

Научная статья
УДК 621.2.082.18

Сравнение способов нанесения антифрикционных покрытий на детали

Илья Алексеевич Сысоев¹, Алексей Александрович Пегачков²

^{1,2}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹brawlakkum@gmail.com

²pegachkov@yandex.ru

Аннотация. По всему миру интенсивно используются различные машины, работу которых обеспечивает двигатель внутреннего сгорания. Одним из наиболее часто встречающихся видов износа является фрикционный износ. С целью повышения ресурса деталей машин, работающих при постоянных больших нагрузках, на их поверхности наносят защитные антифрикционные покрытия, что уменьшает время простоя техники на время ремонта и ТО. Антифрикционные покрытия могут состоять из различного множества материалов и наносятся на деталь различными способами, вследствие чего появляется необходимость в их сравнении. В данной статье проводится сравнительный анализ способов нанесения защитного антифрикционного слоя на различные детали машин и механизмов. В результате представлены преимущества и недостатки различных видов нанесения защитного покрытия.

Ключевые слова: антифрикционный слой, способы нанесения антифрикционного покрытия, адгезия.

Для цитирования: Сысоев И.А., Пегачков А.А. Сравнение способов нанесения антифрикционного покрытия на детали // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35)

Original article

Comparison of methods for application of anti-friction coating on parts

Ilya A. Sysoev¹, Aleksey A. Pegachkov²

^{1,2}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹brawlakkum@gmail.com

²pegachkov@yandex.r

Abstract. Around the world, various machines are intensively used, the operation of which is provided by the internal combustion engine. One of the most common types of wear is frictional wear. In order to increase the resource of machine parts operating under constant heavy loads, protective anti-friction coatings are applied to their surfaces, which reduces the downtime of equipment during repairs and maintenance. Anti-friction coatings can consist of a variety of materials and are applied to the part in various ways, as a result of which it becomes necessary to compare them. This article provides a comparative analysis of methods for applying a protective anti-friction layer on various parts of machines and mechanisms. As a result, the advantages and disadvantages of various types of protective coating application are presented.

Keywords: antifriction layer, antifriction coating methods, adhesive.

For citation: Sysoev I.A., Pegachkov A.A. Comparison of methods for application of anti-friction coating on parts. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35)

Актуальность темы. В данной статье рассмотрены основные методики и приведена классификация основных способов создания антифрикционных покрытий с различными свойствами при их нанесении на металлическую подложку. При этом, при классификации особое внимание уделено поверхностям, работающим в условиях трения.

Дополнительно проведем сравнение этих методов, с целью нахождения наиболее технологичного и экономически целесообразного способа с целью подбора наиболее технологичного метода нанесения антифрикционного слоя на вкладыши двигателей дорожно-строительных машин.

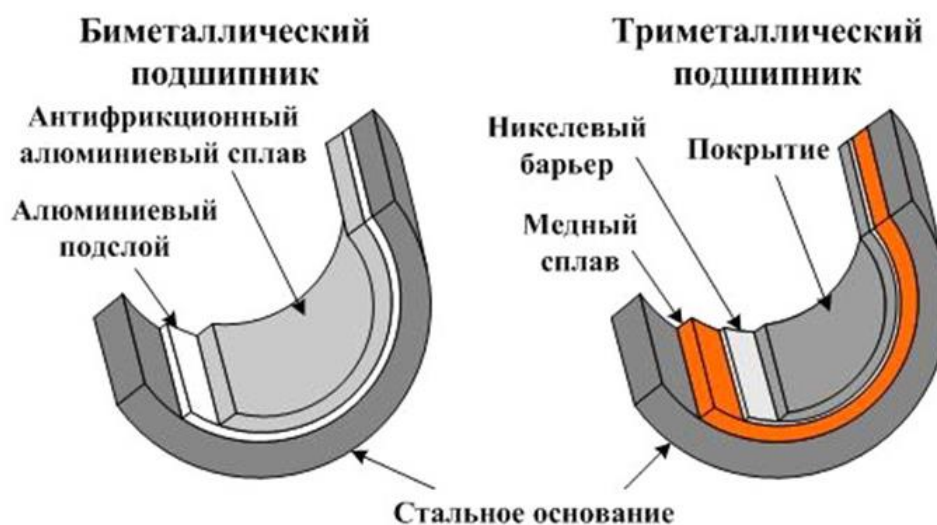


Рис. 1. Антифрикционные покрытия вкладышей

Основными причинами выхода из строя деталей машин являются износ и коррозия. Так, по данным ряда исследователей, примерно 70% деталей становятся непригодными для использования в результате естественного изнашивания, а общие потери металла из-за трения могут достигать до 5 процентов валового национального дохода [1].

Наиболее важным основанием развития защитных покрытий являлось стремление инженеров снизить износ металла деталей машин и механизмов, а также повышение их ресурса.

Отметим, что изучаемые антифрикционные покрытия не являются однородными и состоят из ряда более тонких слоев, при этом имеющих абсолютно разные свойства. Очевидно, что при нанесении подобных покрытий линейные размеры могут изменяться, и данное свойство как раз и позволяет использовать антифрикционные покрытия при ремонте.

Так, например, толщина определенных напыляемых поверхностей может быть увеличена на несколько мм, что позволяет отнести данный способ не только к способам, используемым в производстве (например, при производстве вкладышей), но и к способам восстановления [5, 7].

Также отметим, что чаще всего, при изготовлении деталей, стараются подобрать такие покрытия, которые бы обладали максимально возможными прочностными характеристиками [9]. При этом, в дополнение к прочностным показателям необходимо также принять во внимание и экономические показатели, включающие в себя не только затраты на изготовление, но и возможные эксплуатационные расходы.

Также, взаимная диффузия компонентов системы «подложка - покрытие» и «покрытие - подложка» в силу изменения когезионных и адгезионных свойств, может привести к изменению. В дополнение, термическое воздействие на покрытие в целом и его слои может полностью изменить микроструктуру подложки и других слоев, что может стать

причиной появления внутренних растягивающих напряжений, а в ряде случаев и к появлению в покрытии пор и трещин [9].

С учетом всего вышеизложенного оптимальный выбор системы должен обеспечивать ее постоянство, то есть сохранение прочности (в ее различных аспектах), пластичности, ударной вязкости и др. [6].

Механические способы соединения покрытия с подложкой в силу достаточно низких адгезионных показателей, чаще всего не позволяют получить заданное качество поверхностей. Применение диффузионных методов нанесения (цементация, азотирование, цинкование, хромирование и т.д.) позволяют получить более качественные и технологичные антифрикционные покрытия [9].

Отдельно отметим особую группу антифрикционных покрытий, имеющих своей главной целью снижение износа поверхностей за счет снижения коэффициента трения. Антифрикционные материалы – материалы, обеспечивающие защиту от износа деталей в результате действия на них трения. Как правило, антифрикционные материалы имеют низкий коэффициент трения, за счет чего, в узлах трения они позволяют обеспечивать “скольжение” соприкасающихся деталей.

Наиболее типичным примером высоконагруженных деталей, которые подвергаются износу трением, являются коренные вкладыши. В момент пуска двигателя при отрицательных температурах, когда в узлах трения смазочные жидкости имеют высокую вязкость, наблюдается наибольший износ трением.

Следовательно, необходимо применять антифрикционные покрытия в конструкции вкладышей с целью повышения их ресурса. В настоящее время в конструкции вкладышей предусмотрено нанесение металлических антифрикционных материалов различными методами.

Прежде всего, в нашей исследовательской работе, необходимо с самого начала оценить достоинства и недостатки существующих способов создания

антифрикционных покрытий, что заставило нас провести определенную систематизацию и классифицировать все возможные способы создания и напыления антифрикционных покрытий на подложки из различных материалов, с помощью их классификации с различных позиций, что позволит обоснованно подойти к выбору способа нанесения [5].

Можно составить классификацию антифрикционных покрытий по следующим признакам: назначение, вид материала покрытия, способ его формирования.

Проявлению антифрикционных свойств в условиях сухого трения способствует наличие в материале таких компонентов, которые сами, обладая смазочным действием и присутствуя на поверхности трения, обеспечивают низкое трение (например, графит, дисульфид молибдена и др.). Одним из важных свойств данной группы материалов, при всех условиях трения, является их неспособность или пониженные адгезионные свойства по отношению к материалу сопряжённой детали.

Дополнительно, мы хотели бы отметить тот факт, что существует множество методов нанесения данных покрытий, но в данной статье мы постараемся ограничиться лишь теми, которые получили наибольшее распространение в машиностроении.

Одним из важнейших свойств антифрикционных покрытий, используемых при изготовлении вкладышей ДВС, является прирабатываемость (одно из свойств материалов, позволяющих снизить силу трения, а также интенсивность изнашивания при приработке поверхностей [ГОСТ 27674 - 88]).

Данное свойство улучшает условия приработки, а также снижает вероятность появления возникновения задиров или схватывания. В настоящее время на современных машиностроительных предприятиях при создании конструкций со свойствами подшипников скольжения используется

большая группа материалов, с помощью которых возможно создание различных по свойствам антифрикционных покрытий [5].

Исходя из основного наносимого материала антифрикционного слоя или слоев, существующие покрытия можно разбить на четыре вида: металлические, неметаллические, комбинированные и композиционные.

Отметим, что к металлическим антифрикционным покрытиям можно отнести покрытия на основе мягких металлов, таких как свинец, медь, олово или цинк, а также их сплавов.

В последние годы при выборе антифрикционных покрытий доля нанесения неметаллических покрытий увеличилась почти в четыре раза, что связано с тем, что такие покрытия более технологичны, а также потому, что они обладают такими свойствами, как низкая температура и простота нанесения, более высокая эластичность, а также более низкой удельной стоимостью нанесения по сравнению с покрытиями на основе металлов.

Неметаллические покрытия – по сути, это результат работы химической промышленности, полученный за счет полимеризации ряда органических соединений [3, 4].

Материалы покрытий, которые состоят из металлических и неметаллических материалов, называют композиционными. Отметим, что по своим свойствам они кардинально отличаются от металлических и неметаллических.

По способу формирования антифрикционные покрытия, используемые в машиностроении, можно разделить на гальванические или электрохимические; газотермические; наплавочные, полученные с помощью плакирования; покрытия, полученные спеканием; PVD и CVD покрытия; покрытия, полученные с помощью фрикционно- механической обработки, и т.п. (рис. 2) [5, 7]:

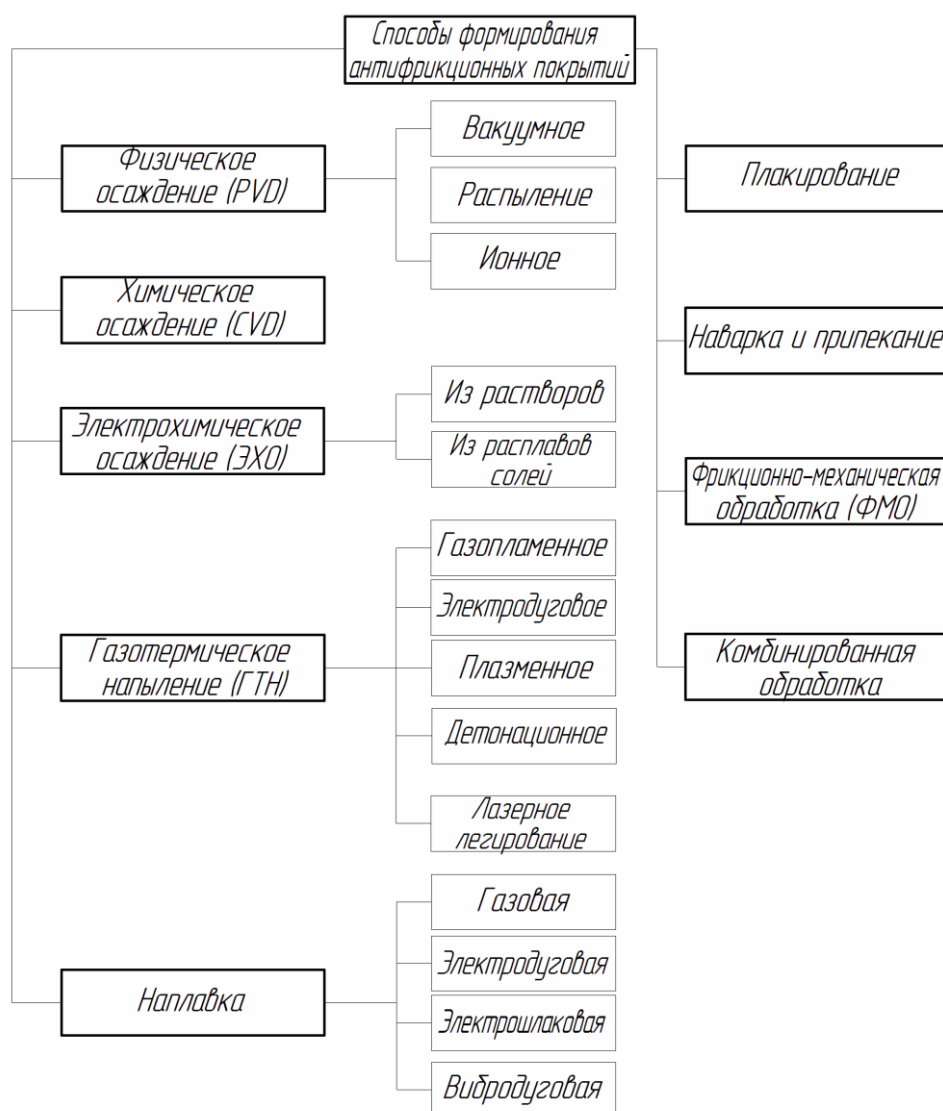


Рис. 2. Основные способы создания антифрикционных покрытий, используемые в машиностроении [9]

Далее опишем наиболее применимые в машиностроении методы нанесения покрытий более подробно.

Известны способы физического осаждения из паровой фазы (англ. Physical Vapor Deposition – PVD), при котором атомы материала, из которого формируется покрытие, переходят в газовую фазу из твердого состояния в результате испарения или распыления мишени, а затем осаждаются на поверхность подложки, формируя покрытие [2].

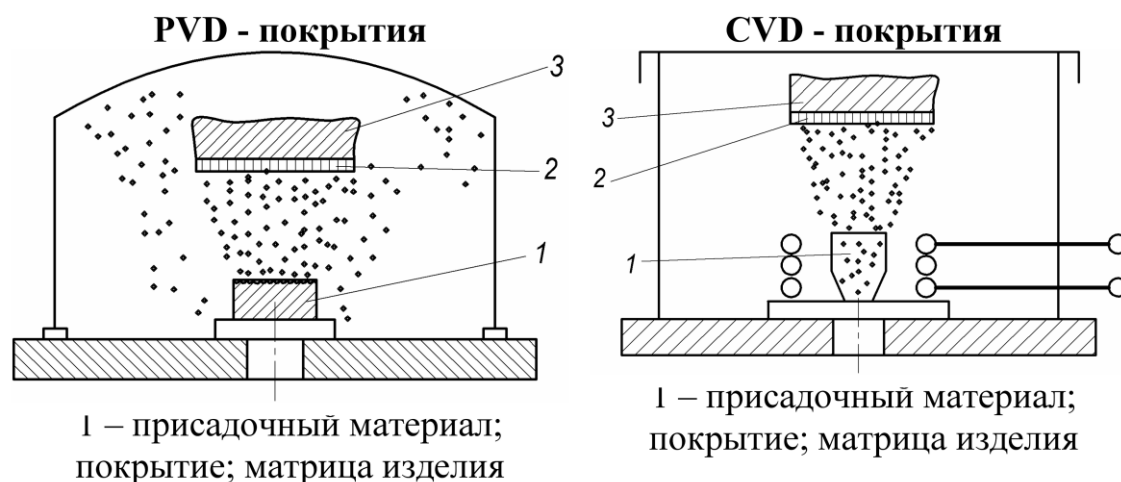


Рис. 3. Схема нанесения PVD и CVD покрытий

Подвидами данного способа являются: термическое испарение, вакуумно-дуговое испарение, электронно-лучевое испарение.

Наносить покрытие можно также распылением различными способами: катодное, магнетронное, ионно-лучевое, газотермическое и электронно-лучевое [8].

Рассмотренные методы являются физическими способами осаждения материала. Рассмотрим далее химические способы.

Метод химического осаждения из паровой (газовой) фазы (англ. Chemical Vapor Deposition – CVD) заключается в формировании покрытий на поверхности подложки в результате химической реакции веществ-предшественников (прекурсоров) [2].

В наше время большой акцент делается на экологическую и стоимостную составляющие при нанесении защитных покрытий на детали. По этой причине необходимо рассмотреть возможность нанесения полимерных композиционных материалов (ПКМ) для защиты деталей от коррозии и фрикционного износа.

Полимерные композиционные материалы – материалы, состоящие из нескольких компонентов, которые отличаются по составу, физико-механическими характеристиками.

Отметим, что в материалах, состоящих из множества компонентов, некоторые составляющие должны обладать армирующими свойствами, а другая часть – связующими [3].

В таблице 1 отражены основные возможности использования материалов, которые можно получить на основе термопластичных и термореактивных связующих.

Таблица 1

Данные о применимости ПКМ материалов [4]

Базовый материал	Применение
Полиэтилены повышенной плотности	Сетки, крышки для ПЭТ бутылок.
Полиэтилены пониженной плотности	Упаковочные пленки, пакеты.
Фторопласты	Втулки, уплотнительные кольца, подшипниковые узлы.
Поливинилхлориды	Трубопроводы, шланги, утепление зданий.
Поликарбонаты	Корпуса приборов, козырьки зданий, теплицы.
Полиамиды	Сильно нагруженные детали, подшипники.
Полипропилен	Амортизаторы автомобиля, бамперы, блоки предохранителей.
Фенопласты	Шкивы ременных передач, втулки и толкатели газораспределительного механизма.
Аминопласты	Крекингостойкие детали, применяемые в системах зажигания; детали электротехнического назначения
Стеклопластики	Кузовные детали автомобилей, сидения для общественного транспорта.
Органопластики	Армирование автомобильных покрышек.
Углепластиковые материалы	Рамы и конструкционные детали.

В таблице 2 представлены данные о продолжительности эксплуатации антифрикционных материалов из ПКМ, при различных температурных воздействиях.

Таблица 2

Данные о возможных сроках эксплуатации антифрикционных покрытий при повышенных температурах

Химический состав	Применение	Внешняя температура, °C	Возможный ресурс при указанной температуре, час
Эпоксидные	Восстановление размеров	≤ 150	≤ 25000
Фенольные	Антифрикционный слой тормозных колодок	≈ 150	≤ 30000
Акрилатные	Покрытие резьб и крепежных элементов	≤ 100	≤ 12000
Кремнийорганические	Прокладки, герметики	≤ 100	≤ 4500

Отметим, что в машиностроении применяется метод нанесения защитных покрытий с помощью напыления.

Для создания качественных покрытий на внутренних поверхностях вкладышей, наиболее перспективным является метод одновременного напыления металлов и ПКМ.

Данный способ позволяет получить покрытия высокого качества с антифрикционными свойствами.

Напыляемый порошок содержит в себе каучук и специальную краску, которые напыляются на поверхность детали с помощью специального металлизатора.

Отметим, что при нанесении используется электростатический эффект, поскольку металлизатор передает порошку заряд, способствующий наилучшему осаждению антифрикционного материала на поверхность.

Заключение. В настоящее время существует множество способов нанесения антифрикционных покрытий.

Исходя из основного функционала, данные виды покрытий, вне зависимости от технологии нанесения или технологии их последующей обработки, необходимо применять следующие требования:

- повышенная плотность (отсутствие пористости) и отсутствие наличия несплошностей;
- повышенные адгезионные свойства с поверхностью подложки;
- повышенные когезионные свойства между однородными или разнородными слоями покрытий;
- однородность толщины покрытий;
- повышенные требования к показателям качества поверхности внешнего нанесенного слоя;
- способность нанесенного слоя совместно с поверхностными слоями основного материала выдерживать повышенные эксплуатационные нагрузки при заданном количестве циклов;
- обладать заданными показателями долговечности.

Дополнительно отметим, что с целью получения необходимых эксплуатационных свойств, наиболее эффективными, технологичными и оптимальными по себестоимости себя зарекомендовали комбинированные методы нанесения с последующей обработкой. Именно поэтому, при необходимости повышения качественных показателей, а также с целью обеспечения повышенных эксплуатационных свойств как отдельно для, так и для покрываемых поверхностей в целом, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований. Причем, подобные экспериментальные исследования должны включать изучение адгезионных и когезионных свойств наносимых покрытий, с учетом всех возможных изменений внешних факторов, влияющих на полученное покрытие (температура, давление, состав смазочных материалов или жидкостей).

В заключение, отметим, что данная классификация отражает лишь малую часть всех возможных антифрикционных покрытий, но достаточно полно отражает комплекс покрытий, применяемых в машиностроении. Также, возможна классификация и по другим признакам, таким как вид и

свойства агрегатного и физического состояния компонентов, толщина покрытия, число и компонентов наносимого материала, количество наносимых слоев и т.д.) [5].

Как результат, наиболее широкими возможностями и свойствами, а также и наилучшими показателями технологичности, обладают композиционные покрытия, обладающие более широкой гаммой свойств.

Кроме того, такие покрытия постоянно изучаются, и в ряде случаев, технология позволяет нанести модифицированные поверхности только за счет изменения параметров напыления, без необходимости замены оборудования на предприятии.

Список источников

1. Baorong Hou, Xiaogang Li, Xiumin Ma, Cuiwei Di, Dawei Zheng, Meng Zheng, Weichen Xu, Dongzhu Lu, Fubin Ma, The cost of corrosion in China, *npj Materials Degradation* (2017) (Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность): учебник/ Д.Н.Гаркунов. – М.: МСХА, 2001. – 616 с.
2. Методы нанесения защитных покрытий: учебное пособие / А.В. Панин, А.Р. Шугуров, А.Г. Колмаков. – Томск: ООО «СПБ Графика», 2020. – 109 с.
3. Баженов, С.Л. Полимерные композиционные материалы / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 352 с.
4. Баурова, Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 265 с.
5. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): учебник / Д.Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2001. – 616 с.
6. Филимонов, С.Ю. Закономерности формирования структуры и свойств поверхностного слоя стали 45, модифицированной методами электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 : защищена 11.12.2012 : утв. 28.12.2012 / Филимонов Семен Юрьевич. – Томск, 2012. – 203 с. – Библиогр.: с. 187–203.
7. Сорокин В.М. Упрочнение поверхностей валов совмещенным натиранием антифрикционных покрытий и ППД / В.М. Сорокин, С.С. Танчук, А.В. Михеев и др. / Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №2. – С.38-43.).
8. Портал о металлообработке: Назначение и способы напыления металла [Электронный ресурс]. – Москва. – URL: <https://wikimetall.ru/metallООbrabotka/napylenie-metalla.html#i-2> (дата обращения: 01.12.2022).
9. Diplomba [Электронный ресурс]. – Москва. – URL: <http://diplomba.ru/work/130773#1> (дата обращения 28.12.2022).

References

1. Baorong Hou, Xiaogang Li, Xiumin Ma, Cuiwei Di, Dawei Zheng, Meng Zheng, Weichen Xu, Dongzhu Lu, Fubin Ma, The cost of corrosion in China, npj Materials Degradation (2017) (Garkunov D.N. *Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost')* (Tribotechnics (wear and wearlessness), Moscow, MSKHA, 2001, 616 p.
2. Panin A.V., Shugurov A.R., Kolmakov A.G., *Metodi nanesenia zashitnix pokritiy: uchebnoe posobie* (Methods for applying protective coatings: training manual), Tomsk, ООО «SPB Grafiks», 2020, 109 p.
3. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kulkov A.A., Oshmyan V.G., *Polimernie kompozicionnye materialy* (Polymer composite materials), Dolgoprudny, Intellect, 2010, 352 p.
4. Baurova N.I., Zorin V.A., *Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov pri proizvodstve i remonte mashin* (The use of polymer composite materials in the production and repair of machines), Moscow, MADI, 2016, 265 p.
5. Garkunov D.N. *Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost')* (Tribotechnics (wear and wearlessness)), Moscow, MSKHA, 2001, 616 p.
6. Filimonov S.Yu. *Zakonomernosti formirovaniya struktury i svoystv poverhnostnogo sloya stali 45, modificirovannoy metodami elektrovzryvnogo legirovaniya i elektronno-puchkovoy obrabotki* (Patterns of Formation of the Structure and Properties of the Surface Layer of Steel 45 Modified by Electroexplosive Alloying and Electron Beam Processing), associate professor, Tomsk, 2012, 203 p.
7. Sorokin V.M., Tanchuk S.S., Mikheev A.V. et al. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*, 2011, no. 2, pp.38-43.
8. URL: <https://wikimetall.ru/metallООbrabotka/napylenie-metalla.html#i-2>
9. URL: <http://diplomba.ru/work/130773#1>

Рецензент: Н.И. Баурова, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Сысоев Илья Алексеевич, магистрант, МАДИ.

Пегачков Алексей Александрович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Information about the authors

Sysoev Ilya A. , undergraduate, MADI.

Pegachkov Aleksey A., Ph.D., associate professor, MADI.

Статья поступила в редакцию 24.01.2023; одобрена после рецензирования 07.02.2023; принята к публикации 14.03.2023.

The article was submitted 24.01.2023; approved after reviewing 07.02.2023; accepted for publication 14.03.2023.