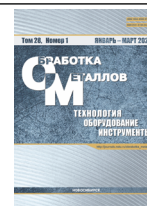




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Износостойкость плазменных покрытий, сформированных комбинированными методами поверхностно-термического воздействия: к вопросу создания гибридного станочного оборудования

Егор Зверев^{1, а}, Вадим Скиба^{1, б, *}, Аягма Жаргалова^{2, в}, Никита Вахрушев^{1, д}, Андрей Попков^{1, е}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-4405-6623>, zverev@corp.nstu.ru; ^б <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeeba_vadim@mail.ru;

^в <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, azhargalova@bmsu.ru; ^д <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>, vah_nikit@mail.ru;

^е <https://orcid.org/0009-0006-5587-9990>, andrey.popkov.2013@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.74 : 621.785.5 : 621.9.06

История статьи:

Поступила: 17 января 2026

Рецензирование: 08 февраля 2026

Принята к печати: 14 февраля 2026

Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Плазменное напыление
Комбинированная обработка
Высокоэнергетический нагрев ТВЧ
Металлокерамические покрытия
Механические смеси
Износостойкость
Гибридное станочное оборудование
Интеграция поверхностно-термических операций

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSUN-2026-0005).

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования».

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях возрастающей потребности современной станкоинструментальной промышленности в разработке гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические операции, актуальным становится исследование комбинированных технологий формирования износостойких покрытий. Объединение на единой станочной базе различных по физической природе методов обработки – механического формообразования и высокоэнергетического поверхностно-термического модифицирования – представляет собой перспективное направление повышения эффективности и качества технологических процессов. Плазменное напыление, дополненное высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) или формированием композиционных металлокерамических покрытий, создает предпосылки для проектирования многофункциональных гибридных систем, удовлетворяющих требованиям Индустрии 4.0. Однако вопрос сравнительной эффективности различных вариантов комбинированной обработки покрытий при трибологическом нагружении до настоящего времени остается недостаточно изученным. **Цель настоящей работы:** проведение систематических сравнительных испытаний износостойкости плазменных покрытий, сформированных при различных условиях комбинированной технологии напыления, в условиях сухого трения скольжения, а также формулирование рекомендаций для проектирования перспективного гибридного станочного оборудования. **Методы исследования.** Исследованию подлежали плазменные покрытия, напыленные порошками марок ПГ-12Н-01, ПГ-С27 и ПГН-ВЗК, а также подвергнутые дополнительному высокоэнергетическому индукционному оплавлению, и покрытия из механических смесей «металлический порошок – оксид алюминия (Al₂O₃)». Напыление проводилось плазмотроном ПУН-3 при оптимизированных режимах. Высокоэнергетический нагрев осуществлялся генератором ВЧГ 6-60/0,44 с частотой 440 кГц. Испытания на износостойкость проводились по схеме непрерывного сухого трения скольжения с твердосплавным индентором из сплава ВК8 при нагрузке 20 Н. Критерием износа служил объем потери материала покрытия, определяемый по ширине лунки износа с помощью инструментального микроскопа УИМ-21. Микроструктура покрытий изучалась методами оптической металлографии. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что оплавленные никелевые покрытия марки ПГ-12Н-01 обладают износостойкостью, превышающей на 35 % показатели исходного неоплавленного покрытия. При этом оплавление покрытий из высокохромистого чугуна ПГ-С27 привело к снижению износостойкости на 20 %, что связано с формированием неблагоприятной дендритной структуры. Покрытия на основе металлокерамических смесей показали наилучшие результаты: никелево-керамическая смесь ПГ-12Н-01 (20 %) + 15А (80 %) превосходит базовый вариант на 44 %, а кобальто-керамическая смесь ПГН-ВЗК (20 %) + 15А (80 %) обеспечивает увеличение износостойкости на 30 % по сравнению с исходным кобальтовым покрытием при практически полном прекращении износа после периода приработки. Показано, что структура металлокерамических покрытий характеризуется равномерным распределением мелкодисперсных частиц оксидной керамики в металлической матрице, что обеспечивает высокую трибологическую стойкость композиции. Результаты исследований формируют экспериментальную основу для проектирования гибридного станочного оборудования, интегрирующего механическую обработку и поверхностно-термические технологические операции.

Для цитирования: Износостойкость плазменных покрытий, сформированных комбинированными методами поверхностно-термического воздействия: к вопросу создания гибридного станочного оборудования / Е.А. Зверев, В.Ю. Скиба, А.Д. Жаргалова, Н.В. Вахрушев, А.С. Попков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 114–129. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-114-129.

*Адрес для переписки

Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
г. Новосибирск, 630073, Россия
Тел.: 8 (383) 346-17-79, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Введение

Современное развитие станкоинструментальной промышленности характеризуется устойчивой тенденцией к созданию многофункционального оборудования, способного реализовать несколько принципиально различных по физической природе технологических операций на единой платформе [1, 2]. Концепция гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические операции, отвечает современным требованиям к точности, производительности, автоматизации и адаптивности оборудования в условиях цифровизации производств и парадигмы Индустрии 4.0 [3, 4]. В условиях увеличения сложности обрабатываемых деталей, роста спроса на многофункциональное оборудование и сокращения производственных циклов становится необходимым интегрировать в станочное оборудование передовые технологии поверхностно-термического упрочнения, роботизации и цифрового управления [5, 6].

Традиционная организация технологического процесса, при которой операции поверхностно-термического упрочнения и механической обработки выполняются на различном оборудовании в территориально разобщенных подразделениях, обуславливает возникновение значительных погрешностей: деформации при термическом воздействии, погрешности базирования и установки заготовок, накопленные отклонения размерных цепей [7, 8]. Совокупное влияние указанных факторов приводит к необходимости назначения увеличенных межоперационных припусков на финишную обработку, достигающих 30–40 % от глубины упрочненного слоя [9]. Разрозненное применение различных технологий обработки увеличивает число операций и затраты времени, а также снижает точность обработки. Поэтому создание комплексного подхода к проектированию гибридных систем, объединяющего современные принципы автоматизации, цифрового моделирования и прогнозирования параметров обработки, является важной задачей для повышения конкурентоспособности отечественной станкоинструментальной отрасли [10–21].

Плазменная технология служит одним из наиболее эффективных способов повышения износостойкости деталей технологического

оборудования. Напыленный с помощью плазмы защитный слой способен противостоять различным видам износа: абразивному, эрозийному, коррозионно-механическому и износу при трении скольжения [22–24]. Однако основной проблемой обеспечения эксплуатационных свойств плазменных покрытий остается получение структуры со стабильными качественными характеристиками – минимальной пористостью, высокой когезионной прочностью и надежной адгезией к основе [25, 26]. На практике решение этой задачи усложняется многофакторностью процесса напыления, при котором периферийные области плазменной струи имеют меньший нагрев по сравнению с центральной зоной, что приводит к неполному оплавлению части порошковых частиц [27, 28].

Значительные усилия направлены на моделирование состояния порошковых частиц в плазменной струе и условий их соударения с подложкой [29–31]. Несмотря на развитие теоретических методов, сложность математического аппарата зачастую не позволяет определить режимные параметры, гарантирующие формирование низкопористой плотной структуры [32, 33]. Тем не менее экспериментально доказано, что оптимизация режимов напыления существенно влияет на структурные характеристики покрытий. В работах [34, 35] представлены типовые варианты структур, отличающихся пористостью, степенью деформации частиц, долей нерасплавленных включений и характером прилегания к основе.

Для достижения качественно нового уровня характеристик покрытий разработаны комбинированные технологии, основанные на дополнительном энергетическом воздействии. К числу наиболее перспективных направлений относятся высокоэнергетический нагрев покрытий токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) и формирование композиционных металлокерамических покрытий из механических смесей [36–38]. Метод ВЭН ТВЧ базируется на комплексном использовании эффектов индукционного нагрева – поверхностного эффекта, эффекта близости и эффекта паза – и обеспечивает объемно-поверхностный нагрев напыленного слоя с удельными мощностями, достигающими порядка 10^8 Вт/м², при глубине проникновения индуцированной энергии, сопоставимой с толщиной

покрытия (до 1,0 мм) [39, 40]. Напыление покрытий из механических смесей металлического порошка и оксидно-алюминиевой керамики (Al_2O_3) позволяет формировать композиционные структуры, в которых металлическая составляющая служит пластичной связкой для твердых тугоплавких частиц керамики [41–43].

Указанные направления комбинированной обработки являются принципиально важными с точки зрения проектирования перспективного гибридного станочного оборудования. Интеграция источников концентрированной энергии – индукционных генераторов, плазмотронов, лазерных головок – в единую станочную систему совместно с узлами механической обработки создает возможность реализации полного технологического цикла изготовления упрочненных деталей на одном рабочем месте [44, 45]. Однако существующие методологические подходы часто не учитывают многозадачность таких систем, сложность их проектирования на этапе предпроектных исследований и необходимость соответствия требованиям модульности и гибкости конструкции [46, 47].

До настоящего времени систематические сравнительные исследования износостойкости покрытий, полученных при различных вариантах комбинированной обработки, в единых условиях трибологического нагружения не проводились. Между тем такие данные необходимы для научного обоснования выбора конкретного варианта поверхностно-термического модуля при проектировании гибридного оборудования.

Цель настоящей работы: проведение систематических сравнительных испытаний на износостойкость плазменных покрытий, сформированных при различных условиях комбинированной технологии напыления, в условиях сухого трения скольжения, а также структурный анализ закономерностей влияния комбинированной обработки на трибологические характеристики покрытий.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- определение кинетики изнашивания плазменных покрытий из порошков марок ПГ-12Н-01, ПГ-С27 и ПГН-ВЗК без дополнительной обработки, после высокоэнергетического индукционного оплавления, а также покрытий из металлокерамических механических смесей;

- сравнительный анализ износостойкости покрытий, полученных при различных вариантах комбинированной технологии;

- металлографическое исследование микроструктуры покрытий для выявления структурных факторов, определяющих трибологическое поведение;

- формулирование рекомендаций по выбору рационального варианта комбинированной обработки для применения в перспективном гибридном станочном оборудовании.

Методы исследования

Материалы и оборудование для плазменного напыления. В качестве устройства для нанесения плазменных покрытий использовался плазмотрон марки ПУН-3, развивающий мощность до 40 кВт [44, 48]. Рабочим плазмообразующим газом служил воздух. Экспериментальная установка оснащена системой управления, позволяющей регулировать энергетические параметры процесса (силу тока дуги, напряжение, расход плазмообразующего газа), а также кинематические характеристики – скорость перемещения плазмотрона и частоту вращения образцов.

Образцы для напыления представляли собой втулки (наружный диаметр 25 мм, ширина 12 мм), изготовленные из низкоуглеродистой стали марки Ст20 (ГОСТ 1050–2013). Непосредственно перед напылением все образцы проходили струйно-абразивную подготовку в специализированной камере. Обработка при одинаковых условиях позволила сформировать на поверхности заготовок шероховатость в диапазоне $R_z = 70...85$ мкм, обеспечивающую требуемое качество адгезионного контакта. Толщина напыленного слоя выдерживалась в диапазоне 0,55...0,60 мм.

На основании предшествующих исследований [35, 48, 49] для проведения экспериментов были выбраны три марки стандартных износостойких порошков с фракционным размером частиц 50...100 мкм. Химический состав порошков приведен в табл. 1.

На основании ранее проведенных исследовательских работ [35, 49] определены оптимизированные режимы плазменного напыления: сила тока дуги 140...160 А при напряжении 140 В; расход плазмообразующего газа 18...22 л/мин;

Химический состав порошковых материалов для плазменного напыления

Chemical composition of powder materials for plasma spraying

Марка порошка / Powder grade	C, %	Cr, %	Ni, %	Si, %	Fe, %	B, %	W, %	Al, %	Co, %
ПГ-12Н-01 / PG-12N-01	0,3...0,6	8...14	Основа / balance	1,2...3,2	2...5	1,7...2,8	—	0,8	—
ПГ-С27 / PG-S27	3,3...4,5	25...28	1,5...2	1...2	Основа / balance	—	0,2...0,4	—	—
ПГН-ВЗК / PGN-V3K	1...1,3	28...32	0,5...2	2...2,7	2	—	4...5	—	Основа / balance

дистанция напыления 110...125 мм; частота вращения образцов 50 мин⁻¹; линейная подача плазмотрона 300 мм/мин. Толщина слоя за один проход составляла 0,2 мм.

Высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты. Для комбинированной обработки покрытий методом ВЭН ТВЧ использовалась установка, оснащенная генератором ВЧГ 6-60/0,44 с рабочей частотой 440 кГц [39, 40]. Установка комплектовалась петлевым индуктором с ферритовым магнитопроводом марки N87, обеспечивающим концентрацию электромагнитного поля и выделение энергии на глубину 0,6...0,8 мм, что достаточно для прогрева всей толщины напыленного слоя. Режимы индукционного воздействия: удельная мощность $(3,1...3,2) \cdot 10^8$ Вт/м² при скорости относительного перемещения образцов и индуктора 70...75 мм/с. Указанные параметры обеспечивают объемно-поверхностный нагрев покрытия до температуры, достаточной для оплавления металлических порошков, при высокой производительности обработки.

Формирование покрытий из металлокерамических смесей. Для получения композиционных покрытий использовался технологический прием приготовления механических смесей с заданным соотношением компонентов [41–43]. В качестве твердой керамической фракции применялся электрокорунд марки 15А с зернистостью 20...28 мкм (Al₂O₃). Перемешивание осуществлялось в специальной шаровой мельнице до достижения однородного распределения компонентов. На основании предшествующих исследований [48, 49] установлено, что оптимальным является соотношение 20 масс. %

металлического порошка и 80 масс. % керамики. Были подготовлены две механические смеси: ПГ-12Н-01 (20 %) + 15А (80 %) и ПГН-ВЗК (20 %) + 15А (80 %). Для напыления указанных смесей потребовалась корректировка режимов в сторону увеличения энергии плазменной струи: сила тока дуги 160...165 А при напряжении 140 В; расход газа 16...18 л/мин; дистанция напыления 110 мм.

Испытания на износостойкость. Покрытия, полученные при различных вариантах обработки, подвергались сравнительным трибологическим испытаниям. Конструкция испытательного стенда реализовала схему непрерывного сухого трения скольжения при отсутствии смазки (рис. 1). В качестве контртела применялся твердосплавный индентор из сплава ВК8 диаметром 30 мм. Параметры испытаний: частота

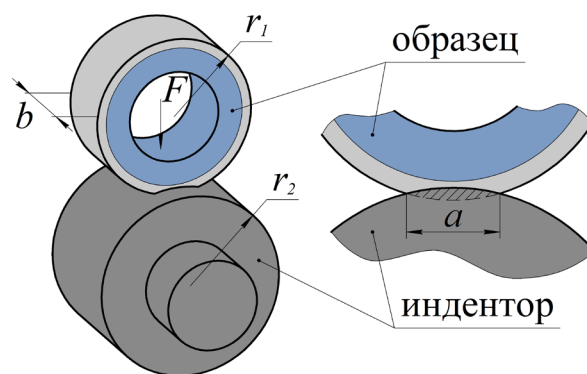


Рис. 1. Схема испытаний покрытий на износостойкость:

1 – образец с покрытием; 2 – твердосплавный индентор; F – нагрузка; n – частота вращения

Fig. 1. Scheme of wear resistance testing:

1 – specimen with coating; 2 – cemented carbide indenter; F – load; n – rotational velocity

вращения индентора 1500 об/мин; нормальная нагрузка на пару трения 20 Н.

Интегральной характеристикой износа служила величина потери объема материала покрытия V , определяемая по формуле

$$\Delta V = \left(\frac{\pi r_1^2 \arcsin \frac{a}{2r_1} + \pi r_2^2 \arcsin \frac{a}{2r_2}}{180^\circ} - \frac{a}{2} \left(\sqrt{r_1^2 - \frac{a^2}{4}} + \sqrt{r_2^2 - \frac{a^2}{4}} \right) \right) b,$$

где r_1 – радиус втулки с покрытием, мм; r_2 – радиус твердосплавного индентора, мм; b – ширина втулки, мм; a – ширина лунки износа, мм.

Измерение ширины лунки износа a осуществлялось с помощью инструментального микроскопа УИМ-21 с ценой деления 1 мкм. Каждая точка на кривых изнашивания определялась как среднее арифметическое значение трех параллельных опытов в заданном цикле, что обеспечивало статистическую достоверность получаемых результатов.

Металлографические исследования. Микроструктура покрытий изучалась на поперечных шлифах, подготовленных по стандартной металлографической методике с применением

последовательного шлифования и полирования. Наблюдения проводились на оптическом металлографическом микроскопе при увеличениях $\times 100 \dots \times 500$.

Результаты и их обсуждение

Кинетика изнашивания покрытий. Проведенные исследования позволили получить обобщенную картину интенсивности изнашивания покрытий в зависимости от пути трения при различных условиях комбинированной технологии. На рис. 2 представлены кривые кинетики объемного износа для всех исследованных вариантов покрытий.

Анализ полученных данных позволяет выявить ряд характерных закономерностей. Среди стандартных (необработанных) покрытий наименьшей износостойкостью обладает никелевое покрытие марки ПГ-12Н-01 (кривая 1), что объясняется относительно невысокой твердостью никелевой матрицы по сравнению с другими исследованными материалами. Покрытие из высокохромистого легированного чугуна ПГ-С27 (кривая 2) занимает промежуточное положение; его износостойкость обусловлена наличием хромистых карбидов в структуре, обеспечивающих

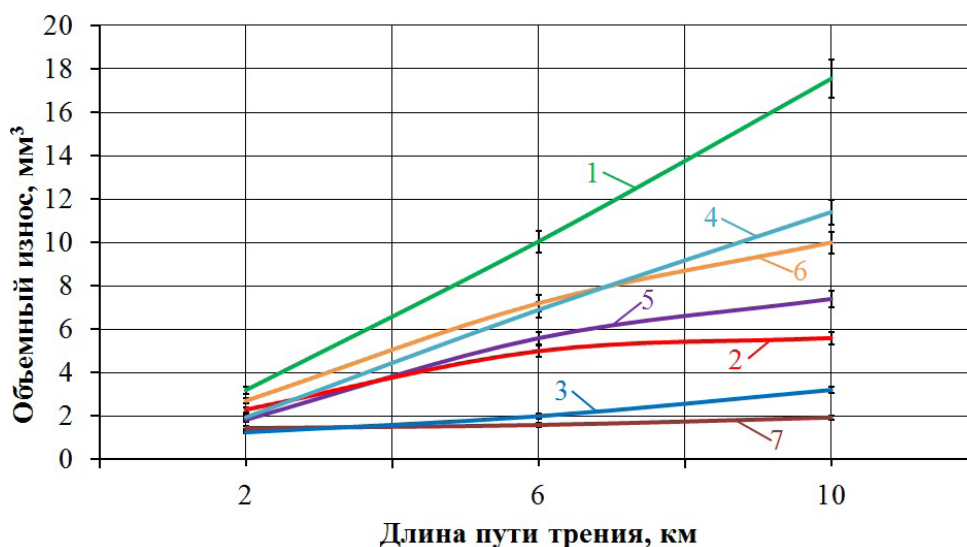


Рис. 2. Кинетика изнашивания образцов с плазменными покрытиями:

- 1 – ПГ-12Н-01; 2 – ПГ-С27; 3 – ПГН-В3К; 4 – ПГ-12Н-01 (с оплавлением ВЭН ТВЧ);
5 – ПГ-С27 (с оплавлением ВЭН ТВЧ); 6 – ПГ-12Н-01 (20 %) + 15А (80 %);
7 – ПГН-В3К (20 %) + 15А (80 %)

Fig. 2. Wear kinetics of specimens with plasma coatings:

- 1 – PG-12N-01; 2 – PG-S27; 3 – PGN-V3K; 4 – PG-12N-01 (with HFC remelting);
5 – PG-S27 (with HFC remelting); 6 – PG-12N-01 (20 %) + 15A (80 %);
7 – PGN-V3K (20 %) + 15A (80 %)

повышенную сопротивляемость абразивному воздействию. Наилучшую стойкость к разрушению среди стандартных покрытий демонстрирует кобальтовый порошок ПГН-ВЗК (кривая 3), что связано с благоприятным сочетанием высокой твердости хромо-вольфрамовых карбидов и пластичности кобальтовой матрицы.

Влияние высокоэнергетического индукционного оплавления. Дополнительная обработка методом ВЭН ТВЧ оказала неоднозначное влияние на износостойкость покрытий из различных материалов. Оплавление никелевых покрытий марки ПГ-12Н-01 (кривая 4) привело к заметно-му снижению интенсивности изнашивания: по конечным значениям объемного износа относительное повышение износостойкости составило примерно 35 %. Такой эффект является закономерным следствием формирования литой беспористой структуры, устраняющей концентраторы напряжений и зоны ослабленного межчастичного сцепления в напыленном слое. Полученный результат согласуется с данными работ [39, 40], в которых было показано, что индукционное оплавление никелевых самофлюсующихся сплавов приводит к ликвидации пористости и формированию сплошной структуры, аналогичной литой.

Принципиально иная картина наблюдалась при оплавлении покрытий из высокохромистого чугуна ПГ-С27 (кривая 5). Вместо ожидаемого повышения зафиксировано снижение износостойкости на 20 % по сравнению с базовым вариантом. Уровень износостойкости оплавленных образцов начинает снижаться задолго до достижения максимального пути трения. Этот отрицательный эффект обусловлен спецификой структурных превращений при кристаллизации высокохромистого чугуна из жидкого состояния. Формирующаяся при оплавлении дендритная структура с неравномерным распределением карбидной фазы обладает пониженной сопротивляемостью износу по сравнению с исходной дисперсной структурой напыленного покрытия [50]. Кроме того, не исключается возможный перегрев материала в процессе высокоэнергетического нагрева, приводящий к снижению физико-механических свойств. Следует подчеркнуть, что предшествующие эксперименты с оплавлением покрытий ПГН-ВЗК также не дали положительного результата вследствие формирования

неравномерной структуры, что свидетельствует об ограниченной применимости метода ВЭН ТВЧ для покрытий на основе высоколегированных сплавов [40].

Таким образом, хотя технология ВЭН ТВЧ и обеспечивает существенное повышение износостойкости никелевых покрытий, на практике весьма сложно гарантировать стабильное качество оплавленного слоя для широкого спектра материалов. Этот вывод имеет принципиальное значение для проектирования гибридного станочного оборудования, в котором модуль индукционного нагрева должен обеспечивать прогнозируемый и воспроизводимый результат вне зависимости от обрабатываемого материала.

Износостойкость металлокерамических покрытий. Экспериментальные исследования убедительно показали, что введение оксидно-алюминиевой керамики в состав покрытия обеспечивает наиболее значимый и устойчивый эффект повышения износостойкости. Никелево-керамическая смесь ПГ-12Н-01 (20 %) + 15А (80 %) (кривая 6) продемонстрировала износостойкость, превышающую базовый никелевый вариант на 44 % и превосходящую результат, полученный на оплавленных покрытиях, на 11 %. Этот факт свидетельствует о том, что формирование композиционной структуры с включениями высокотвердой керамики представляет собой более эффективный способ повышения износостойкости по сравнению с термическим модифицированием однокомпонентного покрытия.

Кобальто-керамическая смесь ПГН-ВЗК (20 %) + 15А (80 %) (кривая 7) показала максимальный результат среди всех исследованных вариантов. Повышение стойкости к износу по отношению к исходному кобальтовому покрытию составило 30 %. Характерной особенностью кинетики изнашивания данного покрытия является практически полное прекращение объемного износа после завершения кратковременного периода приработки пары трения. Линейный характер кривой изнашивания с близким к нулю угловым коэффициентом позволяет предположить, что ресурс кобальто-керамических покрытий значительно превышает величину пути трения, установленную в настоящих экспериментальных исследованиях. Это обстоятельство указывает на потенциально высокую долговечность таких покрытий при промышленной эксплуатации

деталей, работающих в условиях сухого трения скольжения.

Сводные данные о сравнительной износостойкости исследованных покрытий представлены в табл. 2.

Металлографический анализ. Для объяснения выявленных закономерностей трибологического поведения был проведен структурный анализ покрытий, сформированных при различных условиях комбинированной технологии.

Таблица 2

Table 2

Сравнительная износостойкость плазменных покрытий при различных вариантах комбинированной обработки

Comparative wear resistance of plasma coatings under different combined treatment conditions

Группа / Group	Вариант покрытия / Coating variant	Изменение износостойкости относительно базового варианта, %* / Change in wear resistance relative to the base variant, %*
1	ПГ-12Н-01 (базовый) / PG-12N-01 (base)	0 (эталон 1 / reference 1)
	ПГ-12Н-01 + ВЭН ТВЧ / PG-12N-01 + HFC remelting	+35
	ПГ-12Н-01 (20 %) + 15А (80 %) / PG-12N-01 (20 %) + 15А (80 %)	+44
2	ПГ-С27 (базовый) / PG-S27 (base)	0 (эталон 2 / reference 2)
	ПГ-С27 + ВЭН ТВЧ / PG-S27 + HFC remelting	-20
3	ПГН-В3К (базовый) / PGN-V3K (base)	0 (эталон 3 / reference 3)
	ПГН-В3К (20 %) + 15А (80 %) / PGN-V3K (20 %) + 15А (80 %)	+30

* Примечание: по отношению к базовому покрытию в пределах группы.

На рис. 3 представлен типовой металлографический снимок микроструктуры никелевого плазменного покрытия ПГ-12Н-01 без дополнительной обработки. Отчетливо видно, что в ре-

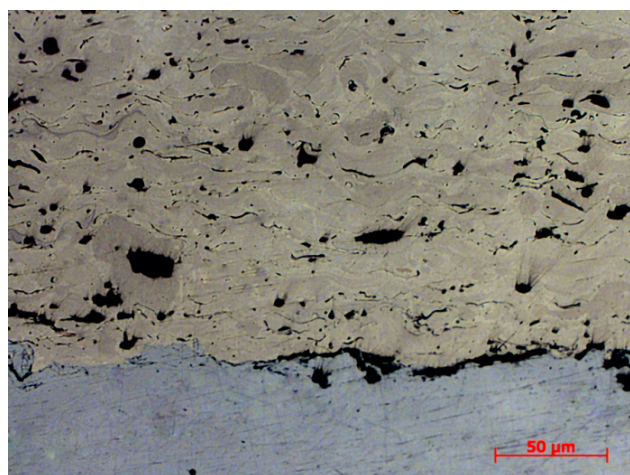


Рис. 3. Микроструктура никелевого плазменного покрытия ПГ-12Н-01 без дополнительной обработки

Fig. 3. Microstructure of the as-sprayed nickel plasma coating PG-12N-01 Microstructure of nickel plasma coating PG-12N-01 without additional treatment

зультате применения оптимизированных режимов напыления получена равномерная слоистая структура с низкой пористостью и минимальным количеством нерасплавленных и недеформированных частиц. Уровень износостойкости определяется не только твердостью порошкового материала, но и прочностью когезионных связей между деформированными частицами. Характер переходной границы «покрытие – основа» свидетельствует о минимальном количестве участков с несплошностями, что гарантирует высокую прочность адгезионного сцепления. Аналогичная равномерная структура прослеживается у покрытий из материалов марок ПГ-С27 и ПГН-В3К.

На рис. 4 представлена микроструктура оплавленного никелевого покрытия ПГ-12Н-01 после ВЭН ТВЧ. На микрофотографии отчетливо видно, что после индукционного оплавления пористость практически полностью ликвидирована и сформирована литая сплошная структура. Отсутствие межчастичных границ и пор обеспечивает повышенную когезионную прочность, что объясняет зафиксированный рост износостойкости.

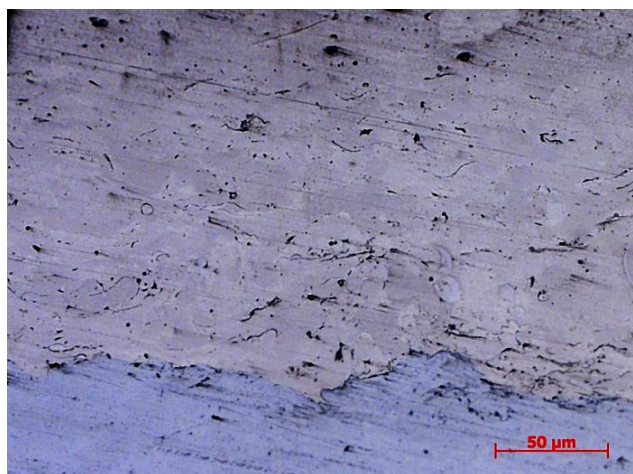


Рис. 4. Микроструктура никелевого покрытия ПГ-12Н-01 после оплавления ВЭН ТВЧ: равномерно проплавленная литая структура

Fig. 4. Microstructure of the remelted nickel coating PG-12N-01 after HEH HFC remelting: uniformly fused cast structure

стойкости на 35 %. Следует, однако, отметить, что при оплавлении покрытий из высокохромистого чугуна ПГ-С27 формировалась крупная дендритная структура с неравномерным распределением карбидной фазы, которая обладает пониженной сопротивляемостью контактному нагружению. Данное обстоятельство объясняет отрицательный эффект оплавления чугуновых покрытий и свидетельствует об ограниченности метода ВЭН ТВЧ в части обеспечения универсального повышения износостойкости.

На рис. 5 представлена микрофотография структуры покрытия из никелево-керамической смеси ПГ-12Н-01 (20 %) + 15А (80 %). Полученная композиция включает мелкодисперсные частицы оксидной керамики Al_2O_3 , равномерно распределенные в структуре никелевого покрытия. Аналогичная структура формируется при напылении кобальто-керамической смеси ПГН-ВЗК (20 %) + 15А (80 %). Несмотря на то что в напыленном слое присутствуют остаточные поры и встречаются частично оплавленные частицы, композиционные покрытия демонстрируют наилучшие трибологические характеристики среди всех исследованных вариантов. Ведущую роль в обеспечении высокой износостойкости играет значительная твердость частиц оксида алюминия ($HV \approx 2000...2300$), которая в совокупности с прочностью и пластичностью металлической связки обеспечи-

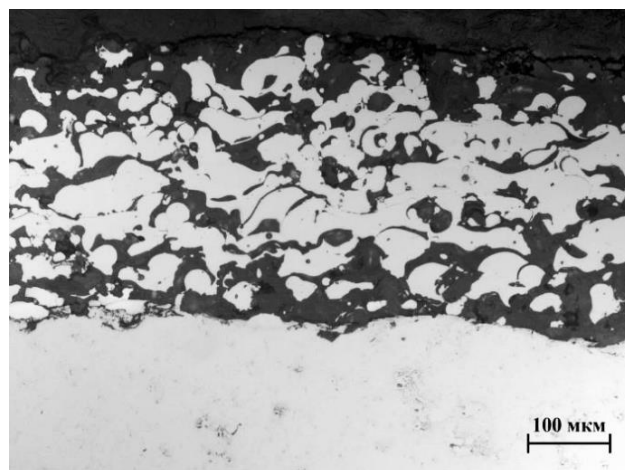


Рис. 5. Микроструктура покрытия из никелево-керамической смеси ПГ-12Н-01 (20 %) + 15А (80 %): равномерное распределение частиц оксидной керамики в металлической матрице

Fig. 5. Microstructure of the nickel-ceramic coating from the mixture PG-12N-01 (20 %) + 15A (80 %): uniform distribution of oxide ceramic particles in the metal matrix

вает сопротивляемость композиции контактно-му нагружению.

Механизм повышения износостойкости металлокерамических покрытий может быть объяснен следующим образом. Высокотвердые частицы керамики, будучи равномерно распределены в пластичной металлической матрице, воспринимают основную часть контактной нагрузки, препятствуя микрорезанию и пластической деформации поверхностного слоя. Металлическая связка, обволакивающая керамические частицы, обеспечивает их удержание в структуре покрытия и предотвращает хрупкое разрушение. Данная модель поведения согласуется с известными представлениями о работе композиционных материалов типа «керамика – металлическая связка», изложенными в работах [41, 48, 49].

Обсуждение результатов в контексте проектирования гибридного оборудования. Полученные экспериментальные результаты имеют непосредственное прикладное значение для разработки теоретических основ и концептуальных подходов к проектированию гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции. Выявленные закономерности позволяют сформулировать ряд научно обоснованных рекомендаций.

Во-первых, неоднозначность результатов высокоэнергетического индукционного оплавления (положительный эффект для никелевых покрытий и отрицательный – для покрытий из высокохромистого чугуна) указывает на необходимость включения в состав гибридного оборудования интеллектуальной системы управления параметрами поверхностно-термического воздействия, адаптирующейся к свойствам обрабатываемого материала. Это требование полностью согласуется с концепцией Индустрии 4.0, предусматривающей применение сенсорных систем мониторинга и адаптивных алгоритмов управления [5, 6, 51, 52].

Во-вторых, превосходство металлокерамических покрытий над всеми другими исследованными вариантами свидетельствует о целесообразности интеграции модуля плазменного напыления композиционных смесей в гибридную станочную систему. Возможность формирования покрытий с рациональным соотношением твердости и пластичности делает данную технологию особенно перспективной для упрочнения деталей, работающих в условиях сложного нагружения (сочетание трения скольжения и ударных динамических нагрузок) [42, 43].

В-третьих, результаты металлографического анализа подтверждают критическую роль оптимизации режимов обработки, что определяет повышенные требования к системам управления гибридным оборудованием в части обеспечения точного и воспроизводимого дозирования энергетических параметров как плазменного напыления, так и дополнительного термического воздействия.

Следует отметить, что показательным примером деталей, для которых разрабатываемая технология имеет прямое практическое значение, являются элементы технологического оборудования для производства подкладок стрелочных переводов, работающие в условиях сухого трения скольжения металла по металлу при высоких контактных нагрузках [48].

Закключение

По результатам систематических сравнительных испытаний плазменных покрытий, сформированных при различных условиях комбинированной технологии, в условиях сухого трения скольжения установлено следующее.

Высокоэнергетическое индукционное оплавление методом ВЭН ТВЧ обеспечивает существенное повышение износостойкости никелевых покрытий марки ПГ-12Н-01 (на 35 %) за счет формирования сплошной беспористой литой структуры, однако для покрытий из высокохромистого чугуна ПГ-С27 данная обработка приводит к снижению износостойкости на 20 % вследствие формирования неблагоприятной дендритной структуры.

Покрытия из металлокерамических механических смесей демонстрируют наилучшие трибологические характеристики среди всех исследованных вариантов: никелево-керамическая смесь превосходит базовое никелевое покрытие на 44 %, а кобальто-керамическая смесь обеспечивает увеличение износостойкости кобальтового покрытия на 30 % при практически полном прекращении износа после периода приработки.

Структурный анализ подтвердил, что высокая износостойкость металлокерамических покрытий обусловлена равномерным распределением мелкодисперсных частиц оксида алюминия высокой твердости в пластичной металлической матрице, обеспечивающим эффективное сопротивление контактному нагружению.

Результаты исследований формируют экспериментальную базу для проектирования гибридного станочного оборудования нового поколения, интегрирующего механические и поверхностно-термические операции. Неоднозначность эффектов индукционного оплавления указывает на необходимость разработки адаптивных систем управления параметрами поверхностно-термического модуля, а превосходство металлокерамических покрытий обосновывает целесообразность включения модуля плазменного напыления композиционных смесей в состав перспективных гибридных систем.

Практически неограниченные возможности варьирования состава металлокерамических смесей создают предпосылки для формирования покрытий с оптимальным соотношением твердости и пластичности, обеспечивающих ресурс деталей в условиях как сухого трения скольжения, так и динамических ударных нагрузок.

Список литературы

1. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer,



D. McIntosh // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

2. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives / Z. Zhu, V.G. Dhokia, A. Nassehi, S.T. Newman // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2013. – Vol. 26 (7). – P. 596–615. – DOI: 10.1080/0951192X.2012.749530.

3. Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception / X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, L. Wang // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 61. – P. 530–535. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.

4. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review / R.Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, S.T. Newman // Engineering. – 2017. – Vol. 3 (5). – P. 616–630. – DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.

5. Bulk forming of sheet metal / M. Merklein, J.M. Allwood, B.-A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A.E. Tekkaya, A. Weckenmann // CIRP Annals. – 2012. – Vol. 61 (2). – P. 725–745. – DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.007.

6. Mourtzis D., Vlachou E., Milas N. Industrial Big Data as a result of IoT adoption in manufacturing // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 55. – P. 290–295. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.038.

7. Design and technological aspects of integrating multi-blade machining and surface hardening on a single machine base / V. Skeebe, V. Ivancivsky, A. Chernikov, N. Martyushev, N. Vakhrushev, K. Titova // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2024. – Vol. 8 (5). – P. 200. – DOI: 10.3390/jmmp8050200. – EDN AYYIFW.

8. Advanced metallic materials and processes / A.I. Rudskoy, G.E. Kodzhasspirov, J. Kliber, Ch. Apostolopoulos // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Vol. 25 (1). – P. 1–8. – EDN VZLMOB.

9. Precision and efficiency of metal-cutting machines / V.V. Bushuev, A.P. Kuznetsov, F.S. Sabirov, V.S. Khomyakov, V.V. Molodtsov // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – P. 762–773. – DOI: 10.3103/S1068798X16090070.

10. Скиба В.Ю. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83. – EDN ZEASGN.

11. Virtual machine tool / Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, S. Witt // CIRP Annals. – 2005. – Vol. 54 (2). – P. 115–138. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.

12. Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance / Z. Liao, J.M. Schoop, J. Saelzer, B. Bergmann, P.C. Priarone, A. Splettstößer, V.M. Bedekar,

F. Zanger, Y. Kaynak // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2024. – Vol. 50. – P. 151–184. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.02.008.

13. Comprehensive review of advanced methods for improving the parameters of machining steels / A.R. Machado, L.R.R. da Silva, D.Yu. Pimenov, F.C.R. de Souza, M. Kuntoğlu, R.L. de Paiva // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 125. – P. 111–142. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.07.044.

14. Integrated metrology for advanced manufacturing / A. Archenti, W. Gao, A. Donmez, E. Savio, N. Irino // CIRP Annals. – 2024. – Vol. 73 (2). – P. 639–665. – DOI: 10.1016/j.cirp.2024.05.003.

15. Multi-objective optimization of machining parameters based on an improved Hopfield neural network for STEP-NC manufacturing / Y. Zhang, G. Du, H. Li, Y. Yang, H. Zhang, X. Xu, Y. Gong // Journal of Manufacturing Systems. – 2024. – Vol. 74. – P. 222–232. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.03.006.

16. Nguyen T.-N.-H., Le D.-B., Nguyen D.-T. Automation for feed motion of flat grinding machine improve accuracy and productivity machine // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Vol. 81 (2). – P. 427–433. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.433.

17. Environmental, technological and economical aspects of cryogenic assisted hard machining operation of Inconel 718: A step towards green manufacturing / M. Danish, M.K. Gupta, S. Rubaiee, A. Ahmed, M. Sarıkaya, G.M. Krolczyk // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 337. – P. 130483. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130483.

18. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools / J. Lv, R. Tang, S. Jia, Y. Liu // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112 (5). – P. 3864–3874. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040.

19. Макаров В.М. Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.

20. Макаров В.М., Лукина С.В. Уникальная синергия гибридных станков // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2016. – № 8. – С. 18–25.

21. Рыжикова Т.Н., Боровский В.Г. Исследование стратегических перспектив модернизации станкостроения // Экономический анализ: теория и практика. – 2017. – Т. 16, № 5 (464). – С. 835–850. – DOI: 10.24891/ea.16.5.835.

22. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. Thermal spray fundamentals. – New York: Springer, 2014. – 1566 p. – DOI: 10.1007/978-0-387-68991-3.

23. Pawlowski L. The science and engineering of thermal spray coatings. – 2nd ed. – Chichester: John

Wiley & Sons, 2008. – 626 p. – ISBN 978-0-471-49049-4. – DOI: 10.1002/9780470754085.

24. *Davis J.R.* Handbook of thermal spray technology. – Materials Park, OH: ASM International, 2004. – 338 p. – ISBN 0871707950.

25. *Пузряков А.Ф.* Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 357 с. – ISBN 978-5-7038-3045-1.

26. Porosity and its significance in plasma-sprayed coatings / J.G. Odhiambo, W. Li, Y. Zhao, C. Li // *Coatings*. – 2019. – Vol. 9 (7). – P. 460. – DOI: 10.3390/coatings9070460.

27. A perspective on plasma spray technology / A. Vardelle, C. Moreau, N.J. Themelis, C. Chazelas // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 2015. – Vol. 35 (3). – P. 491–509. – DOI: 10.1007/s11090-014-9600-y.

28. Development of process maps for plasma spray: case study for molybdenum / S. Sampath, X. Jiang, A. Kulkarni, J. Matejcek, D.L. Gilmore, R.A. Neiser // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Vol. 348 (1–2). – P. 54–66. – DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00642-1.

29. *Pfender E.* Thermal plasma technology: Where do we stand and where are we going? // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 1999. – Vol. 19 (1). – P. 1–31. – DOI: 10.1023/A:1021899731587.

30. A numerical study of high-velocity oxygen fuel thermal spraying process. Part I: Gas phase dynamics / D. Cheng, Q. Xu, G. Trapaga, E.J. Lavernia // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2001. – Vol. 32. – P. 1609–1620. – DOI: 10.1007/s11661-001-0139-1.

31. *Li C.-J., Li W.-Y.* Effect of sprayed powder particle size on the oxidation behavior of MCrAlY materials during high velocity oxygen-fuel deposition // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 162 (1). – P. 31–41. – DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00573-X.

32. *Bisson J.-F., Gauthier B., Moreau C.* Effect of plasma fluctuations on in-flight particle parameters // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2003. – Vol. 12. – P. 38–43. – DOI: 10.1361/105996303770348483.

33. On the reproducibility of air plasma spray process and control of particle state / V. Srinivasan, A. Vaidya, T. Streibl, M. Friis, S. Sampath // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2006. – Vol. 15. – P. 739–743. – DOI: 10.1361/105996306X147199.

34. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeebe, P.Yu. Skeebe, I.V. Khlebova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 87 (8). – P. 082061. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061. – EDN ZRVPKV.

35. *Skeebe V.Yu., Pushnin V., Kornev D.* Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying

integrated with high-energy heating by high frequency currents // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 88–94. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88.

36. *Bejar M.A., Henriquez R.* Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing // *Materials and Design*. – 2009. – Vol. 30 (5). – P. 1726–1728. – DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.006.

37. Comparison of O₂ plasma treatment on porous low dielectric constant material at sidewall and bottom of trench structure / Y.-L. Cheng, B.-H. Lin, C.-Y. Lee, G.-S. Chen, J.-S. Fang // *Thin Solid Films*. – 2018. – Vol. 660. – P. 808–813. – DOI: 10.1016/j.tsf.2018.03.049.

38. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N. Plotnikova, A. Losinskaya, V. Skeebe, E. Nikitenko // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 351–354. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351.

39. *Skeebe V.Y., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V.* Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions // *Metals*. – 2021. – Vol. 11 (9). – DOI: 10.3390/met11091354. – EDN EFGQUN.

40. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ / Ю.С. Чесов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 4 (65). – С. 11–18. – EDN SZRFDV.

41. HVOF-sprayed surface coating with various compositions of Co-NiCrAlY-Al₂O₃ to minimize sediment erosion in hydraulic turbines / A. Pandey, A. Gupta, D. Kumar, R. Goyal // *Surface and Coatings Technology*. – 2024. – Vol. 481. – P. 130644. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.130644.

42. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики / В.А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, Т.Л. Талако, А.Ф. Пантелеенко // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 2 (67). – С. 39–45. – DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-39-45. – EDN TXTJQX.

43. Preparation of metal-ceramic composites by sonochemical synthesis of metallic nano-particles and in-situ decoration on ceramic powders / A. Pouliat, P.M. Sakkas, D.G. Kanellopoulou, G. Sourkouni, C. Legros, Chr. Argiris // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2016. – Vol. 31. – P. 417–422. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.031.

44. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, N.V. Martyushev, D.V. Lobanov, N.V. Vakhrushev, A.K. Zhigulev // *Key*



Engineering Materials. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

45. Kozochkin M.P., Porvatov A.N. Estimation of uncertainty in solving multiparameter diagnostic problems // Measurement Techniques. – 2015. – Vol. 58. – P. 173–178. – DOI: 10.1007/s11018-015-0681-7.

46. Manufacturing at double the speed / J.M. Allwood, T.H.C. Childs, A.T. Clare, A.K.M. De Silva, V. Dhokia, I.M. Hutchings, R.K. Leach, D.R. Leal-Ayala, S. Lowth, C.E. Majewski, A. Marzano, J. Mehnert, A. Nassehi, E. Ozturk, M.H. Raffles, R. Roy, I. Shyha, S. Turner // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 229. – P. 729–757. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.028.

47. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies / S.T. Newman, Z. Zhu, V. Dhokia, A. Shokrani // CIRP Annals. – 2015. – Vol. 64 (1). – P. 467–470. – DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.109.

48. Чесов Ю.С., Зверев Е.А. Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // Научный вестник Новосибирского государственного технического

университета. – 2008. – № 3 (32). – С. 175–183. – EDN JUSNFT.

49. Структурные особенности износостойких плазменных покрытий после воздействия токами высокой частоты / Е.А. Зверев, Ю.С. Чесов, Н.В. Вахрушев, П.В. Трегубчак, Д.Ю. Зарубин // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 347–353. – EDN TZDZCF.

50. Dolata A.J. Fabrication and structure characterization of alumina-aluminum interpenetrating phase composites // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 25. – P. 3098–3106. – DOI: 10.1007/s11665-016-1901-2.

51. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions / H.S. Kang, J.Y. Lee, S. Choi, H. Kim, J.H. Park, J.Y. Son, B.H. Kim, S.D. Noh // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2016. – Vol. 3. – P. 111–128. – DOI: 10.1007/s40684-016-0015-5.

52. Rakic S., Marjanovic U., Medic N. Advancements in smart manufacturing and Industry 4.0. // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15 (22). – P. 11903. – DOI: 10.3390/app152211903.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Wear resistance of plasma coatings formed by combined surface-thermal treatment methods: toward the design of hybrid machine-tool equipment

Egor Zverev^{1, a}, Vadim Skeebe^{1, b, *}, Ayagma Zhargalova^{2, c}, Nikita Vakhrushev^{1, d}, Andrey Popkov^{1, e}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, 5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-4405-6623>, zverev@corp.nstu.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebe_vadim@mail.ru;

^d <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, azhargalova@bmstu.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>, vah_nikit@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0006-5587-9990>, andrey.popkov.2013@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 January 2026

Revised: 08 February 2026

Accepted: 14 February 2026

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Plasma spraying

Combined treatment

High-energy heating by high-frequency currents

Ceramic-metal coatings

Mechanical mixtures

Wear resistance

Hybrid machine-tool equipment

Integration of surface-thermal operations

Funding

The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSUN-2026-0005).

Acknowledgements

The research was carried out using the equipment of the Engineering Center "Design and Production of High-Tech Equipment".

ABSTRACT

Introduction. In the context of the increasing demand in the modern machine-tool industry for the development of hybrid machine-tool equipment integrating mechanical and surface-thermal operations, the study of combined technologies for the formation of wear-resistant coatings becomes highly relevant. The integration of fundamentally different processing methods – mechanical shaping and high-energy surface-thermal modification – on a single machine platform represents a promising direction for improving the efficiency and quality of manufacturing processes. Plasma spraying supplemented by high-energy heating with high-frequency currents (HFC) or the formation of composite ceramic–metal coatings from mechanical mixtures creates the prerequisites for designing multifunctional hybrid systems that meet the requirements of *Industry 4.0*. However, the comparative effectiveness of various combined coating treatment options under tribological loading has not been sufficiently studied to date. **The purpose of the present work** is to conduct a systematic comparative study of the wear resistance of plasma coatings formed under different conditions of combined spraying technology under dry sliding friction, and to formulate recommendations for the design of advanced hybrid machine-tool equipment. **Methods.** Plasma coatings sprayed from *PG-12N-01*, *PG-S27*, and *PGN-V3K* powders were investigated, as well as coatings subjected to additional high-energy induction remelting and coatings from mechanical mixtures of metal powder and aluminum oxide (Al_2O_3). Spraying was performed with a *PUN-3* plasma torch at optimized conditions. High-energy heating was carried out using a *VChG 6-60/0.44* generator at a frequency of 440 kHz. Wear resistance tests were conducted under continuous dry sliding friction against a *VK8* cemented carbide indenter at a load of 20 N. The wear criterion was the volume loss of the coating material, determined by measuring the wear scar width with a *UIM-21* toolmaker's microscope. The coating microstructure was studied by optical metallography. **Results and discussion.** It was established that remelted nickel coatings of the *PG-12N-01* grade exhibit wear resistance exceeding that of the initial non-remelted coating by 35%. At the same time, remelting of *PG-S27* high-chromium cast iron coatings led to a 20 % decrease in wear resistance due to the formation of an unfavorable dendritic structure. Coatings based on ceramic–metal mechanical mixtures showed the best results: the nickel–ceramic mixture *PG-12N-01* (20 %) + *15A* (80 %) exceeded the baseline value by 44 %, while the cobalt–ceramic mixture *PGN-V3K* (20 %) + *15A* (80 %) provided a 30 % increase in wear resistance compared to the initial cobalt alloy coating, with wear practically ceasing after the run-in period. The structure of ceramic–metal coatings is characterized by a uniform distribution of fine oxide ceramic particles in a metallic matrix, which ensures high tribological performance of the composite. The research results form an experimental basis for the design of next-generation hybrid machine-tool equipment integrating mechanical processing and surface-thermal technological operations.

For citation: Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Zhargalova A.D., Vakhrushev N.V., Popkov A.S. Wear resistance of plasma coatings formed by combined surface-thermal treatment methods: toward the design of hybrid machine-tool equipment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 114–129. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-114-129. (In Russian).

* Corresponding author

Skeebe Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 Novosibirsk, 630073, Russian Federation
 Tel: +7 383 346-17-79, e-mail: skeebe_vadim@mail.ru

References

1. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
2. Zhu Z., Dhokia V.G., Nassehi A., Newman S.T. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2013, vol. 26 (7), pp. 596–615. DOI: 10.1080/0951192X.2012.749530.
3. Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L. Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 61, pp. 530–535. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
4. Zhong R.Y., Xu X., Klotz E., Newman S.T. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review. *Engineering*, 2017, vol. 3 (5), pp. 616–630. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.
5. Merklein M., Allwood J.M., Behrens B.-A., Brosius A., Hagenah H., Kuzman K., Mori K., Tekkaya A.E., Weckenmann A. Bulk forming of sheet metal. *CIRP Annals*, 2012, vol. 61 (2), pp. 725–745. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.007.
6. Mourtzis D., Vlachou E., Milas N. Industrial Big Data as a result of IoT adoption in manufacturing. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 55, pp. 290–295. DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.038.
7. Skeebe V., Ivancivsky V., Chernikov A., Martyushev N., Vakhrushev N., Titova K. Design and technological aspects of integrating multi-blade machining and surface hardening on a single machine base. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (5), p. 200. DOI: 10.3390/jmmp8050200.
8. Rudskoy A.I., Kodzhaspirov G.E., Kliber J., Apostolopoulos Ch. Advanced metallic materials and processes. *Materials Physics and Mechanics*, 2016, vol. 25 (1), pp. 1–8.
9. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Precision and efficiency of metal-cutting machines. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, pp. 762–773. DOI: 10.3103/S1068798X16090070.
10. Skeebe V.Yu. Gibrinnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metalloobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83. (In Russian).
11. Altintas Y., Brecher C., Weck M., Witt S. Virtual machine tool. *CIRP Annals*, 2005, vol. 54 (2), pp. 115–138. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.
12. Liao Z., Schoop J.M., Saelzer J., Bergmann B., Priarone P.C., Splettstößer A., Bedekar V.M., Zange F., Kaynak Y. Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2024, vol. 50, pp. 151–184. DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.02.008.
13. Machado A.R., da Silva L.R.R., Pimenov D.Yu., de Souza F.C.R., Kuntoğlu M., de Paiva R.L. Comprehensive review of advanced methods for improving the parameters of machining steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 125, pp. 111–142. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.07.044.
14. Archenti A., Gao W., Donmez A., Savio E., Irino N. Integrated metrology for advanced manufacturing. *CIRP Annals*, 2024, vol. 73 (2), pp. 639–665. DOI: 10.1016/j.cirp.2024.05.003.
15. Zhang Y., Du G., Li H., Yang Y., Zhang H., Xu X., Gong Y. Multi-objective optimization of machining parameters based on an improved Hopfield neural network for STEP-NC manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, vol. 74, pp. 222–232. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.03.006.
16. Nguyen T.-N.-H., Le D.-B., Nguyen D.-T. Automation for feed motion of flat grinding machine improve accuracy and productivity machine. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 81 (2), pp. 427–433. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.433.
17. Danish M., Gupta M.K., Rubaiee S., Ahmed A., Sarikaya M., Krolczyk G.M. Environmental, technological and economical aspects of cryogenic assisted hard machining operation of Inconel 718: A step towards green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 337, p. 130483. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130483.
18. Lv J., Tang R., Jia S., Liu Y. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112 (5), pp. 3864–3874. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040.
19. Makarov V.M. Kompleksirovannye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.
20. Makarov V.M., Lukina S.V. Unikal'naya sinergiya gibridnykh stankov [Unique synergy of hybrid machines]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2016, no. 8, pp. 18–25.

21. Ryzhikova T.N., Borovskii V.G. Issledovanie strategicheskikh perspektiv modernizatsii stankostroeniya [Exploring the strategic perspectives for machine tool industry modernization]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16, no. 5, pp. 835–850. DOI: 10.24891/ea.16.5.835.
22. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. *Thermal spray fundamentals*. New York, Springer, 2014. 1566 p. DOI: 10.1007/978-0-387-68991-3.
23. Pawlowski L. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, 2008. 626 p. ISBN 978-0-471-49049-4. DOI: 10.1002/9780470754085.
24. Davis J.R. *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, OH, ASM International, 2004. 338 p. ISBN 0871707950.
25. Puzryakov A.F. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya* [Theoretical foundations of plasma spraying technology]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 357 p. ISBN 978-5-7038-3045-1.
26. Odhiambo J.G., Li W., Zhao Y., Li C. Porosity and its significance in plasma-sprayed coatings. *Coatings*, 2019, vol. 9 (7), p. 460. DOI: 10.3390/coatings9070460.
27. Vardelle A., Moreau C., Themelis N.J., Chazelas C. A perspective on plasma spray technology. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2015, vol. 35 (3), pp. 491–509. DOI: 10.1007/s11090-014-9600-y.
28. Sampath S., Jiang X.Y., Kulkarni A., Matejcek J., Gilmore D.L., Neiser R.A. Development of process maps for plasma spray: case study for molybdenum. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 348 (1–2), pp. 54–66. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00642-1.
29. Pfender E. Thermal plasma technology: Where do we stand and where are we going? *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1999, vol. 19 (1), pp. 1–31. DOI: 10.1023/A:1021899731587.
30. Cheng D., Xu Q., Trapaga G., Lavernia E.J. A numerical study of high-velocity oxygen fuel thermal spraying process. Part I: Gas phase dynamics. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, vol. 32, pp. 1609–1620. DOI: 10.1007/s11661-001-0139-1.
31. Li C.-J., Li W.-Y. Effect of sprayed powder particle size on the oxidation behavior of MCrAlY materials during high velocity oxygen-fuel deposition. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 162 (1), pp. 31–41. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00573-X.
32. Bisson J.-F., Gauthier B., Moreau C. Effect of plasma fluctuations on in-flight particle parameters. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2003, vol. 12, pp. 38–43. DOI: 10.1361/105996303770348483.
33. Srinivasan V., Vaidya A., Streibl T., Friis M., Sampath S. On the reproducibility of air plasma spray process and control of particle state. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, vol. 15, pp. 739–743. DOI: 10.1361/105996306X147199.
34. Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Skeebe P.Yu., Khlebova I.V. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87 (8), p. 082061. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.
35. Skeebe V.Yu., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 88–94. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88.
36. Bejar M.A., Henriquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing. *Materials and Design*, 2009, vol. 30 (5), pp. 1726–1728. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.006.
37. Cheng Y.-L., Lin B.-H., Lee C.-Y., Chen G.-S., Fang J.-S. Comparison of O₂ plasma treatment on porous low dielectric constant material at sidewall and bottom of trench structure. *Thin Solid Films*, 2018, vol. 660, pp. 808–813. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.03.049.
38. Plotnikova N., Losinskaya A., Skeebe V., Nikitenko E. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351.
39. Skeebe V.Y., Ivancivsky V.V., Martyushev N. V. Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions. *Metals*, 2021, vol. 11 (9), p. 1354. DOI: 10.3390/met11091354.
40. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Plotnikova N.V., Lobanov D.V. Struktura iznosostoikikh plazmennyykh pokrytii posle vysokoenergeticheskogo vozdeistviya TVCh [Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4, pp. 11–18. (In Russian).
41. Pandey A., Gupta A., Kumar D., Goyal R. HVOF-sprayed surface coating with various compositions of Co-NiCrAlY-Al₂O₃ to minimize sediment erosion in hydraulic turbines. *Surface and Coatings Technology*, 2024, vol. 481, p. 130644. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.130644.

42. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Talako T.L., Panteleenko A.F. Tekhnologiya polucheniya kompozitsionnogo materiala na osnove mnogofunktsional'noi oksidnoi keramiki [The technology of producing a composite material based on a multifunctional oxide ceramics]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 2 (67), pp. 39–45. DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-39-45. (In Russian).

43. Poulia A., Sakkas P.M., Kanellopoulou D.G., Sourkouni G., Legros C., Argiris Chr. Preparation of metal-ceramic composites by sonochemical synthesis of metallic nano-particles and in-situ decoration on ceramic powders. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 31, pp. 417–422. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.031.

44. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyshev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 105–111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

45. Kozochkin M.P., Porvatov A.N. Estimation of uncertainty in solving multiparameter diagnostic problems. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, pp. 173–178. DOI: 10.1007/s11018-015-0681-7.

46. Allwood J.M., Childs T.H.C., Clare A.T., De Silva A.K.M., Dhokia V., Hutchings I.M., Leach R.K., Leal-Ayala D.R., Lowth S., Majewski C.E., Marzano A., Mehnen J., Nassehi A., Ozturk E., Raffles M.H., Roy R., Shyha I., Turner S. Manufacturing at double the speed. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 229, pp. 729–757. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.028.

47. Newman S.T., Zhu Z., Dhokia V., Shokrani A. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, 2015, vol. 64 (1), pp. 467–470. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.109.

48. Chesov Yu.S., Zverev E.A. Issledovanie iznosostoičnosti pokrytii, nanesennykh metodom plazmennogo napyleniya [Research of wear resistance of the coatings received by the method of plasma spraying]. *Nauchnyi vestnik NGTU = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2008, no. 3, pp. 175–183.

49. Zverev E.A., Chesov Yu.S., Vakhrushev N.V., Tregubchak P.V., Zarubin D.Yu. Strukturnye osobennosti iznosostoičivkh plazmennyykh pokrytii posle vozdeistviya tokami vysokoi chastoty [Structural features of wear-resistant plasma coatings after high frequency current action]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 2015, no. 2, pp. 347–353. (In Russian).

50. Dolata A.J. Fabrication and structure characterization of alumina-aluminum interpenetrating phase composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, pp. 3098–3106. DOI: 10.1007/s11665-016-1901-2.

51. Kang H.S., Lee J.Y., Choi S., Kim H., Park J.H., Son J.Y., Kim B.H., Noh S.D. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2016, vol. 3, pp. 111–128. DOI: 10.1007/s40684-016-0015-5.

52. Rakic S., Marjanovic U., Medic N. Advancements in smart manufacturing and Industry 4.0. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15 (22), p. 11903. DOI: 10.3390/app152211903.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).