изгибов, за счет формирования металлокерамического слоя, который максимально будет близок к стали по механическому поведению.

Заключение

Объектом данного исследования являлись металлокерамические электроды на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY, предназначенные для нанесения износостойких покрытий методом электроискрового легирования. В работе разработана и реализована комплексная технологическая схема, включающая приготовление порошковых шихтовых заготовок, холодное прессование заготовок, синтез и консолидацию материалов методом свободного СВС-сжатия, а также аттестацию структуры и свойств полученных образцов с использованием рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии и наноиндентирования. Экспериментально определены оптимальные параметры процесса: относительная плотность шихтовых заготовок (0,74 для TiC–NiCrAl и 0,73 для TiC–NiCrAlY), давление прессования (30 МПа) и время задержки перед приложением нагрузки (2–4 с), обеспечивающие формирование беспористых компактов с равномерной мелкозернистой структурой. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Разработан и оптимизирован технологический процесс получения электродов на основе TiC–NiCr при дополнительном легировании исходной порошковой смеси алюминием и иттрием. Установлено, что введение алюминия и иттрия в исходную порошковую смесь позволяет

управлять фазовыми и структурными превращениями непосредственно в процессе формирования и консолидации материала.

2. Показано, что дополнительное легирование алюминием и иттрием приводит к образованию новых интерметаллидных фаз ($Al_{1,1}Ti_{0,9}$ и сложных алюминатов иттрия), способствующих повышению механических характеристик полученных электродов: твердости до 16,9 ГПа, модуля упругости до 395 ГПа, соотношений $H/E = 0,043$ и $H^3/E^2 = 0,031$. Формирование указанных фаз, а также снижение температуры плавления электродного материала и улучшение его смачиваемости по отношению к стальной подложке позволят повысить коэффициент переноса материала и адгезию покрытия, наносимого методом электроискрового легирования.

3. Даны практические рекомендации по использованию полученных электродов в зависимости от их состава для нанесения защитных покрытий на металлические поверхности.

Список литературы

1. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: A short review // *Coatings*. 2022. Vol. 12. No. 10. Article no. 1536. <http://doi.org/10.3390/coatings12101536> EDN: NJNOUY
2. Wang Y., Zhang H., Liu J., Li X. Study on the properties of TiC coating deposited by spark discharge on the surface of AlFeCoCrNiCu high-entropy alloy // *Coatings*. 2024. Vol. 14. No. 3. P. 421–435. <http://doi.org/10.3390/coatings14030421>
3. Pyachin S.A., Nikolenko S.V., Burkov A.A., Suy N.V. Electrospark coatings based on WC–Co alloys with aluminium oxide and carbon additives // *Materials Sciences and Applications*. 2013. Vol. 4. No. 4. P. 186–190. <http://doi.org/10.4236/msa.2013.43022> EDN: PSPNRN
4. Vardanyan E.L., Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y. Properties of intermetallic Ti–Al based coatings deposited on ultrafine-grained martensitic steel // *Surf. Coat. Technol.* 2020. Vol. 389. Article no. 125657. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125657>
5. Singh H., Singh J., Kumar S. Effect of processing conditions and electrode materials on the surface roughness of EDM-processed hybrid metal matrix composites // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023. Vol. 6. No. 1. P. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.12.001>
6. Tkachenko Y.G., Yurchenko D.Z., Timofeeva I.I., Britun V.F. Effect from the composition of electrodes produced from TiC–(Fe–Cr–Al–Si) alloys on the formation, phase composition, and properties of wear- and oxidation-resistant electrospark-deposited coatings on steel // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 57. No. 5–6. P. 465–472. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-0005-y>
7. Mertgenç E. Wear and corrosion behavior of TiC and WC coatings deposited by electro-spark deposition // *Open Chemistry*. 2023. Vol. 21. No. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1515/chem-2023-0187>
8. Nasakina E.O., Baikin A.S., Sergienko K.V., Sevost'yanov M.A., Kolmakov A.G., Goncharenko B.A., Zabolotnyi V.T., Fadeev R.S., Fadeeva I.S., Gudkov S.V., Solntsev K.A. Biocompatibility of nanostructured nitinol with titanium or tantalum surface composite layers formed by magnetron sputtering // *Doklady Chemistry*. 2015. Vol. 461. No. 1. P. 86–88. <https://doi.org/10.1134/S0012500815030027>
9. Крючкин Н.К., Рамазанов К.Н., Мингажеева А.А., Мингажеев А.Д. Влияние ионно-имплантационной активации поверхности конструкционных сталей 40Х и 40ХН на структуру и свойства азотированного слоя // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2025. Т. 21. № 3. С. 120–123. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2025-21-3-120-123> EDN: FCKVZS
10. Nazarov A.Yu., Maslov A.A., Ramazanov K.N. Vacuum Arc Deposition of Y–Al–O Coating // *Russian Physics Journal*. 2024. Vol. 66. No. 11. P. 1158–1161. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03057-1> EDN: ZGGEJK
11. Shinkaryov A.S., Ozherelkov D.Y., Pelevin I.A., Eremin S.A., Anikin V.N., Burmistrov M.A., Chernyshikhin S.V., Gromov A.A., Nalivaiko A.Y. Laser Fusion of Aluminum Powder Coated with Diamond Particles via Selective Laser Melting: Powder Preparation and Synthesis Description // *Coatings*. 2021. Vol. 11. Iss. 10. Article no. 1219. <https://doi.org/10.3390/coatings11101219> EDN: SHWVLZ
12. Maslov A.A., Nazarov A.Yu., Syrtanov M.S., Nikolaev A.A., Ramazanov K.N. Al–Cr/Y–Al–O Layer Coating Oxidation on Ti–Al–Nb Intermetallic Alloy during Heating and Thermal Cycles // *Russian Physics Journal*. 2024. Vol. 66. No. 11. P. 1206–1211. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03157-8> EDN: RTVDIA
13. Завитков А.В., Локтев А.С., Люхтер А.Б., Фролов К.А. Пути снижения неметаллических включений в покрытиях, нанесенных лазерной наплавкой // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2023. Т. 24. № 3. С. 271–278. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-271-278> EDN: UQGPAI
14. Haponova O., Tarellyk V., Moscicki T., Tarellyk N. Hybrid surface treatment technologies based on the electrospark alloying method: a review // *Coatings*. 2025. Vol. 15. No. 6. P. 721. <https://doi.org/10.3390/coatings15060721> EDN: QRIMRE
15. Podlesov V.V., Stolin A.M., Merzhanov A.G. SHS extrusion of electrode materials and their application for electric-spark alloying of steel surfaces // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1992. Vol. 63. P. 1156–1165. <https://doi.org/10.1007/BF00853513>
16. Галышев С.Н., Бажин П.М., Столин А.М., Сычёв А.Е. Синтез металлокерамики на основе Ti–Al–

С в условиях свободного СВС-сжатия // Перспективные материалы. 2010. № 2. С. 81–86. EDN: LRHJAF

17. Алымов М.И., Столин А.М., Бажин П.М. Исследование структуры и свойств защитных покрытий, полученных методом электроискрового легирования СВС-электродами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 2. С. 40–48. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-2-40-48> EDN: NBKVMT

18. Панькин Н.А., Мишкин В.П. Электронная микроскопия поверхности стали 35ХГСЛ после её электроискровой обработки вольфрамовым электродом-анодом // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2023. № 15. С. 807–813. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.807> EDN: JTIWVH

19. Бурков А.А., Кулик М.А. Электроискровое осаждение покрытий Fe-Cr-Cu на сталь Ст3 // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2023. Т. 17. № 4. С. 51–58. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-51-58> EDN: VJTQKY

20. Коневцов Л.А., Хе В.К., Ким Е.Д., Еремина К.П. Получение металлматричных сплавов для износостойких электроискровых покрытий // Транспортное машиностроение. 2022. № 4 (4). С. 51–59. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-4-51-59> EDN: TXTTWD

21. Lapshin O.V., Boldyreva E.V., Boldyrev V.V. Role of Mixing and Milling in Mechanochemical Synthesis (Review) // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2021.

Vol. 66. P. 433–453. <https://doi.org/10.1134/S0036023621040080> EDN: BAVVXL

22. Амосов Е.А. Некоторые закономерности СВС реакций // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 3. С. 10–14. EDN: WTINT

23. Seplyarskii B.S., Kochetkov R.A., Lisina T.G., Abzalov N.I. Patterns of synthesis of TiC–NiCr cermets from powder mixtures: Influence of nichrome content and titanium particles size // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2024. Vol. 33. No. 1. P. 75–79. <https://doi.org/10.3103/S1061386224010060> EDN: DHSJOB

24. Kiryukhantsev-Korneev P.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. Vol. 60. No. 6. P. 662–672. <https://doi.org/10.3103/S1067821219060099> EDN: MZGYJG

25. Bazhin P., Konstantinov A., Chizhikov A., Prokopets A., Bolotskaia A. Structure, physical and mechanical properties of TiB-40 wt.% Ti composite materials obtained by unrestricted SHS compression // Materials Today Communications. 2020. Vol. 25. Article no. 101484. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101484> EDN: RRTGQL

26. Антипов М.С., Чижиков А.П., Константинов А.С., Бажин П.М. Металлокерамический материал на основе карбида титана для повышения стойкости шибберных затворов // Новые огнеупоры. 2021. № 4. С. 34–37. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2021-4-34-37> EDN: YPFYQB

Сведения об авторах

Назарько Иван Александрович, аспирант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; младший научный сотрудник лаборатории № 7 пластического деформирования материалов, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Российская Федерация, 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 8; eLIBRARY SPIN-код: 9076-1357, ORCID: 0009-0001-9850-2599; e-mail: nazarkovanya@yandex.ru

Чижиков Андрей Павлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 7 пластического деформирования материалов, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Российская Федерация, 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 8; eLIBRARY SPIN-код: 9233-6360, ORCID: 0000-0003-2793-6952; e-mail: chij@ism.ac.ru

Антипов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории № 7 пластического деформирования материалов, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Российская Федерация, 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 8; eLIBRARY SPIN-код: 7261-6449, ORCID: 0000-0002-7498-428X; e-mail: m_antipov@ism.ac.ru

Бажин Павел Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; заместитель директора по научной работе ИСМАН, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Российская Федерация, 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 8; eLIBRARY SPIN-код: 8117-0070, ORCID: 0000-0003-1710-3965; e-mail: bazhin@ism.ac.ru