

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
METALLURGY AND HEAT TREATMENT OF METALS AND ALLOYS

Научная статья

УДК 621.793

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-99-108

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПОДВЕРГНУТОГО ОТЖИГУ (Ni-Cr)-Al КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Астрашаб Евгений Викторович, Григорчик Александр Николаевич,
Кукареко Владимир Аркадьевич, Белоцерковский Марат Артёмович,
Сосновский Алексей Валерьевич

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

*для корреспонденции: astrashabev@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

16 апреля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

29 мая 2024 г.

Принята к публикации:

29 мая 2024 г.

Опубликована:

28 июня 2024 г.

Ключевые слова:

композиционное покрытие,
структура, фазовый состав,
интерметаллидные
соединения, алюминиды
никеля, отжиг, твердость,
триботехнические
характеристики

Аннотация.

Исследовано влияние отжига в интервале температур 350-650°C (с выдержкой до 10 часов) на структуру, фазовый состав и триботехнические свойства (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия, полученного методом высокоскоростной металлизации. Установлено, что в результате высокоскоростной металлизации (Ni-Cr)-Al формируется гетерогенное композиционное покрытие, состоящее из частиц хрома и алюминия с переменным химическим составом. Частицы хрома содержат до 17 масс. % Al, а частицы алюминия включают в себя до ≈ 4 масс. % Ni и до 1 масс. % Cr. Фазовый состав (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия после напыления включает в себя γ -(Ni, Cr, Al), Al и интерметаллид AlNi, а пористость покрытия не превышает ≈ 3 об.%. Показано, что в результате диффузионного взаимодействия частиц композиционного покрытия в процессе отжига происходит одновременное образование интерметаллидных соединений Al_3Ni , Al_3Ni_2 , AlNi, AlNi₃, приводящее к повышению микротвердости и твердости покрытия до $\approx 2,1$ и $\approx 1,5$ раз соответственно по сравнению с исходным состоянием. При этом общее количество интерметаллидных соединений после отжига при 550°C в течение 10 часов достигает ≈ 50 об. %, а пористость покрытия возрастает до ≈ 23 об. %. Установлено, что отжиг покрытия приводит к повышению его износостойкости до $\approx 24,0$ раз при трении без смазочного материала и до $\approx 3,2$ раз при трении со смазочным материалом И-20А по сравнению с его исходным состоянием.

Для цитирования: Астрашаб Е.В., Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В. Структура, фазовый состав и триботехнические свойства подвергнутого отжигу (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 3 (163). С. 99-108. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-99-108, EDN: UXULYE

Актуальность работы. Метод высокоскоростной металлизации покрытий позволяет проводить одновременное сверхзвуковое распыление двух проволоочных материалов различного химического состава, в результате чего формируется экономичное

композиционное покрытие [1-5]. Одним из наиболее перспективных композиционных материалов являются покрытия на основе системы никель-алюминий, обладающие высокой коррозионной стойкостью, износостойкостью, адгезионной прочностью, а

также содержащие пониженное количество оксидов [6-8].

В качестве проволочных материалов для формирования композиционных покрытий Ni-Al методом высокоскоростной металлизации целесообразно использовать доступные, относительно дешевые проволоки из никелевого сплава Х80Н20 и алюминиевых сплавов (АД1, АК12). При этом эксплуатационные свойства композиционного покрытия будут зависеть от его структуры и фазового состава, которые формируются в процессе напыления и последующей термической обработки. В частности, в [9-13] показано, что значительное повышение физико-механических свойств композиционных покрытий системы Ni-Al может быть достигнуто за счет их отжига, в результате которого образуются алюминиды никеля различного стехиометрического состава. Вместе с тем в современной литературе представлено крайне мало систематизированных данных о влиянии отжига на формирование структуры, фазового состава и свойств Ni-Al композиционных гетерогенных покрытий, полученных методом высокоскоростной металлизации. Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния режима отжига на структуру, фазовый состав и триботехнические свойства (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия, полученного методом высокоскоростной металлизации.

Изготовление образцов и методики их исследований. Объектом исследований являлось (Ni-Cr)-Al композиционное покрытие, полученное методом высокоскоростной металлизации в исходном состоянии и подвергнутое отжигу по различным режимам.

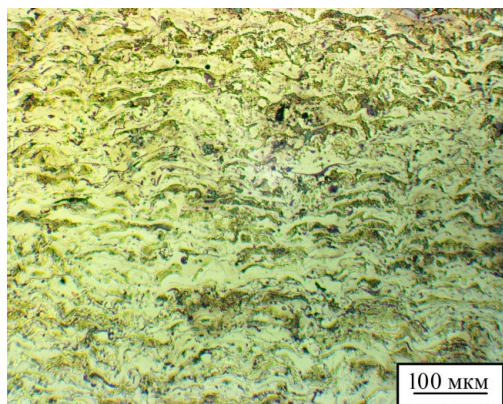
Высокоскоростная металлизация проводилась на установке АДМ-10 путем одновременного распыления расплавленных электрической дугой проволок из нихрома Х20Н80 (диаметр 1,8 мм) и алюминия АД1 (диаметр 2,0 мм) на предварительно подготовленную пластину из стали 35 толщиной 5 мм. Толщина напыленного композиционного покрытия составляла $\approx 1,0$ мм. Химический состав полученного покрытия представлен в Таблице 1.

Отжиг покрытия проводился в муфельной печи SNOL 7.2/1100 при температурах 350, 400, 450, 500 и 550°C с выдержкой в течение 10 часов, а также в интервале температур 550-650°C с выдержкой 20, 40 и 60 минут. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Определение пористости проводилось измерением и суммированием длин отрезков, пересекающих поры (метод Розиваля) при анализе микроструктур. Химический состав локальных областей покрытия определялся с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3, оснащенного рентгеноспектральным анализатором. Исследование фазового состава осуществлялось на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном кобальтовом (CoK_α) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Анализ рентгенограмм осуществлялся при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотеккой PDF-2. Количественный анализ дифрактограмм покрытий проводился с использованием программного обеспечения «Almaz». Средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) – размер кристаллов интерметаллидных

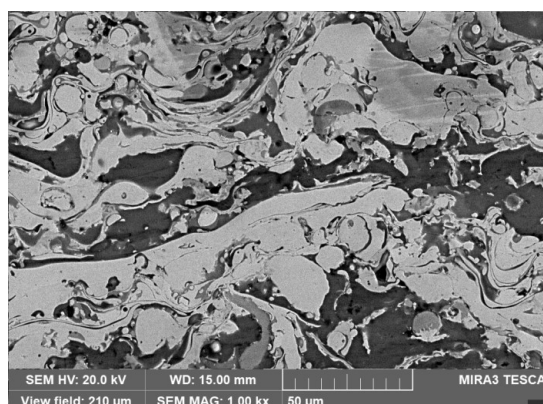
Таблица 1. Химический состав (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия, масс. %

Table 1. Chemical composition of (Ni-Cr)-Al composite coating, wt. %

Покрытие	Ni	Si	Cr	Mn	Fe	Al
(Ni-Cr)-Al	35,8	1,4	10,6	0,3	0,8	51,1



а)



б)

а – увеличение $\times 100$; б – увеличение $\times 1000$;
Рис. 1. Характерные микроструктуры (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия
а - magnification $\times 100$; б - magnification $\times 1000$;

Fig. 1. Characteristic microstructures of (Ni-Cr)-Al composite coating

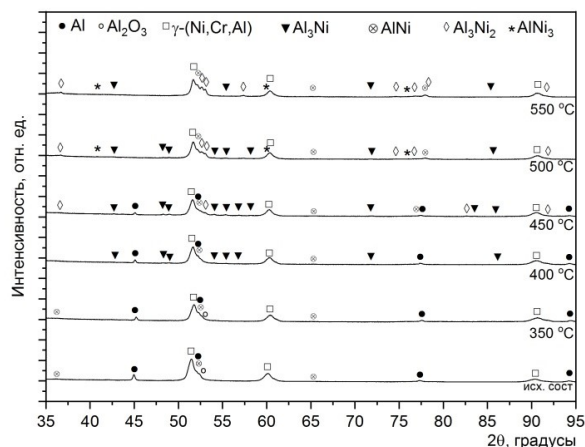


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхностных слоев (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия в исходном состоянии и после отжига при температурах 350-550 °C в течение 10 часов

Fig. 2. Fragments of X-ray diffractograms (CoK_α) from the surface layers of (Ni-Cr)-Al composite coating in the initial state and after annealing at temperatures of 350-550 °C for 10 hours

Таблица 2. Содержание интерметаллидных соединений, размер ОКР фазы Al_3Ni и пористость (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия, после отжига по различным режимам

Table 2. Content of intermetallic compounds, size of the coherent scattering area of Al_3Ni phase and porosity of (Ni-Cr)-Al composite coating, after annealing under different regimes

Режим термической обработки	Содержание интерметаллидных соединений об. %	Размер ОКР фазы Al_3Ni , нм	Пористость, об. %
отжиг при 350 °C, 10 ч.	5-10	12	3-5
отжиг при 400 °C, 10 ч.	8-13	14	4-7
отжиг при 450 °C, 10 ч.	16-25	17	6-10
отжиг при 500 °C, 10 ч.	35-47	24	9-12
отжиг при 550 °C, 10 ч.	45-50	32	17-23

соединений – определялся с использованием зависимости величины физического уширения дифракционных линий от размера частиц (метод Селякова-Шеррера). Измерения твердости и микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузках 10 кг и 25 г соответственно.

Триботехнические испытания образцов напыленных покрытий проводились на трибометре АТВП. Испытания осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел (покрытие-контртело) при средней скорости взаимного перемещения $\approx 0,1$ м/с в условиях трения без смазочного материала и трения со смазочным материалом И-20. При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10). Удельная нагрузка испытаний при трении без смазочного материала составляла $P=1,5$ МПа, а со смазочным материалом – 10 МПа. Путь трения составлял ≈ 1200 м.

Результаты исследований и их обсуждение. Высокоскоростное распыление двух проволоочных материалов (Х20Н80 и АД1) приводит к формированию (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия, состоящего из чередующихся случайным образом частиц

нихрома (светлые области, Рис. 1) и алюминия (темные области, Рис. 1), а также расположенных между ними тонких прослоек оксидов. Размеры частиц в поперечном сечении составляют от 2 до 60 мкм толщиной и от 10 до 150 мкм шириной. Пористость (Ni-Cr)-Al покрытия после напыления не превышала ≈ 3 об. %, а его микротвердость светлых частиц и твердость покрытия составляли 415 HV 0,25 и 210 HV 10 [14].

В процессе напыления формируется композиционное покрытие с неоднородным химическим составом частиц. В частности, в центральной части частиц регистрируется до 2 масс. % Al, а в их приповерхностных объемах до 17 масс. % Al. В то же время частицы алюминия содержат до ≈ 4 масс. % Ni и до 1 масс. % Cr [14]. Переменный состав отдельных частиц покрытия свидетельствует о процессах контактного взаимодействия и частичного смешивания расплавленных капель нихрома и алюминия в процессе формирования покрытия. При этом на стадии распыления образуются частицы расплавов переменного состава, кристаллизующиеся в полете и при последующем соударении с подложкой. Анализ распределения элементов по поперечному

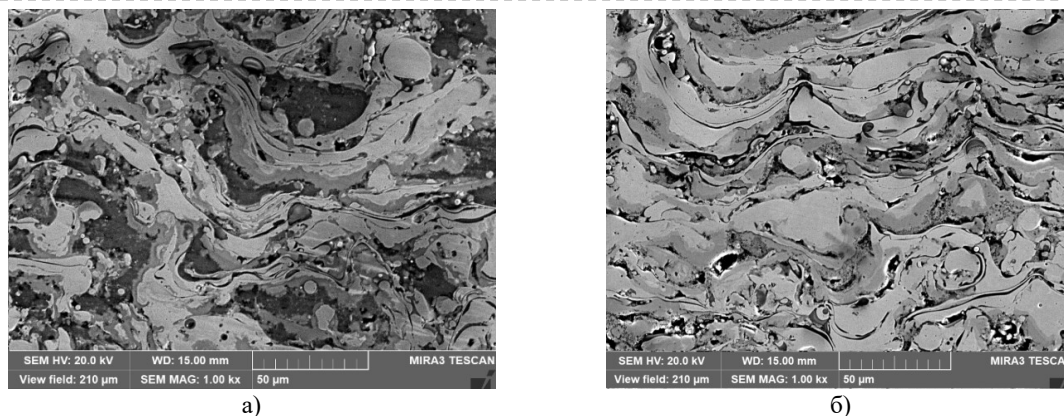
сечению частиц покрытия показывает, что при малой «толщине» распыляемых частиц может происходить сквозное легирование нихромовых частиц алюминием, а алюминиевых – никелем и хромом [14]. Таким образом, в результате высокоскоростной металлизации формируется гетерогенное (Ni-Cr)-Al композиционное покрытие, состоящее из частиц нихрома и алюминия, которые, в свою очередь, имеют переменный химический состав по сечению.

Фазовый состав (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия после напыления включает в себя матричные фазы γ -(Ni, Cr, Al), Al и интерметаллид AlNi ($\approx 5-7$ об. %), а также незначительное количество оксида Al_2O_3 (Рис. 2).

Проведение отжига (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия при температуре 350°C в течение 10 часов не приводит к существенному изменению его структуры и фазового состава (Рис. 2), что связано с относительно низкой диффузионной

подвижностью при этой температуре атомов алюминия и никеля в частицах покрытия. После отжига при температурах 400°C в течение 10 часов регистрируется образование интерметаллидных соединений Al_3Ni и AlNi ($\approx 8-13$ об. %) (Рис. 2) с размерами ОКР до ≈ 14 нм, что обусловлено взаимной диффузией алюминия и никеля между частицами покрытия. Отжиг при 450°C в течение 10 часов приводит к образованию в покрытии интерметаллидов Al_3Ni , AlNi, Al_3Ni_2 в количестве 16-25 об. % с размерами ОКР до ≈ 17 нм. (Рис. 2, Таблица 2) [14].

Отжиг при температурах 500°C и 550°C в течение 10 часов композиционного покрытия (Ni-Cr)-Al приводит к образованию в нем интерметаллидных соединений Al_3Ni_2 , AlNi, $AlNi_3$ и Al_3Ni (Рис. 2) с размерами до $\approx 24-32$ нм. Установлено, что алюминий в фазовом составе покрытий не регистрируется после десятичасового отжига при температуре $\geq 500^\circ\text{C}$, что связано с диффузионным взаимодействием с

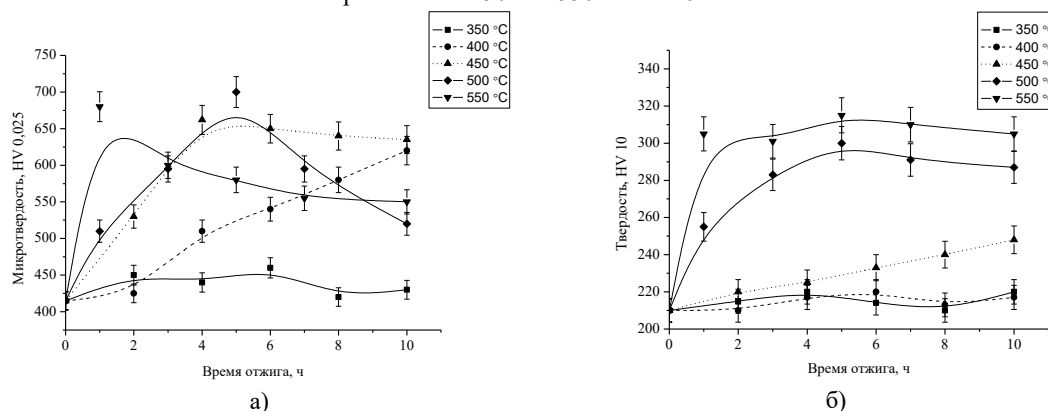


а – 450°C ; б – 550°C

Рис. 3. Характерные микроструктуры (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия после отжига при температурах 450°C и 550°C в течение 10 часов

а - 450°C ; б - 550°C

Fig. 3. Characteristic microstructures of (Ni-Cr)-Al composite coating after annealing at temperatures of 450°C and 550°C for 10 hours



а – микротвердость HV 0,025; б – твердость HV 10

Рис. 4. Микротвердость и твердость (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия, подвергнутого отжигу по различным режимам
а - microhardness HV 0.025; б - hardness HV 10

Fig. 4. Microhardness and hardness of (Ni-Cr)-Al composite coating, subjected to annealing under different regimes

нихромовыми частицами и образованием интерметаллидных соединений. Отсутствие в покрытии хром-алюминиевых интерметаллидов обусловлено высокой растворимостью хрома в фазах Al_3Ni , Al_3Ni_2 [14].

Ускоренный диффузионный перенос атомов между алюминиевыми и нихромовыми частицами композиционного покрытия интенсифицируется повышенным количеством дефектов кристаллической решетки матричных фаз, образующихся в частицах при напылении. В частности, частицы нихрома и алюминия находятся в метастабильном деформированном состоянии. Пластическая деформация происходит при соударении летящих со сверхзвуковой скоростью и частично закристаллизованных частиц с поверхностью подложки, а также последующим ударным взаимодействием формирующегося покрытия с новыми прилетающими частицами.

Отжиг покрытия в интервале температур 350-550°C в течение 10 часов приводит к повышению его пористости от 3-5 об.% до 17-23 об.% (Рис. 3, Таблица 2). Указанное явление обусловлено формированием диффузионной пористости вследствие реализации эффектов Френкеля и Киркендалла [15, 16].

Количественный анализ рентгеновских дифрактограмм (Ni-Cr)-Al покрытий после отжига в течение 10 часов при температурах 350-550°C позволил определить количество образовавшихся интерметаллидных соединений (Таблица 2). В частности, установлено, что общее содержание интерметаллидных соединений в отожженном покрытии с повышением температуры отжига от 400°C до 550°C увеличивается от 8 до 50 об. %.

На основании исследований фазового состава и структуры (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия показано, что при отжиге в покрытии протекает взаимная диффузия во множестве сформированных при напылении диффузионных пар (нихром-алюминий) с различным соотношением содержащихся компонентов. Диффузионное взаимодействие приводит к одновременному образованию в покрытиях различных интерметаллидных фаз (AlNi , AlNi_3 , Al_3Ni , Al_3Ni_2), которые располагаются в объеме покрытия случайным образом в виде отдельных соединений. Образование интерметаллидных соединений в композиционных покрытиях приводит к изменению их свойств, в частности, к повышению коррозионной стойкости и износостойкости при трении без смазочного материала, а также при трении со смазочным материалом [17].

Из результатов измерений твердости и микротвердости отожженных (Ni-Cr)-Al покрытий установлено (Рис. 4), что отжиг покрытия при температуре 400°C в течение 1-10

часов приводит к увеличению микротвердости его частиц до 650 HV 0,025, что в $\approx 1,6$ раза превышает их микротвердость в исходном состоянии. Отжиг покрытия при температурах 450, 550°C в течение 1-5 часов приводит к значительному повышению микротвердости его частиц с 415 до 700 HV 0,025, а твердости покрытия – с 210 до 310 HV 10, что в $\approx 1,7$ и $\approx 1,5$ раза выше по сравнению с исходным состоянием. Повышение микротвердости и твердости композиционного покрытия связано с образованием в нем различного количества интерметаллидных соединений Al_3Ni_2 , AlNi , Al_3Ni , AlNi_3 [18]. Снижение микротвердости покрытия в результате отжига при температурах 450-550°C в течение 5-10 часов (Рис. 4а) связано с образованием преимущественно менее твердых фаз (AlNi , AlNi_3) и увеличением среднего размера кристаллов интерметаллидных соединений. Некоторое снижение твердости покрытий, отожженных при температурах 500-550°C с выдержкой в течение 6-10 часов (Рис. 4б), связано с повышением пористости покрытий.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о целесообразности проведения отжига покрытий при относительно более высоких температурах, но с меньшей продолжительностью выдержки. В работе [19] представлены результаты исследований формирования структуры и фазового состава композиционного покрытия (Ni-Cr)-Al («X20H80+АД1») после отжига при температурах 550, 600 и 650°C и с выдержкой в течение 20, 40 и 60 минут. Установлено, что в (Ni-Cr)-Al композиционном покрытии в зависимости от температуры и времени выдержки образуются интерметаллидные соединения Al_3Ni_2 , AlNi , NiAl_3 , AlNi_3 , а микротвердость и твердость покрытий возрастают до $\approx 2,1$ и $1,3$ раз соответственно по сравнению с исходным состоянием [19]. При этом кинетика формирования структуры и фазового состава при напылении и последующем отжиге композиционного покрытия согласуется с результатами данной работы.

Из результатов триботехнических испытаний (Ni-Cr)-Al композиционных покрытий при трении без смазочного материала можно видеть (Рис. 5а), что отжиг приводит к увеличению их износостойкости. В частности, отжиг при 550°C в течение 20-60 минут приводит к снижению интенсивности массового изнашивания (I_q) композиционного покрытия в условиях трения без смазочного материала в $\approx 1,5$ - $2,5$ раза по сравнению с исходным состоянием, что связано с образованием при отжиге твердых интерметаллидных соединений с высоким содержанием алюминия – Al_3Ni и Al_3Ni_2 . Отжиг при температурах 600-650°C (время выдержки

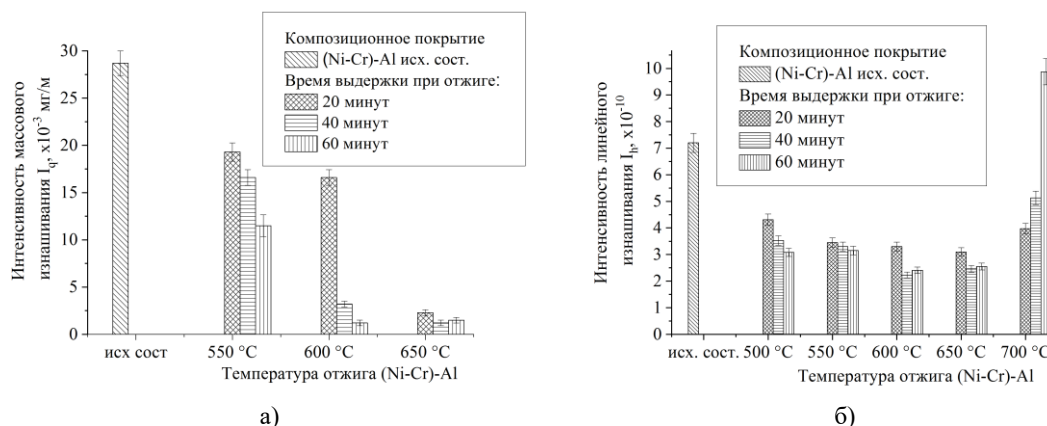


Рис. 5. Интенсивность массового изнашивания при трении без смазочного материала (а) и интенсивность линейного изнашивания при трении со смазочным материалом (б) (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия в исходном состоянии, а также

подвергнутого отжигу по различным режимам

Fig. 5. Mass wear intensity at friction without lubricant (a) and linear wear intensity at friction with lubricant (b) of (Ni-Cr)-Al composite coating in the initial state as well as subjected to annealing under different regimes

20-60 минут) приводит к снижению $I_q \approx 1,7-24,0$ раза по сравнению с исходным состоянием (Рис. 5а), что связано с дисперсионным упрочнением покрытия образовавшимися в большом количестве интерметаллидными соединениями с высоким содержанием никеля – $AlNi_3$ и $AlNi$ [20]. Коэффициент трения (μ) (Ni-Cr)-Al покрытия, подвергнутого отжигу при 550-650°C в течение 20-60 минут, при трении без смазочного материала повышался с увеличением температуры и времени выдержки при отжиге от $\mu \approx 0,60$ до 0,83, что связано с увеличением содержания в покрытии твердых интерметаллидных соединений.

Триботехнические испытания (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия в условиях трения со смазочным материалом (Рис. 5б) показали, что отжиг при 500-650°C приводит к повышению износостойкости покрытия. Коэффициент трения покрытия в исходном состоянии и подвергнутого отжигу по различным режимам составляет $\mu \approx 0,08-0,10$.

Интенсивность линейного изнашивания (I_l) композиционного покрытия, подвергнутого отжигу при температурах 500-550°C, снижается с увеличением времени отжига от 20 до 60 минут, что связано с увеличением количества образовавшихся при отжиге интерметаллидных соединений с высоким содержанием алюминия – Al_3Ni и Al_3Ni_2 . Максимальная износостойкость покрытий регистрируется после отжига при температурах 600 и 650°C в течение 40 минут, что обусловлено образованием в покрытиях интерметаллидных соединений с высоким содержанием никеля – $AlNi$ и $AlNi_3$, а также Al_3Ni , Al_3Ni_2 . В частности, I_l покрытия (Ni-Cr)-Al после отжига при температуре 600°C в течение 40 минут составляет $2,23 \times 10^{-10}$, что в $\approx 1,9$ и $\approx 3,2$ раза ниже по сравнению с отжигом

при 500°C в течение 20 минут и исходным состоянием покрытия соответственно. Снижение износостойкости (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия после отжига при 700°C с выдержкой в течение 20-60 минут обусловлено высокой пористостью ($\approx 30-40$ об. %) покрытия, формирующейся при данных режимах отжига. Повышенная пористость покрытий способствует их разупрочнению, а также зарождению и распространению в нем микротрещин при трении со смазочным материалом, что приводит к выкрашиванию частиц и катастрофическому износу покрытия.

Таким образом, установлено, что отжиг (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия в интервале температур 550-650°C с выдержкой в течение 20-60 минут приводит к повышению его износостойкости до $\approx 24,0$ раз при трении без смазочного материала и до $\approx 3,2$ раз при трении со смазочным материалом по сравнению с его исходным состоянием (после напыления). Повышение износостойкости покрытия связано с дисперсионным упрочнением частиц покрытия вследствие образования при отжиге интерметаллидных соединений $AlNi_3$, $AlNi$, Al_3Ni_2 , Al_3Ni .

Заключение. Исследованы структура, фазовый состав, твердость и триботехнические характеристики (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия в исходном состоянии и после отжига по различным режимам.

Показано, что отжиг (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия приводит к диффузионному взаимодействию частиц никрома и алюминия, имеющих переменный химический состав. Диффузионное взаимодействие во множестве сформировавшихся при напылении диффузионных пар приводит к одновременному

образованию спектра интерметаллидных соединений Al_3Ni_2 , AlNi , AlNi_3 , Al_3Ni , располагающихся в объеме покрытия случайным образом. При этом общее количество интерметаллидных соединений после отжига 550°C в течение 10 часов достигает ≈ 50 об. %. Отжиг приводит к повышению микротвердости и твердости (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия до $\approx 2,1$ и $\approx 1,5$ раз соответственно по сравнению с его исходным состоянием.

Установлено, что отжиг (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия приводит к повышению его износостойкости до $\approx 24,0$ раз при трении без смазочного материала и до $\approx 3,2$ раз при трении со смазочным материалом по сравнению с его исходным состоянием.

Список литературы

1. Белоцерковский М. А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. Минск : УП «Технопринт», 2004. 198 с.
2. Rupperecht C. Neue Methoden und Anwendungen des Thermischen Spritzens. Chemnitz, 2012. 191 s.
3. Коробов Ю. С., Панов В. И., Разиков Н. М. Основные методы и материалы газотермического напыления // Анализ свойств газотермических покрытий: учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 80 с.
4. Elagina O. Y., Gusev V. M., Buklakov A. G. [et al.] Deposition of Pseudo-Alloy Coatings by Electric Arc Metallization // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. №3. Pp. 641–645.
5. Адашкин А. М., Красновский А. Н., Тарасова Т. В. Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов. Москва : ИНФРА-М, 2021. 250 с.
6. Оспенникова О. Г., Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Шестаков А. В., Туренко Е. Ю. Создание интерметаллидных никелевых сплавов и композиционных материалов на их основе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 3. С. 75–89.
7. Wang Z. L., Ju C., Song Q. H. [et al.] Reaction mechanism of Ni-Al during thermal spraying // Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. 2021. Vol. 16. №4. Pp. 1295–1311.
8. Химухин С. Н., Еремина К.П. Структурное строение электроискровых покрытий, полученных сплавами Ni-Al на сталях // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19. № 3(219). С. 126–132.
9. Konieczny M., Mola R., Thomas P. [et al.] Processing, microstructure and properties of laminated Ni-intermetallic composites synthesised using Ni sheets and Al foils // Archives of metallurgy and materials. 2011. Vol. 56. Pp. 693–702.
10. Косицын С. В. Косицына И. И. Фазовые и структурные превращения в сплавах на основе моноалюминид никеля // Успехи физ. мет. 2008. Т. 9. С. 195–258.
11. Xiao R. [et al.] Formation and growth kinetics of intermediate phases in Ni-Al diffusion couples // Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition. 2009. Vol. 24 (5). Pp. 787–790.
12. Ломберг Б. С., Базылева О. А., Карашаев М. М. [и др.] Исследование высокотемпературной интерметаллидной матрицы системы Ni-Al-Co для получения конструкционных сплавов с повышенной пластичностью (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. №9(103). С. 3–10.
13. Lee J.-H., Yun J.-G., Kwak S.-Y., Kang Ch.-Y. Nucleation and Growth of Intermetallic Compounds Formed in Boron Steel Hot-Dipped in Al-Ni alloy // Coatings. 2017. Vol. 7. №195. Pp. 1–14.
14. Астрашаб Е. В., Григорчик А. Н., Кукареко В. А. Влияние отжига на структуру и фазовый состав (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия // Инновации в машиностроении: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции, 26 ноября - 2 декабря 2023, Кемерово / под ред. Блюменштейна В. Ю. Кемерово : КузГТУ, 2023. С. 93–100.
15. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. М. : Металлургия, 1978. 248 с.
16. Kishore K. [et al.] Microstructure evolution and hardness of hot dip aluminized coating on pure iron and EUROFER 97 steel: Effect of substrate chemistry and heat treatment // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 409. P. 126783.
17. Шорина Н. С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. 248 с.
18. Колобов Ю. Р. [и др.]. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением. М. : МИСиС, 2008. 326 с.
19. Астрашаб Е. В., Григорчик А. Н., Кукареко В. А., Белоцерковский М. А. Влияние температуры и времени отжига на износостойкость покрытий из псевдосплава на основе Ni-Cr-Al, напыленных методом высокоскоростной металлизации // Трение и износ. 2020. № 5 (41). С. 538-544.
20. Филиппов М. А., Шешуков О. Ю. Трение и антифрикционные материалы : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. 204 с.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Астрашаб Евгений Викторович, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, (Республика Беларусь, г. Минск, 220072, ул. Академическая, 12), e-mail: astrashabev@mail.ru
Григорчик Александр Николаевич, к.т.н., Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, (Республика Беларусь, г. Минск, 220072, ул. Академическая, 12), e-mail: GrigorchikAN@gmail.com
Кукареко Владимир Аркадьевич, д.ф.-м.н., проф., Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, (Республика Беларусь, г. Минск, 220072, ул. Академическая, 12), e-mail: v_kukareko@mail.ru
Белоцерковский Марат Артёмович, д.т.н., проф., Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, (Республика Беларусь, г. Минск, 220072, ул. Академическая, 12), e-mail: mbelotser@gmail.com
Сосновский Алексей Валерьевич, к.т.н., Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, (Республика Беларусь, г. Минск, 220072, ул. Академическая, 12), e-mail: sosnovskij@inbox.ru.

Заявленный вклад авторов:

Астрашаб Евгений Викторович – обзор соответствующей литературы, проведение исследований и испытаний, сбор и анализ данных, заключение, написание текста.

Григорчик Александр Николаевич – обзор соответствующей литературы, проведение исследований и испытаний, сбор и анализ данных, заключение, написание текста.

Кукареко Владимир Аркадьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, написание текста, заключение, интерпретация результатов.

Белоцерковский Марат Артёмович – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, выбор режимов высокоскоростной металлизации, анализ результатов, заключение.

Сосновский Алексей Валерьевич – обзор соответствующей литературы, выбор режимов и проведение высокоскоростной металлизации покрытий, анализ результатов, заключение.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article**STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF ANNEALED (Ni-Cr)-Al COMPOSITION COATING**

Evgeniy V. Astrashab, Aleksandr N. Grigorchik, Vladimir A. Kukareko, Marat A. Belotserkovsky, Alexey V. Sosnovskiy

Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus

*for correspondence: astrashabev@mail.ru

**Article info**

Received:

16 April 2024

Accepted for publication:

29 May 2024

Accepted:

29 May 2024

Published:

28 June 2024

Keywords:

non-destructive testing,
microdamage, neural networks,
residual life, metal structures,
machine learning

Abstract.

Ensuring the reliability and safety of steel structures is a key challenge for engineers and maintenance professionals. In this context, non-destructive testing (NDT) becomes an integral part of the process of monitoring the condition of metal structures. At the same time, difficulties arise when choosing a criterion for assessing performance and interpreting the values obtained as a result of calculations, which affects the quality of decision-making on performance and assessing the possibility and method of extending the resource. The paper discusses the process of developing an API (application program interface) for machine learning in the Python programming language, designed to solve the problem of predicting the current state of metal structures based on non-destructive testing (NDT) data. The developed API allowed users to create more complex and informative features based on raw data, which can improve the accuracy and ability of machine learning models to predict the condition of metal structures. Such updating and improvement of models becomes important in the context of constant evolution of the state of structures and NDT data. As a result of the research conducted to assess the influence of the characteristics of the applied ML algorithms on the quality and speed of predicting the state of metal structures made of structural steel and 0.12C-1Cr-1Mo-1Va steel according to non-destructive testing (NDT) parameters, a classification of topologies of ML models was made based on the quality of prediction and

decision making. The scientific foundations of the algorithmic support of the decision-making preparation system for assessing the performance and extending the service life of technical devices of hazardous production facilities have been developed based on the use of artificial neural networks; they represent a sequence of operations common to different classes and grades of steel, as well as for equipment that is operated in different conditions (except drums).

For citation: Astrashab E.V., Grigorchik A.N., Kukareko V.A., Belotserkovsky M.A., Sosnovskiy A.V. Structure, phase composition and tribotechnical properties of annealed (Ni-Cr)-Al composition coating. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 3(163):99-108. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-99-108, EDN: UXULYE

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the RNF grant, Agreement No. 22-29-20192, and the Kemerovo Region– Kuzbass grant, Agreement No. 16.

REFERENCES

1. Grin' Ye.A. Povysheniye rabocheho resursa elementov teplosilovogo oborudovaniya elektrostantsiy s uchetom makropovrezhdymosti metalla» avtoreferat dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk. Moscow. 2010.
2. Makhutov N.A. Generalized regularities of deformation and fracture processes. *Her. Russ. Acad. Sci.* 2017; 87:217–228.
3. Rezinskikh V.F., Grin' E.A. Reliability and safety of thermal power stations in Russia at the present stage: problems and future objectives. *Therm. Eng.* 2010; 57:1–8.
4. Smirnov A.N. Evolyutsiya mikrostruktury i kriterii predel'nogo sostoyaniya pri prognozirovanii rabotosposobnosti teploustoychivyykh staley: dissertatsiya ... doktora tekhnicheskikh nauk : 05.16.01, 05.02.11 Novosibirsk. 2004. 397 s.
5. Klyuyev V.V. Degradatsiya diagnostiki bezopasnosti. Moskva: Izdatel'skiy dom «Spektr»; 2012. 128 s.
6. Berezina T.G., Bugay N.V., Trunin I.I. Diagnostirovaniye i prognozirovaniye dolgovechnosti metalla teploenergeticheskikh ustanovok. Kiyev: Tekhnika; 1991. 120 s.
7. Strukturno-fazovyye sostoyaniya perspektivnykh metallicheskih materialov: Kollektivnaya monografiya: pod red. Gromova V.Ye. Novokuznetsk: Izd-vo NPK; 2009. 613 s.
8. Getsov L., Rybnikov A., Semenov A., Semenov S., Tikhomirova E. Thermal fatigue of singlecrystal superalloys: Experiments, crack-initiation and crack-propagation criteria. *Mater. Tehnol.* 2015; 49:773–778.
9. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials.* 2020; 13(20):1–13.
10. Kumanin V.I. Struktura, povrezhdennost' i rabotosposobnost' teplostoykoy stali pri dlitel'noy ekspluatatsii. *MiTOM.* 1980; 12:26–29.
11. Kovpak V.I. K voprosu o prognozirovanii ostatochnoy dolgovechnosti metallicheskih materialov. *Problemy prochnosti.* 1981; 10:95–99.
12. Antikayn P.A., Zykov A.K. Izgotovleniye ob'yektov kotlonadzora. Spravochnoye izdaniye. Metallurgiya. 1988. 328c.
13. Kumanin V.I. Struktura, povrezhdennost' i rabotosposobnost' teplostoykoy stali pri dlitel'noy ekspluatatsii. *MiTOM.* 1980; 12:26–29.
14. Kotelnikov V.V., Akimov D.A., Kozel'skaya S.O., Gur'yanova Ye.O. Razrabotka programmnogo obespecheniya i metodiki prognozirovaniya resursa ekspluatatsii slozhnykh konstruksiy na osnove rezul'tatov khronologicheskoy diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya i iskusstvennogo intellekta. *Kontrol'. Diagnostika.* 2022; 25(1):26–37.
15. Botvina L.R., Kushnarenko V.M., Tyutin M.R., Levin V.P., Morozov A.E., Bolotnikov A.I. Fracture Stages and Residual Strength of Pipe Steel after Long-Term Operation. *Phys. Mesomech.* 2021; 24:475–485.
16. Kotelnikov V.V. Metodika prognozirovaniya ekspluatatsionnoy bezopasnosti konstruksiy na osnove primeneniya kompleksnogo nerazrushayushchego kontrolya i metodov iskusstvennogo intellekta. *Svarka i diagnostika.* 2021; 1:23–28.
17. Smirnov A.N., Ozhiganov E.A., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Murav'ev V.V. The dependence of local deformations and internal stress fields on welding technique for grade VSt3sp structural steel: I. The influence of welding technique on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of grade VSt3sp steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2015; 51(11):705–712. DOI: 10.1134/S1061830915110066.
18. Murav'yev V.V., Murav'yeva O.V., Strizhak V.A., [et al.] Akusticheskaya tenzometriya i strukturoskopiya zheleznodorozhnykh koles. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova; 2014. 180 s.
19. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Petrov K.V. Connection between the properties of 0.4Cr steel bar stock and the speed of bulk and rayleigh waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2017; 53(8):560–567. DOI: 10.1134/S1061830917080046.
20. Muravev V.V., Lenkov S.V., Tapkov K.A. In-Production Nondestructive Testing of Internal Stresses in

Rails Using Acoustoelasticity Method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019; 55(1):8–14.

21. Ababkov N.V., Teleguz A.S., Pimonov M.V. Sozdaniye API biblioteki dlya otsenki tekushchego sostoyaniya i prognozirovaniya ostatochnogo resursa metallokonstruktsiy po dannym nerazrushayushchego kontrolya. *Innovatsii v mashinostroyenii (InMash-2023): Sbornik trudov XIV MNTK*. Kemerovo: KuzGTU; 2023.

22. Zuev L.B. Chernov–Luders and Portevin–Le Chatelier deformations in active deformable media of different nature. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017. 58(2):328–334.

23. Zuev L.B. Autowave mechanics of plastic flow in solids. *Physics of Wave Phenomena*. 2012; 20(3):166–173.

24. Danilov V.I., Barannikova S.A., Zuev L.B. Localized Strain Autowaves at the Initial Stage of Plastic Flow in Single Crystals. *Technical Physics*. 2003; 48(11):1429–1435.

25. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V., Smirnov A.N. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018; 48(2):87–92.

26. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A., Ploskov N.A. O prirode uprugoplasticheskogo invarianta deformatsii. *ZHTF*. 2018; 88(6):855–859.

27. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Zuev L.B. On the kinetics of mobile Chernov–Luders band fronts. *AIP Conference Proceedings*. 2016; 1783:020035.

28. Gorbatenko V.V., Danilov V.I., Zuev L.B. Elastoplastic transition in material with sharp yield point. *AIP Conference Proceedings*. 2015; 1683:020058.

29. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process. *Materials and Design*. 2011; 32:1554–1558.

30. Ababkov N.V., Yefremenkova M.V., Nikitenko M.S., Pimonov M.V., Smirnov A.N., Teleguz A.S. Svidetel'stvo o registratsii bazy dannykh 2023620325, 20.01.2023. Baza dannykh strukturnykh, akusticheskikh i magnitnykh kharakteristik v metalle oborudovaniya toplivnoenergeticheskogo kompleksa. Zayavka № 2022623693 ot 14.12.2022.

31. Smirnov A.N., Ababkov N.V., Nikitenko M.S. [et al.] Programmnyy modul' otsenki sostoyaniya gornodobyvayushchego oborudovaniya na osnove zakonomernostey izmeneniya strukturno-fazovogo sostoyaniya i poley vnutrennikh napryazheniy metalla. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022; 6(154):50–58.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Evgeniy V. Astrashab, Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, (Belarus, Minsk 220072, 12 Akademicheskaya Street), e-mail: astrashabev@mail.ru

Aleksandr N. Grigorchik, C. Sc. in Engineering., Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, (Belarus, Minsk 220072, 12 Akademicheskaya Street), e-mail: GrigorchikAN@gmail.com

Vladimir A. Kukareko, Dr. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, (Belarus, Minsk 220072, 12 Akademicheskaya Street), e-mail: v_kukareko@mail.ru

Marat A. Belotserkovsky, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, (Belarus, Minsk 220072, 12 Akademicheskaya Street), e-mail: mbelotser@gmail.com

Alexey V. Sosnovskiy, C. Sc. in Engineering., Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, (Belarus, Minsk 220072, 12 Akademicheskaya Street), e-mail: sosnovskij@inbox.ru

Contribution of the authors:

Evgeniy V. Astrashab – review of relevant literature, research and testing, data collection and analysis, conclusion, writing of the text.

Aleksandr N. Grigorchik – review of relevant literature, conducting research and tests, collecting and analyzing data, concluding, writing a text.

Vladimir A. Kukareko – setting a research task, scientific management, writing a text, conclusion, interpretation of results.

Marat A. Belotserkovsky – formulation of a research task, review of relevant literature, selection of high-speed metallization modes, analysis of results, conclusion.

Alexey V. Sosnovskiy – review of the relevant literature, selection of modes and high-speed metallization of coatings, analysis of the results, conclusion.

All authors have read and approved the final manuscript.

