



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-114-119>
УДК 621.79

Поступила 17.06.2025
Received 17.06.2025

ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. МАЦИНОВ, В. А. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: kvlad@bntu.by

Срок службы изделий, имеющих наплавленные металлические или керамические покрытия, напрямую зависит от целого ряда их механических и физических свойств. Для деталей, работающих в узлах трения, весьма важным показателем является прочность нанесенных покрытий, которая напрямую связана с их твердостью. В работе проведен анализ изменения твердости покрытий и материала подложки по сечению образцов. Показаны отличия по твердости у образцов, прошедших термическую обработку, и необработанных аналогов. Проведен анализ склонности к разрушению покрытий с низкой и средней энтропией, нанесенных плазменным напылением на чугуны, медные и композиционные сплавы. Показана возможность оптимизации подложки для напыления.

Ключевые слова. Плазменное напыление, композиционные материалы, высокопрочные покрытия, медные сплавы, чугуны, антифрикционные материалы.

Для цитирования. Мацинов, С. А. Возможности улучшения поверхностных свойств литых композиционных материалов / С. А. Мацинов, В. А. Калиниченко // *Литье и металлургия*. 2025. № 3. С. 114–119. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-114-119>.

POTENTIALS FOR IMPROVING THE SURFACE PROPERTIES OF CAST COMPOSITE MATERIALS

S. A. MATSINOV, U. A. KALINICHENKO, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: kvlad@bntu.by

The service life of components with metallic or ceramic overlay coatings directly depends on a number of their mechanical and physical properties. For parts operating in friction assemblies, the strength of the applied coatings – closely linked to their hardness – is of particular importance. This study presents an analysis of hardness variation across the cross-section of the coatings and substrate materials. A comparison is made between heat-treated samples and their untreated counterparts, highlighting notable differences in hardness. The susceptibility to failure of low- and medium-entropy coatings applied via plasma spraying onto cast irons, copper alloys, and composite materials is examined. The work also demonstrates the potential for optimizing the substrate to enhance coating performance.

Keywords. Plasma spraying, composite materials, high-strength coatings, copper alloys, cast irons, antifriction materials.

For citation. Matsinov S. A., Kalinichenko U. A. Potentials for improving the surface properties of cast composite materials. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 3, pp. 114–119. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-114-119>.

При длительной эксплуатации машин изнашивание деталей сопровождается снижением эксплуатационных показателей, что вызывает ухудшение качества изготавливаемых изделий. Изнашивание рабочих поверхностей деталей нередко требует их полной замены. Это повышает себестоимость производства из-за больших амортизационных отчислений [1].

Для повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы деталей машин используют различные способы поверхностного упрочнения. На сегодняшний день существует множество методов нанесения покрытий: термическое напыление, электрохимические, плазменные технологии. Каждый из этих методов обладает уникальными преимуществами, но также сталкивается с рядом технологических ограничений, таких как проблемы адгезии, внутренние напряжения, пористость и неоднородность покрытий.

Одним из решений данных проблем будет правильный выбор подложки. В качестве объекта исследований выбраны образцы на основе черных, цветных и композиционных материалов, полученные с помощью литейной технологии с последующим нанесением покрытий методом плазменного

напыления [2, 3], при котором порошковый наплавочный материал подается в сопло струей транспортирующего газа, нагревается плазмой и с ускорением переносится на поверхность основного материала для образования покрытия [4].

В качестве материалов подложки использовали чугун, безоловянистую бронзу и композиционный материал на основе безоловянистой бронзы, армированной чугунными гранулами. В качестве напыляемых материалов применяли: самофлюсующийся порошок (СР 4) по ГОСТ 21448-75 [3] (основа Ni; С – 0,6–1,0%; Cr – 15–18%; Si – 3,0–4,5%; В – 2,8–3,8%; Fe – <5,0%); самофлюсующийся порошок (СР 4) с добавлением 8% железа; керамику (Al_2O_3). Общий вид нанесенных покрытий отображен на рис. 1.



Рис. 1. Образцы после напыления:
а–в – самофлюсующийся порошок (СР 4) на чугуне, бронзе и композите;
г–е – самофлюсующийся порошок (СР 4) с добавлением 8% железа на чугуне, бронзе и композите;
ж–к – керамика (Al_2O_3) на чугуне, бронзе и композите

В качестве сравнительных характеристик выбраны такие параметры, как твердость и трещиностойкость.

После изготовления шлифов из напыленных образцов по ранее разработанной методике [3] проведена визуальная оценка полученных покрытий. На рис. 2 представлены покрытия с напылением самофлюсующегося порошка СР 4 и оксида алюминия, на рис. 3 – того же порошка с добавлением 8% железа.

Из анализа рис. 2 видно, что наиболее высокая адгезия покрытия наблюдается в случае его нанесения на бронзовую подложку, адгезия при нанесении на чугун минимальна, а композит занимает промежуточное положение. Данный факт может объясняться способностью подложек к термическому расширению, которое максимально у бронзы и минимально у чугуна.

С увеличением энтропии сплава с низкой до средней при добавлении 8% железа картина изменяется (рис. 3). Заметно полное отсутствие покрытия на бронзовом образце, которое откололось после охлаждения в результате сжатия образца.

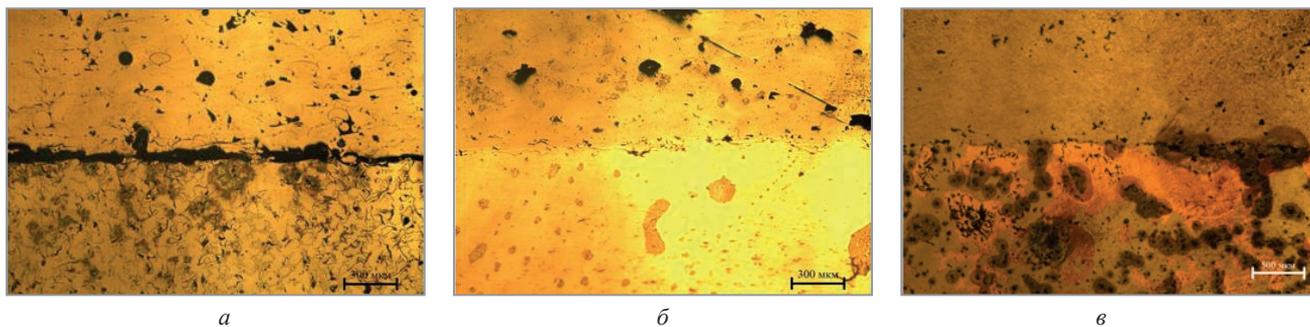


Рис. 2. Покрытия с напылением самофлюсующегося порошка CP 4:
a – серый чугуи; *б* – безоловянистая бронза; *в* – композиционный материал

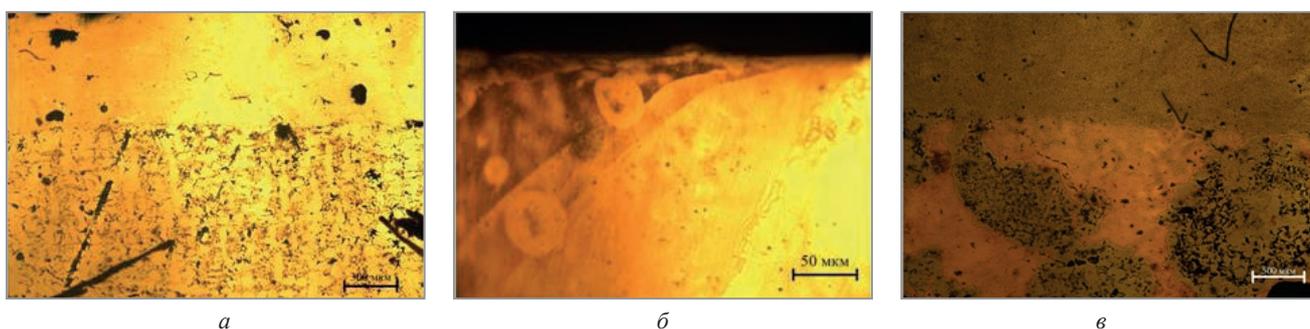


Рис. 3. Покрытия с напылением самофлюсующегося порошка CP 4 с добавлением 8% железа:
a – серый чугуи; *б* – безоловянистая бронза; *в* – композиционный материал

Покрытия с напылением оксида алюминия, представленные на рис. 4, имеют схожую тенденцию с предыдущим случаем, что, возможно, объясняется твердостью керамики как таковой. Однако благодаря технологическим особенностям напыления покрытия отличаются низкой толщиной, что, видимо, не позволило произойти полному отрыву покрытия от медного образца, а процесс ограничился лишь местным отслаиванием.

В качестве прибора для измерения микротвердости использовали микротвердомер MicroVicky VH1010A. Выбраны четыре характерные области для изучения твердости, такие как само покрытие, 1 мм от покрытия, сердцевина образца и его нижняя часть (рис. 5).

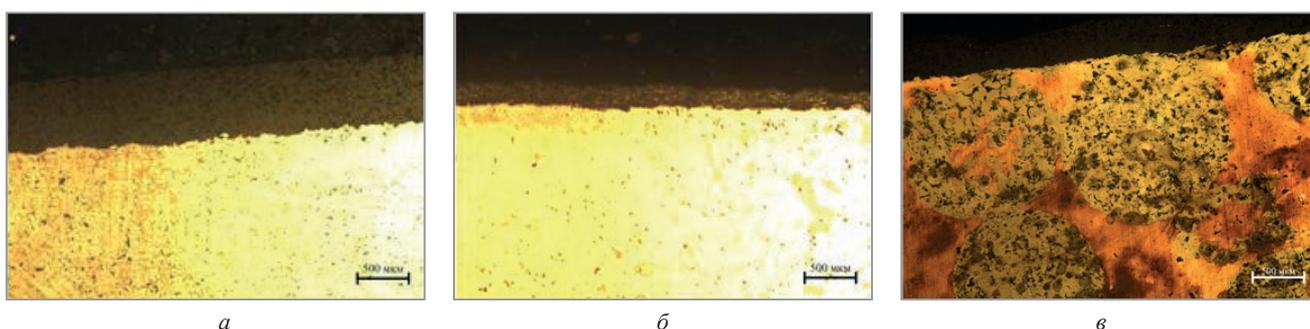


Рис. 4. Покрытия с напылением оксида алюминия: *a* – серый чугуи; *б* – безоловянистая бронза; *в* – композиционный материал

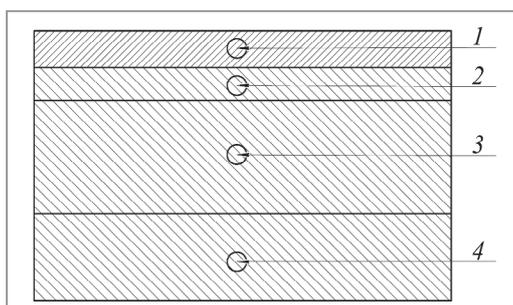


Рис. 5. Зоны замеров твердости: 1 – покрытие; 2 – 1 мм от покрытия; 3 – сердцевина образца; 4 – нижняя часть образца

Показатели твердости образцов представлены на рис. 6–8.

На бронзовых образцах произошло скалывание покрытия $Cr_4 + Fe$ (8%) и Al_2O_3 , поэтому они не представлены на рис. 6. Наиболее твердыми покрытиями отличается среднеэнтропийный сплав на основе Cr_4 с добавками железа, что скорее всего и послужило причиной его отслоения от бронзовых образцов. Причиной отслоения покрытия на основе оксида алюминия, видимо, являлась его исходная хрупкость и невозможность противостоять деформационным нагрузкам.

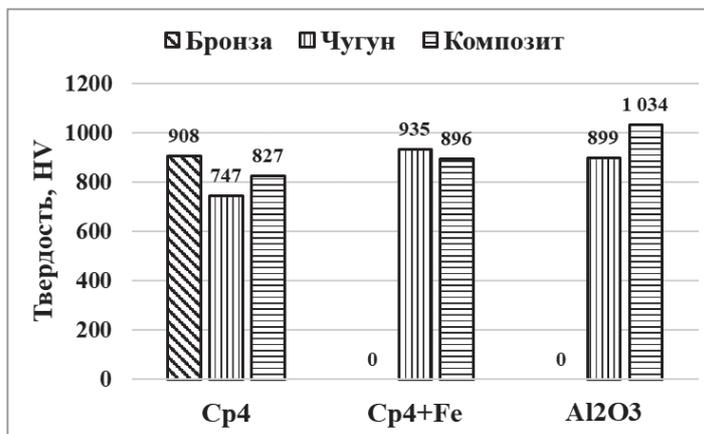


Рис. 6. Показатели твердости покрытий

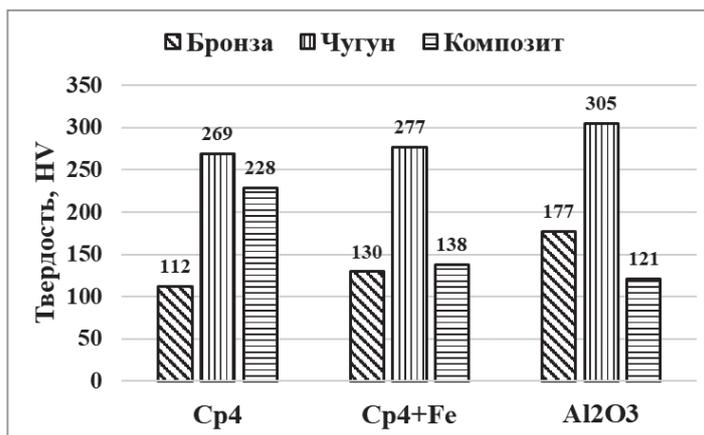


Рис. 7. Показатели твердости на расстоянии 1 мм от покрытия

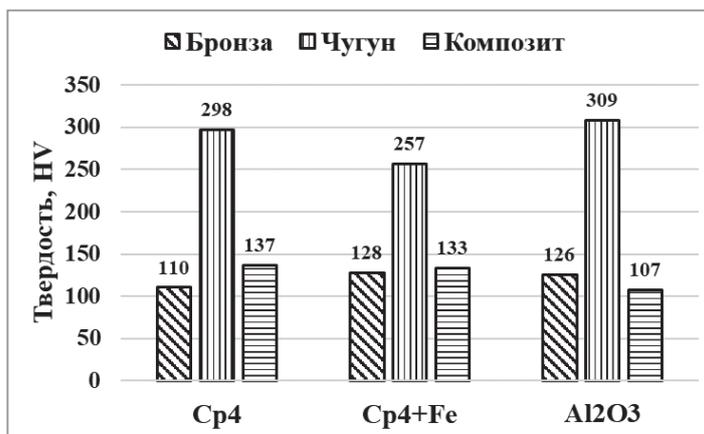


Рис. 8. Показатели твердости в сердцевине образцов

При напылении на композиционный материал отсутствуют отслаивания любых типов покрытий от материала подложки. При этом наблюдается значительный рост твердости, например, при использовании керамического покрытия твердость покрытия превышает 1000 HV против 899 HV у аналогичного покрытия на чугуне.

Однородность покрытий по составу и свойствам, а также качество проведенных экспериментов подтверждаются практически одинаковой длиной диагоналей отпечатков алмазного индентера на покрытии, полученных при измерении микротвердости.

В ходе исследования оценили изменение твердости самого композиционного материала, которое должно было быть вызвано воздействием нагрева при нанесении покрытия струей плазмы. Замеры осуществляли в зонах 2–4 (рис. 5). Видно наличие экстремумов у сплавов с низкой энтропией и керамикой. При приближении сплава к высокой энтропии (случай CP4 + 8% Fe) показатели твердости выравниваются по сечению образца.

Наблюдается наиболее высокая твердость в зоне, прилегающей к покрытию. Данный факт может объясняться высокими скоростями перегрева и охлаждения поверхности, играющими роль поверхностной закалки композиционного материала. Затем следует зона падения твердости, связанная с наименьшими скоростями охлаждения.

Далее после получения показателей твердости покрытий и по всему телу образцов предложено проверить покрытия на стойкость к прилагаемым нагрузкам (растрескиванию). Для проверки покрытий использовали твердомер стационарный по Бринеллю ТШ-2 с приложением нагрузки на шарообразный индентор 3 т.

В случае использования подложек на основе чугуна и бронзы получился результат практически полного разрушения всех типов наносимых покрытий, общий вид которых представлен на рис. 9.

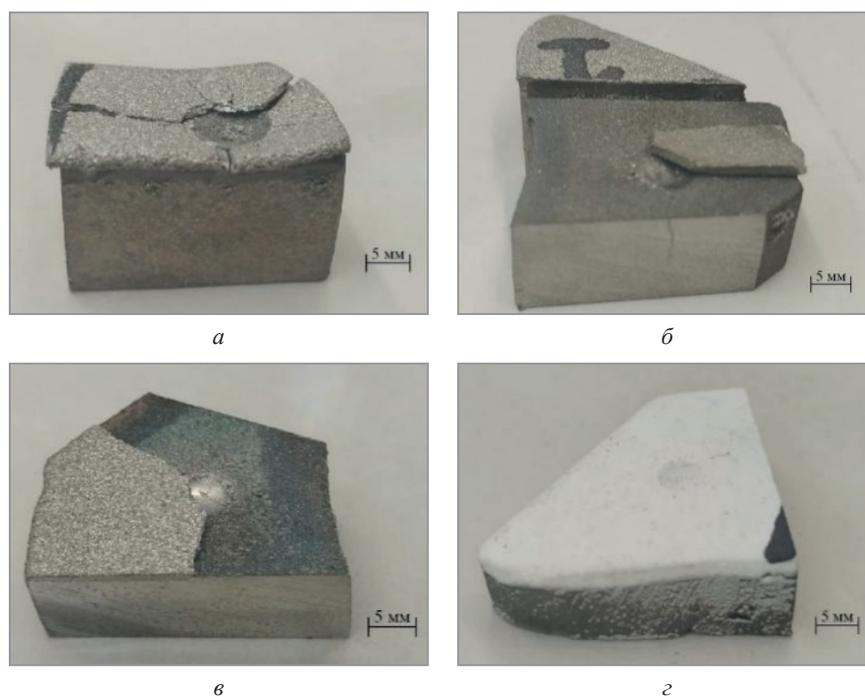


Рис. 9. Образцы после нагружения:

a – самофлюсующийся порошок (CP 4) на бронзе; *б* – самофлюсующийся порошок (CP 4) на чугуне;
в – самофлюсующийся порошок (CP 4) с добавлением 8% железа на чугуне; *г* – керамика (Al_2O_3) на чугуне

Как видно из рис. 9, с покрытиями на основе чугуна и бронзы произошли следующие изменения. Самофлюсующийся порошок (CP 4) на бронзе (рис. 9, *a*) подвергся полному растрескиванию с частичным отслаиванием, что делает покрытие непригодным к дальнейшему использованию. Аналогично непригодным показал себя самофлюсующийся порошок (CP 4) на чугуне, при этом в данном случае покрытие полностью отслоилось от подложки (рис. 9, *б*). Как было указано ранее, остальные типы покрытий отслоились от медных подложек при нормальной температуре и в дальнейшем не рассматривались. При использовании самофлюсующегося порошка (CP 4) с добавлением 8% железа на чугуне (рис. 9, *в*) картина соответствует случаю с CP 4, описанному ранее. У напыленного оксида алюминия (рис. 9, *г*) ввиду его незначительной толщины не наблюдалось сколь значимого растрескивания.

Далее эксперименты продолжены на покрытиях, нанесенных на композиционный материал. Во всех случаях отслаивания покрытий не наблюдалось. Деформация произошла совместно с композиционным материалом подложки, что подтверждают как внешний вид отпечатков (рис. 10, *a–e*), так и исследование микроструктуры (рис. 10, *ж–к*).

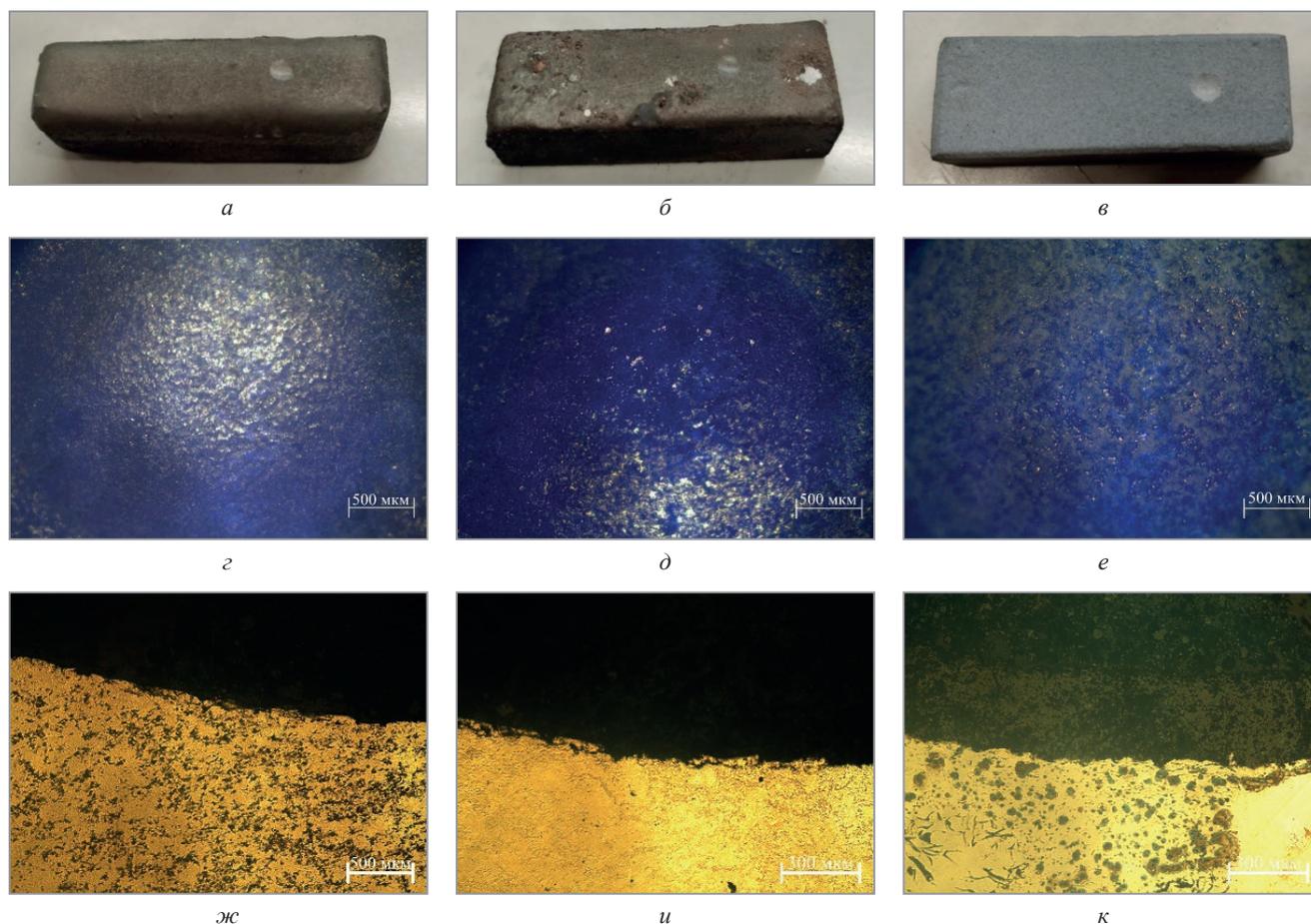


Рис. 10. Образцы напыленного композиционного материала после нагружения: а, г, ж – самофлюсующийся порошок (СР 4); б, д, и – самофлюсующийся порошок (СР 4) с добавлением 8% железа; в, е, к – керамика (Al_2O_3) на чугуне

Выводы

Результаты исследований показали перспективность использования композиционных материалов для плазменного нанесения покрытий. При этом материалы, являющиеся исходными для создания композиции, уступают по адгезии покрытий к поверхности, а в ряде случаев вообще не способны к удержанию нанесенного покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моргаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
2. Мацинов, С. А. Технология подготовки и ремонта изношенных деталей методами плазменного напыления на примере композиционных втулок скольжения / С. А. Мацинов, В. А. Калиниченко // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель, 2024. – С. 80–84.
3. ГОСТ 21448-75. Порошки из сплавов для наплавки. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 15 с.
4. Studfile [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/17015021/page:5/>.

REFERENCES

1. Hasui A., Morgaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 240 p.
2. Macinov S.A., Kalinichenko V.A. *Tehnologija podgotovki i remonta iznoshennyh detalej metodami plazmennogo napylenija na primere kompozicionnyh vtulok skol'zhenija* [Technology of preparation and repair of worn parts by plasma spraying methods using composite sliding bushings as an example.]. *Innovacionnye tehnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnja i zavtra: materialy 8-j Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* = *Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex – Today and Tomorrow: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference*. Gomel, 2024, pp. 80–84.
3. *GOST 21448-75. Poroshki iz splavov dlja naplavki* [State standard & 21448-75. Alloy powders for surfacing]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1977, 15 p.
4. Studfile [Electronic resource]. <https://studfile.net/preview/17015021/page:5/>.