



2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ПРИ ИХ СМЕШИВАНИИ НА ПРОЧНОСТЬ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ

INFLUENCE OF DURATION OF MECHANICAL ACTIVATION OF MULTI-COMPONENT POWDER MIXTURE ON THE STRENGTH OF PLASMA COATING

✉¹ **Попов Дмитрий Анатольевич**, к.т.н., доцент кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: qaz.7@mail.ru

✉¹ **Popov Dmitry Anatolyevich**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of mechanical engineering technologies, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: qaz.7@mail.ru

Кадырметов Анвар Минирович, д.т.н., профессор кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Kadyrmetov Anvar Minirovich, doctor of technical sciences, professor of the department of mechanical engineering technologies, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Усков Алексей Иванович, магистрант кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: uskov.aleshcka@yandex.ru

Uskov Alexey Ivanovich, master's student, department of mechanical engineering technologies, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: uskov.aleshcka@yandex.ru

Попов Сергей Александрович, магистрант кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Popov Sergey Alexandrovich, master's student, department of mechanical engineering technologies, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Мандрыкин Игорь Александрович, аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Mandrykin Igor Alexandrovich, postgraduate, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Попов Петр Николаевич, аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Popov Petr Nikolaevich, postgraduate, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. В статье рассмотрено влияние продолжительности перемешивания компонентов покрытия FeCoCrAlTiCuMo в специальном смесителе-активаторе на прочность получаемого покрытия. Получено косвенное подтверждение влияния механической активации при смешивании на формирование плазменного покрытия и определено рациональное время смешения. По полученным данным можно судить о возможности создания ВЭС-покрытия при смешении компонентов в инертной атмосфере, позволяющие увеличить прочность покрытия более чем в 2 раза, в сравнении со смешиванием порошков традиционным способом в воздушной атмосфере.

Annotation. The article considers the effect of the duration of mixing the components of the FeCoCrAlTiCuMo coating in a special mixer-activator on the strength of the resulting coating. Indirect confirmation of the effect of mechanical activation during mixing on the formation of the plasma coating was obtained and a rational mixing time was determined. Based on the data obtained, it is possible to judge the possibility of creating a HES coating by mixing the components in an inert atmosphere, which allows increasing the strength of the coating by more than 2 times, in comparison with mixing powders by the traditional method in an air atmosphere.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЯ, ПРОЧНОСТЬ, ВРЕМЯ СМЕШИВАНИЯ, МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ, СМЕСИТЕЛЬ.

Keywords: PLASMA SPRAYING, COATING QUALITY, STRENGTH, MIXING TIME, MECHANICAL ACTIVATION, MIXER.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В современном машиностроении актуальным направлением является получение высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [1], необходимых для обеспечения надёжности и ресурса деталей машин и механизмов, работающих в сложных условиях нагружения и агрессивных средах [2-4]. Традиционными технологиями создания ВЭС являются порошковая металлургия и литье, однако цельнолитые детали из ВЭС, произведённые данными методами, являются дорогостоящими по причине содержания в них ценных компонентов в относительно высоких концентрациях, например HfNbTaTiZrMo, AlFeCrNiTiSi и AlCoCrFeNiTi.

Спекание порошковых материалов - энергоёмкий, дорогостоящий технологический процесс, требующий специальной подготовки, в частности: измельчения и смешивания компонентов, которое достигается при использовании высокоэнергетических установок (мельницы и дробилки) [5].

При восстановлении деталей и нанесении на них покрытий с необходимыми физико-химическими и физико-механическими свойствами активно применяется технология плазменного напыления (ПН) [1, 6, 7]. При этом, в зависимости от конструкции плазматрона в него подаётся либо подготовленная смесь порошковых материалов, либо отдельно порошковые компоненты в сечения канала плазматрона, соответствующие температурам плавления компонентов [7]. В обоих случаях адгезионно-когезионная прочность покрытий остаётся низкой и существенно уступает литейным и сварочно-наплавочным технологиям ($\sigma = 80 \dots 120$ МПа, против 600 МПа).

Использование для ПН порошковых смесей, в частности многокомпонентных, требует предварительного их механического смешивания. В то же время известно, что механическое взаимодействие металлов сопровождается ростом потенциальной энергии кристаллической решётки вследствие её остаточной деформации, образованию вакансий, а в целом, к росту её поверхностной химической активности [5]. Кроме этого, под действием механического взаимодействия происходит разрушение окисной плёнки на поверхности металлов, которая ока-

зывает экранирующее действие при сплавлении компонентов, так как оксид имеет более высокую температуру плавления и прочность и/или химическую стойкость, чем сам металл. Например, это имеет место для Al и его оксида Al_2O_3 . Несомненно, это препятствует формированию новых металлических соединений при формировании покрытия. провоцирует появление дефектов в покрытии, снижающих его механические свойства и повышает пористость.

По нашему мнению, механическая активация при смешивании может способствовать росту химического взаимодействия порошковых компонентов при формировании покрытия наносимого ПН и, возможно, позволит создать покрытия, обладающие уникальными физико-механическими свойствами, близкими к ВЭС. В свою очередь, это будет способствовать широкому распространению ПН при упрочнении новых деталей и восстановлению изношенных за счёт относительно низкой себестоимости сырья и доступности технологии.

По данным источника [8], качество смешения характеризуется вероятностным распределением частиц компонента и его соотношением с другими компонентами в выбранном объёме смеси. Однако, время смешения варьируется от 40 минут до суток, при этом, оно определяется опытным путём с промежуточным контролем в процессе смешения [9], так как гранулометрический состав материала всегда различен. Это связано с технологиями получения металлических порошков. Время механической активации зависит от способа активации и традиционно составляет не более 90 минут [10-12].

На данный момент, способы механической активации порошков металлов, как отдельный процесс, в котором полностью или частично отсутствует измельчение, требуют апробирования и изучения. Поэтому целью нашей работы стало исследование влияния степени механической активации многокомпонентной смеси металлических порошков при ее перемешивании в предложенном нами смесителе. Контроль качества смешивания и активации осуществлялся по критерию прочности покрытия, полученного плазменным напылением при подаче порошковой смеси в инертной среде.

Научная гипотеза – повышение поверхностной химической активности мелкодисперсных порошковых компонентов механической активацией при их смешивании в инертной среде для последующего создания плазменных покрытий с заданными свойствами.

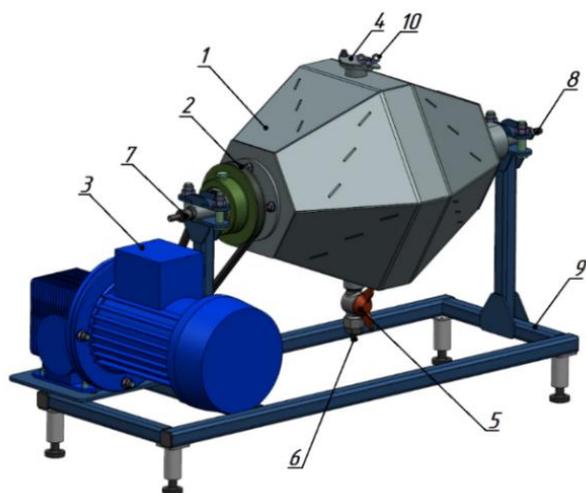
2 Материалы и методы

В источнике [5] описан механизм механической активации металлического порошка в мельницах и дробилках. Однако, степень помола частиц металла не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к гранулометрическому составу при плазменном напылении. При механической активации с одновременным измельчением в высокоэнергетических установках получаемые частицы имеют размер до 10 мкм в то время, как при напылении оптимальный размер частиц составляет 40-60 мкм, и фракция тонкого помола понижает коэффициент используемого материала за счёт чрезмерной передачи тепловой энергии и испарения.

Для сохранения гранулометрического состава порошковой смеси при ее механической активации предлагается использовать смеситель-активатор (рис. 1), конструкция которого описана в источнике [13].

Барабан смесителя оснащён отверстием для засыпания и высыпания порошковой смеси и её непрерывной подачи к плазмотрону. В барабане смесителя можно создавать замещающую атмосферу и избыточное давление путём прокачки и замещения воздуха инертным газом через неподвижные штуцера, расположенные на оси.

Внутри барабана размещены перфорированные пластины под углом, обеспечивающим подъём и перемещение порошка от основного объёма к краю. Такое расположение пластин обеспечивает глубокое перемешивание порошковых компонентов с их активным взаимодействием между собой, а также со стенками и пластинами, необходимым для активации поверхности частиц порошка, что, в свою очередь, влияет на качество соединения покрытия с основой при ПН.

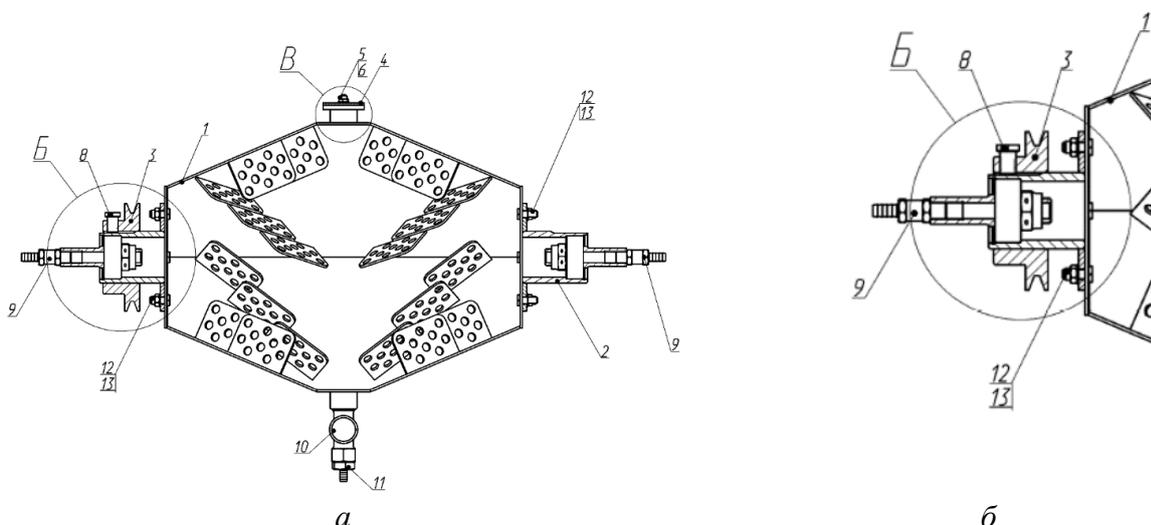


a

б

1 – смеситель; 2 – ремённая передача; 3 – привод смесителя (мотор-редуктор); 4 – засыпная горловина; 5 – шаровой кран; 6 – штуцер присоединения трубки подачи порошка к плазмотрону; 7 – штуцер с обратным клапаном ввода инертного газа; 8 – штуцер к клапану вывода газа; 9 – каркас смесителя-активатора; 10 – винт засыпной горловины

Рисунок 1 – Общий вид смесителя-активатора: *a* – эскиз; *б* – фото



a

б

1 – корпус барабан смесителя; 2 – корпус фланца; 3 – шкив; 4 – отверстие для засыпания; 5, 6 – винты затяжки крышки горловины; 8 – винт стопорный шкива; 9 – обратный клапан; 10 – шаровой кран; 11 – штуцер выхода на трубку подачи порошка к плазмотрону; 12, 13 – нормали; *a* – барабан смесителя (изнутри); *б* – узел подачи газа с обратным клапаном

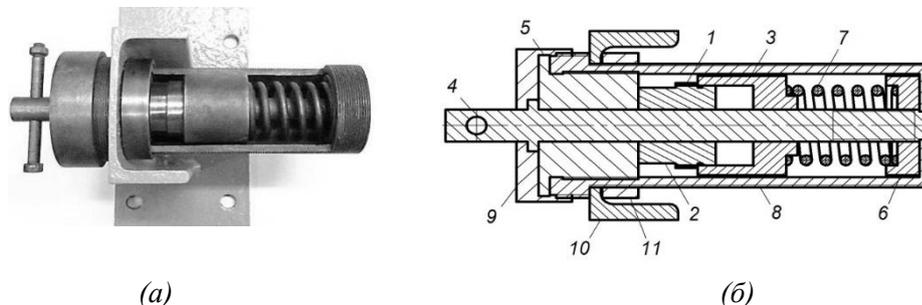
Рисунок 2 – Внутреннее устройство барабана

Для ПН был выбран состав из 7 компонентов порошка (FeCoCrAlTiCuMo) в эквимольном соотношении. Так как был запланирован однофакторный эксперимент, режимы смешивания, кроме параметра времени смешивания, были выбраны на постоянном уровне по массе порошка 500 гр. и скорости вращения образцов 60 мин^{-1} .

В процессе смешения-активации брались пробы порошка для визуального контроля качества смешения и состояния смеси с интервалом 10 минут, для чего на некоторое время останавливался барабан.

В качестве транспортирующего газа был использован аргон, состав напылялся на образцы из углеродистой стали 45 ГОСТ 1050-88 с предварительно нанесённым подслоем из порошка ПР-НХ17СР4 на который напыляли многокомпонентный состав.

Испытания покрытий на адгезионную прочность проводили с помощью оригинального устройства, предварительно протарированного (рис. 3).



1 – покрытие; 2 – пуансон; 3 – матрица; 4 – нагружающий винт; 5 – втулка;
6 – чашка; 7 – тарировочная пружина; 8 – корпус; 9 – крышка; 10 – державка;
11 – фиксирующее кольцо

Рисунок 3 – Устройство для определения адгезионной прочности покрытия на сдвиг: внешний вид (а) и конструктивная схема (б) устройства

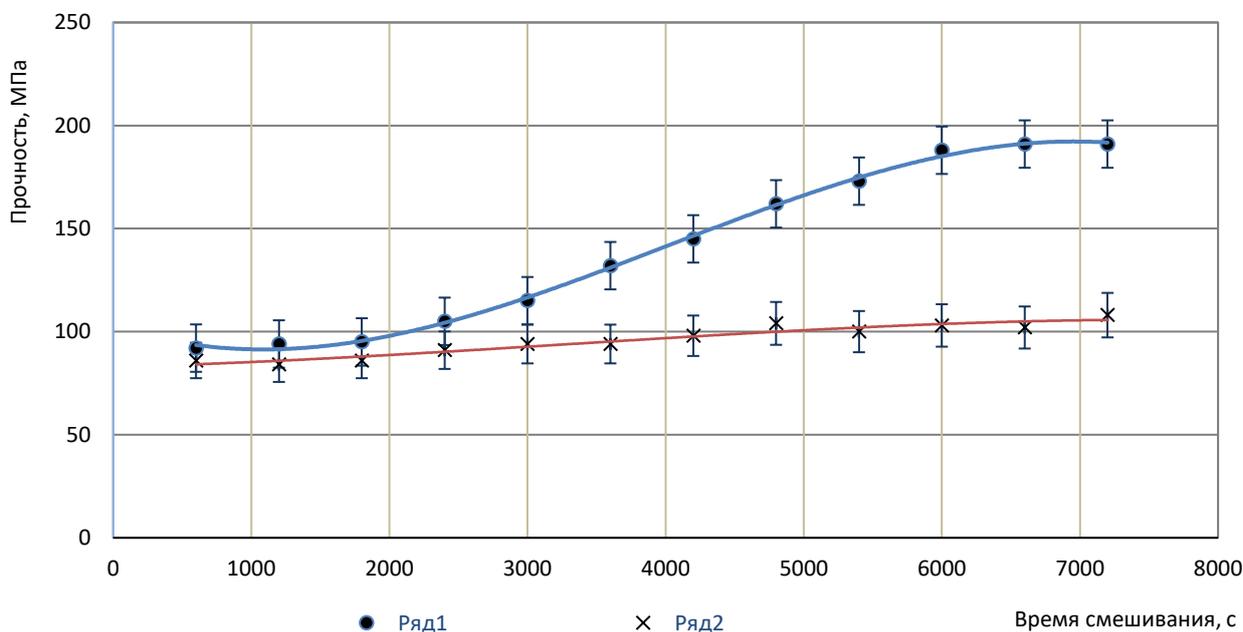
Последовательность подготовки и проведения смешивания порошка была следующей:

- предварительно просушенную в электропечи (1,5 ч) многокомпонентную смесь (FeCoCrAlTiCuMo) засыпали в смеситель и герметично закрывали засыпное отверстие;
- прокачивали аргон через барабан смесителя в течении 5 мин с низкой скоростью потока, периодически останавливая подачу газа и прокручивая барабан, для вытеснения воздуха из труднодоступных мест аргоном;
- создавали избыточное давление аргона, с целью компенсации потерь газа при проведении эксперимента. Качество вытеснения воздуха оценивали газоанализатором (Сигнал-4КМ ГОСТ Р 52350.29.2-2010) по концентрации кислорода;
- запускали вращение барабана с частотой 60 мин^{-1} в течение 10 мин (1 акт);
- по завершении первого акта смешивания, присоединяли к нижнему штуцеру барабана транспортирующую к плазмотрону магистраль и после поворота барабана на $90-120^\circ\text{C}$ проводили продувку магистрали аргоном из смесителя для подготовки к последующему ПН;
- осуществляли ПН на предварительно подготовленную поверхность образца (с нанесённым подслоем ПР-НХ17СР4) последовательно в 2 слоя многокомпонентное покрытие, используя в качестве транспортирующего газа аргон;
- по окончании ПН оплавливали напыленное покрытие плазменной струёй;
- после полного остывания испытывали покрытие на прочность (срез), используя оригинальное устройство, представленное на рис. 3.

3 Результаты исследований

В результате проведённых экспериментальных испытаний была получена зависимость (рис. 4), точки которой хорошо аппроксимировалась степенной функцией с доверительным интервалом от $\pm 11 \dots 12 \text{ МПа}$. Анализ зависимости показал, что заметное повышение прочности покрытия происходило после 2520 с (0,7 ч) смешивания (рис. 4), а после 5400 с (1,5 ч) значения прочности покрытия стабилизировались и дальнейшие испытания прекращались. Вероятно, такой результат свидетельствует об исчерпании потенциала механической актива-

ции порошковой смеси данного состава (FeCoCrAlTiCuMo) и его влияния на прочность соединения покрытия с основой при постоянных условиях смешения (частота вращения барабана 60 мин^{-1} ; масса загрузки 500 гр.).



«Ряд 1» – смешивание в инертной среде (активация); «Ряд 2» – смешивание в воздухе

Рисунок 4 – Зависимость прочности получаемого покрытия от времени смешивания компонентов

4 Обсуждение и заключение

Результаты однофакторного эксперимента показали, что прочность покрытия и его соединения с основой за счёт смешения металлических порошковых компонентов (FeCoCrAlTiCuMo) в оригинальной конструкции смесителя-активатора существенно возрастала в зависимости от времени смешивания. Так, в интервале $500 \dots 2500 \text{ с}$ заметного приращения прочности не наблюдалось, а с повышением продолжительности более 2700 с наблюдалось существенное увеличение прочности покрытия и его соединения с основой (почти двухкратное) с максимальным значением 180 МПа при смешивании более 6000 с ($1,67 \text{ ч}$). Увеличение продолжительности смешения не приводило к росту прочности.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии продолжительности смешения многокомпонентного порошкового состава на прочность покрытия, полученного ПН при подаче порошка под срез плазматрона и последующего его оплавления. Сравнительный анализ зависимостей, полученных при смешивании и подаче порошков традиционным способом, показал, что поверхностная механическая активация, вероятно, наступает только в инертной газовой атмосфере, где невозможно повторное восстановление окисной плёнки, вплоть до вхождения порошка в плазменную струю. Для проверки данных утверждений требуется проведение металло- и рентгенографических исследований, которые позволят выявить структурные изменения, возможные аномалии, а также появление новых фаз. Опыты показали, что немаловажное значение на эффект поверхностной активации могут оказывать такие факторы, как состав компонентов и режимы обработки (частота вращения и масса смеси), а также состав инертной атмосферы.

Список литературы

- 1 Кадырметов, А. М. Перспективы применения покрытий на основе многокомпонентных высокоэнтропийных сплавов в машиностроении / А. М. Кадырметов, Д. А. Попов, Е. В. Снятков // Силовая энергетика и электроника перспективных автомобилей: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 08 апреля 2021 года / Отв. редактор В.И. Прядкин. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 36-39. – DOI 10.34220/РЕЕРС2021_36-39.
- 2 Юров, В. М. К вопросу о трении высокоэнтропийных сплавов и покрытий / В. М. Юров, С. А. Гученко // Интерактивная наука. – 2019. – № 9(43). – С. 34-37. – DOI 10.21661/г-508093. – EDN CLFBZF.
- 3 Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и покрытий : Техническая программа и тезисы школы молодых ученых, Белгород, 09–11 октября 2019 года / Под редакцией Г.А. Салищева, М.С. Тихоновой, Е.А. Щиголовой. – Белгород: Общество с ограниченной ответственностью Эпицентр, 2019. – 72 с. – ISBN 978-5-6042972-3-0. – EDN WLBGYK.
- 4 Структура и свойства композиционного покрытия на основе высокоэнтропийного сплава, упрочненного частицами CrB / А. А. Руктуев, А. Б. Юргин, В. С. Шикалов [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 87-103. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.3-87-103. – EDN HVCASS.
- 5 Широков, Ю. Г. Механохимия. Теоретические основы – 2015. – 224 с.
- 6 Кадырметов, А. М. Рентгеноструктурный анализ многокомпонентного сплава FeCoCrAlTiCuMo, полученного плазменным напылением с кратным оплавлением / А. М. Кадырметов, Д. А. Попов, И. А. Симакин // Электрофизические методы обработки в современной промышленности : Материалы V Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 15–16 декабря 2021 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2022. – С. 104-107. – EDN NOZCVU.
- 7 Обоснование конструкции и параметров специального плазматрона для напыления многокомпонентных покрытий / А. М. Кадырметов, Д. А. Попов, А. И. Усков, В. Р. Фатхулин // Современные технологии производства в машиностроении: МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. Том Выпуск 16. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2023. – С. 117-126. – EDN RZLNCHD.
- 8 Анализ закономерностей и определение аналитических зависимостей для вычисления необходимых параметров протекания процессов механического измельчения и смешивания сыпучих материалов / А. Ф. Ильющенко, А. И. Лецко, Н. М. Парницкий [и др.] // Порошковая металлургия : Республиканский межведомственный сборник научных трудов / НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ; ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ, ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ИНСТИТУТ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА О. В. РОМАНА». Том Выпуск 45. – Минск: Республиканское унитарное предприятие "Издательский дом "Белорусская наука", 2022. – С. 35-43. – EDN EDDZMH.
- 9 Захаров, Д. А, Сальников, А. В. Влияние режимов смешивания порошков на структуру и физико-механические свойства твердого сплава vk10s // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhimov-smeshivaniya-poroshkov-na-strukturu-i-fiziko-mehaniicheskie-svoystva-tverdogo-splava-vk10s> (дата обращения: 17.09.2024).
- 10 Шевцова, Л. И. Определение времени механической активации, обеспечивающее формирование однородной структуры сплава ВКНА-1В / Л. И. Шевцова // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2022. – Т. 1. – С. 264-265. – EDN TVIOMT.
- 11 Кочетов, Н. А. Влияние времени механической активации смеси Ti + 2B на горение цилиндрических и ленточных образцов / Н. А. Кочетов, С. Г. Вадченко // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 4. – С. 77-81. – DOI 10.15372/FGV_20150410. – EDN UNCLAJ.
- 12 Абдульменова, Е. В. Закономерности изменения структуры после механической активации порошкового TiNi и его взаимодействие с водородом / Е. В. Абдульменова, С. Н. Кульков // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 8(740). – С. 137-142. – DOI 10.17223/00213411/62/8/137. – EDN YYLJNH.
- 13 Влияние механической активации порошка на пористость плазменного покрытия / А. М. Кадырметов, Д. А. Попов, А. И. Усков, А. А. Мельников // Современные технологии производства в машиностроении : Межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2024. – С. 61-65.

References

- 1 Kadyrmetov, A. M. Prospects for the Application of Coatings Based on Multicomponent High-Entropy Alloys in Mechanical Engineering / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, E. V. Snyatkov // Power Engineering and Electronics of Advanced Cars: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, April 08, 2021 / Responsible. editor V. I. Pryadkin. - Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov, 2021. - P. 36-39. - DOI 10.34220/PEEPC2021_36-39. - EDN EMFFGN.
- 2 Yurov, V. M. On the Issue of Friction of High-Entropy Alloys and Coatings / V. M. Yurov, S. A. Guchenko // Interactive Science. – 2019. – No. 9(43). – P. 34-37. – DOI 10.21661/r-508093. – EDN CLFBZF.
- 3 Structure and properties of high-entropy alloys and coatings: Technical program and theses of the school of young scientists, Belgorod, October 9–11, 2019 / Edited by G.A. Salishchev, M.S. Tikhonova, E.A. Shchigoleva. – Belgorod: Limited Liability Company Epicenter, 2019. – 72 p. – ISBN 978-5-6042972-3-0. – EDN WLBGYK.
- 4 Structure and properties of composite coating based on high-entropy alloy reinforced with CrB particles / A. A. Ruktuev, A. B. Yurgin, V. S. Shikalov [et al.] // Metal processing (technology, equipment, tools). - 2023. - Vol. 25, No. 3. - Pp. 87-103. - DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.3-87-103. - EDN HVCASS.
- 5 Shirokov, Yu. G. Mechanochemistry. Theoretical foundations - 2015. - 224 p.
- 6 Kadyrmetov, A. M. X-ray diffraction analysis of the multicomponent FeCoCrAlTiCuMo alloy obtained by plasma spraying with multiple reflow / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, I. A. Simakin // Electrophysical methods of processing in modern industry: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students, Perm, December 15-16, 2021. - Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2022. - P. 104-107. - EDN NOZCVU.
- 7 Justification of the design and parameters of a special plasma torch for spraying multicomponent coatings / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, A. I. Uskov, V. R. Fatkhulin // Modern production technologies in mechanical engineering: INTER-UNIVERSITY COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS. Volume Issue 16. - Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2023. - P. 117-126. - EDN RZNCHD.
- 8 Analysis of regularities and determination of analytical dependencies for calculating the necessary parameters of the processes of mechanical grinding and mixing of bulk materials / A. F. Ilyushchenko, A. I. Letsko, N. M. Parnitsky [et al.] // Powder metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers / NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS; STATE RESEARCH AND PRODUCTION ASSOCIATION OF POWDER METALLURGY, STATE SCIENTIFIC INSTITUTION "INSTITUTE OF POWDER METALLURGY NAMED AFTER ACADEMICIAN O. V. ROMAN". Volume Issue 45. – Minsk: Republican Unitary Enterprise "Publishing House" Belarusian Science ", 2022. – Pp. 35-43. – EDN EDDZMH.
- 9 Zakharov, D. A., Salnikov, A. V. Influence of powder mixing modes on the structure and physical and mechanical properties of VK10S hard alloy // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical sciences. 2013. No. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhimov-smeshivaniya-poroshkov-na-strukturu-i-fiziko-mekhanicheskie-svoystva-tverdogo-splava-vk10s> (date of access: 17.09.2024).
- 10 Shevtsova, L. I. Determination of the mechanical activation time, ensuring the formation of a homogeneous structure of the VKNA-1V alloy / L. I. Shevtsova // Aerospace engineering, high technologies and innovations. - 2022. - Vol. 1. - Pp. 264-265. - EDN TBIOMT.
- 11 Kochetov, N. A. Effect of mechanical activation time of the Ti + 2B mixture on the combustion of cylindrical and tape samples / N. A. Kochetov, S. G. Vadchenko // Physics of combustion and explosion. - 2015. - Vol. 51, No. 4. - Pp. 77-81. - DOI 10.15372/FGV20150410. - EDN UHCLAJ.
- 12 Abdulmenova, E. V. Regularities of structural changes after mechanical activation of powder TiNi and its interaction with hydrogen / E. V. Abdulmenova, S. N. Kulkov // News of universities. Physics. - 2019. - Vol. 62, No. 8 (740). - Pp. 137-142. - DOI 10.17223 / 00213411 / 62/8/137. - EDN YYLJNH.
- 13 Influence of mechanical activation of powder on the porosity of plasma coating / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, A. I. Uskov, A. A. Melnikov // Modern production technologies in mechanical engineering: Inter-university collection of scientific papers. – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2024. – P. 61-65. – EDN EEQKRJ.

© Попов Д. А., Кадырметов А. М., Усков А. И.,
Попов С. А., Мандрыкин И. А., Попов П. Н., 2024