

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6(156). С.29-35.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P. 29-35.

Научная статья
УДК 621
doi: 10.30987/2223-4608-2024-29-35

Технологические возможности применения вращающегося электромагнитного поля в металлообрабатывающем производстве

Валерий Александрович Лебедев¹, к.т.н.
Юрий Михайлович Вернигоров², д.т.н.
Анатолий Анатольевич Кочубей³, к.т.н.
Андрей Александрович Ширин⁴, к.т.н.

^{1, 2} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

³ Таганрогский авиационный научно-технический комплекс
имени Г.М. Бериева, Таганрог, Россия

⁴ ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»,
Ростов-на-Дону, Россия

¹ va.lebidev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

² jvernigorov@donstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8557-3670>

³ watchbox@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ andrey.shirin.94@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0770-1072>

Аннотация. Представлены результаты исследований и направления практического применения магнитодинамического метода в металлообрабатывающем производстве на операциях упрочнения деталей, нанесения твердосмазочных покрытий, для переработки шламовых отходов шлифовального производства. Раскрыта сущность и средства технологического оснащения метода. Приведены аналитические зависимости, рекомендуемые режимы и условия выполнения магнитодинамической обработки при выполнении технологических операций. Установлено, что основным источником энергетического воздействия на объект обработки или переработки является магнитовибрирующий слой, формируемый в устройствах, создающих вращающееся электромагнитное поле и обеспечивающий технологический эффект за счет протекания в нем различных физических эффектов и интенсивного движения частиц дисперсной среды. Разработаны, с использованием устройств с вращающимся электромагнитным полем, конструкторско-технологические решения технологических систем, позволяющие с высокой технико-экономической эффективностью осуществлять: упрочнение деталей малой жесткости и большой длины, а также, деталей с труднодоступными внутренними полостями; производить переработку шламовых отходов шлифовального производства, с целью получения вторичного сырья для порошковой металлургии, инструментального и литейного производства. Показано, что магнитодинамический метод достаточно эффективен для нанесения на поверхности деталей твердосмазочных антифрикционных покрытий, который позволяет: формировать на обрабатываемой поверхности шаровидной и эллипсной формы следы ударно-импульсного воздействия инденторов, свидетельствующие об образовании смазочной пленки; уменьшить высоту микронеровностей и увеличить радиус закругления вершин выступов и истинную площадь контакта между покрытием и поверхностью металла; осуществлять сцепление покрытия по всей площади контакта индентора с металлической поверхностью; обеспечить равномерность нанесения смазочной пленки на поверхности деталей практически любой сложной формы.

Ключевые слова: вращающееся электромагнитное поле, магнитовибрирующий слой, неравноосные инденторы, упрочнение, шлифовальный шлам, разрушение конгломератов, твердосмазочное покрытие

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по гранту РФФИ в рамках научного проекта №20-38-90006; экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования НИИ «Вибротехнология» и НОЦ «Материалы» ДГТУ.

Для цитирования: Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Кочубей А.А., Ширин А.А. Технологические возможности применения вращающегося электромагнитного поля в металлообрабатывающем производстве // Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 29–35. doi: 10.30987/2223-4608-2024-29-35

Technology options for rotating magnetic field when used in metalworking industry

Valery A. Lebedev¹, Ph.D. Eng.
Yuri M. Vernigorov², Ph.D. Eng.
Anatoly A. Kochubey³, Ph.D. Eng.
Andrey A. Shirin⁴, Ph.D. Eng.

^{1,2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

³ Taganrog Aviation Scientific and Technical Complex
named after G.M. Beriev, Taganrog, Russia

⁴ Federal State Unitary Enterprise «Rostov-on-Don Scientific Research Institute of Radio Communications»,
Rostov-on-Don, Russia

¹ va.lebedev@yandex.ru

² jvernigorov@donstu.ru

³ watchbox@mail.ru

⁴ andrey.shirin.94@yandex.ru

Abstract. Research results and ways of applications of the electromagnetic forces method in metalworking production for the operations of parts hardening, dry-lubricant coating processes, slurry waste upgrading in grinding production, are presented. The essence and means of method techniques are revealed. Analytical dependencies, recommended modes and conditions for performing magnetodynamic treatment under technological operations are given. It is found that the main energy deposition impact factor as a target exposure for the object under treatment or waste management is a magnetically vibrating layer formed in devices that create a rotating electromagnetic field and provide an operational benefit due to the occurrence of various physical effects and the intense movement of particles of a dispersed medium. Design and technological solutions of technological systems have been developed using devices with a rotating electromagnetic field, allowing for high technical and economic efficiency to provide: hardening of slender parts having long length, as well as parts with hard-to-reach internal cavities; slurry waste management in grinding production in an attempt to obtain processed raw materials for powder metallurgy, tool and foundry production. It is shown that electromagnetic forces method is quite effective for applying dry-lubricant anti-friction coatings on the surface of parts, making it possible to form traces of shock-pulse action of indentors on the surface of the treated spherical and elliptical shape, which prove the formation of a lubricant film; allowing height reduction of the irregularities and increasing the radius of apex of salient roundness together with the true contact area between the coating and the metal surface; ensuring the adhesion of the coating over the entire contact area of the indenter with the metal surface; providing the uniformity of the application of a lubricating film on the surfaces of parts having various complex shapes.

Keywords: rotating electromagnetic field, magnetically vibrating layer, unequiaxed indentors, hardening, grinding sludge, destruction of conglomerates, dry-lubricant coating

Acknowledgements: the material was prepared as a part of scientific research under the RFBR grant within the framework of scientific project No. 20-38-90006; experimental studies were conducted using the equipment from the Research Institute «Vibrotechnology» and the Scientific Research Center «Materials» of DSTU.

For citation: Lebedev A.V., Vernigorov Yu.M., Kochubey A.A., Shirin A.A. Technology options for rotating magnetic field when used in metalworking industry / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 29–35. doi: 10.30987/2223-4608-2024-29-35

Введение

Наметившаяся, в последние годы тенденция активного развития и внедрения в технологическую практику обработки материалов электрофизических методов, предопределили создание магнитодинамического метода обработки, использующего в качестве основного источника энергии вращающееся электромагнитное поле (ВЭМП). [1]. Формируемый в рабочей зоне индуктора (рис. 1) магнитовибрирующий слой (МВС), обеспечивает с высокой интенсивностью и гибкостью технологический эффект процесса обработки [1, 2].

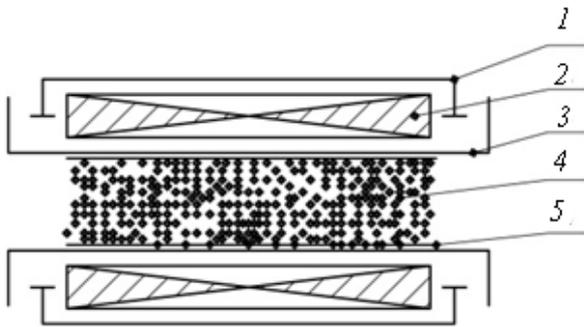


Рис. 1. Технологическая система магнитодинамической обработки:

1 – корпус; 2 – индуктор; 3 – рабочая зона; 4 – обрабатываемая среда; 5 – сменная вставка

Fig. 1. Technological system of magnetodynamic treatment:

1 – housing; 2 – inductor; 3 – working area; 4 – processing medium; 5 – replaceable insert

Основными управляющими параметрами, влияющие на производительность и качество выполняемых магнитодинамическим методом технологических процессов, являются частота вращения и напряженность электромагнитного поля, масса загрузки, размеры и магнитные свойства обрабатываемой или обрабатываемой среды.

Исследования, проведенные в НИИ «Вибротехнология» ДГТУ позволили определить направления наиболее предпочтительного практического применения магнитодинамического метода в металлообрабатывающем производстве: упрочнение деталей, переработка шламовых отходов шлифовального производства, нанесение покрытий. Несмотря на различия вышеотмеченных технологических

процессов все они могут быть реализованы в условиях одного и того типа устройства, характеризующегося простотой конструктивного исполнения и управляемостью процесса обработки. Ниже представлены особенности и практические рекомендации по технологическому обеспечению обработки магнитодинамическим методом.

Упрочняющая обработка магнитодинамическим методом

Для упрочнения деталей магнитодинамическим методом в качестве обрабатываемой среды применяют неравноосные цилиндрические инденторы из стали ШХ15, с соотношением длины к диаметру $l/d = 10$ [1, 3, 4]. В процессе магнитовибрирования инденторы, совершая хаотичное поступательно-вращательное движение, в секунду осуществляют от $10^3 \dots 10^4$ ударно-импульсных соударений с поверхностью обрабатываемых деталей, подвергая её упруго-пластической деформации. Эффективность силового воздействия инденторов на обрабатываемую поверхность зависит от массы их загрузки в рабочую зону устройства, совокупный объём которых не должен превышать $1/3$ объёма рабочей зоны устройства.

Значение индукции, при котором формируется МВС, обеспечивающий технологический эффект упрочнения установлен на уровне 0,08 Тл. Увеличение индукции электромагнитного поля до 1,12 Тл приводит к повышению интенсивности процесса 1,5 раза.

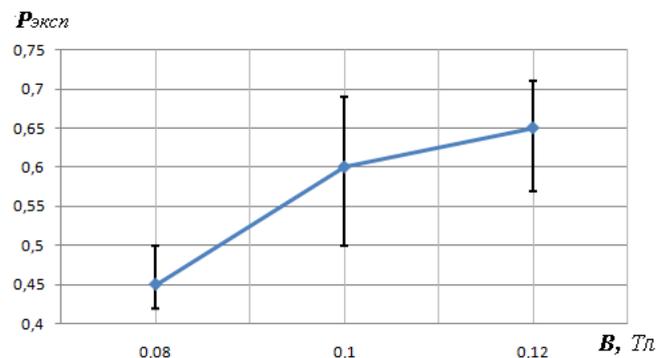


Рис. 2. Влияние индукции магнитного поля на интенсивность обработки магнитодинамическим методом

Fig. 2. Influence of magnetic field induction on the intensity of treatment using a magnetodynamic method

На основе теоретико-вероятностных представлений контактного взаимодействия инденторов с обрабатываемой поверхностью предложена формула для оценки продолжительности упрочняющей обработки деталей магнитодинамическим методом:

$$T_{\text{обр}} = \frac{i}{P \omega},$$

где i – кратность покрытия поверхности пластическими отпечатками, рекомендуется 12...14; P – интенсивность обработки, составляет 0,8...0,85; ω – угловая скорость вращения электромагнитного поля, Гц.

Экспериментально подтверждено, что продолжительность упрочнения деталей магнитодинамическим методом в пределах рабочей зоны устройства составляет 3...5 мин. При этом высота профиля обрабатываемой поверхности

достигает величины установившейся шероховатости. Твёрдость, глубина и величина остаточных напряжений увеличиваются до значений, свойственных предельному состоянию упрочнённого поверхностного слоя обрабатываемого материала [3, 4]. Дальнейшая обработка свыше 5 мин приводит к снижению этих параметров в результате перенаклёпа поверхностного слоя.

Применение устройств, реализующих магнитодинамический метод, позволяет с высокой технико-экономической эффективностью осуществлять: упрочнение деталей малой жесткости и большой длины (тонкостенные трубы, стрингеры, пояса), а также деталей с труднодоступными внутренними полостями (например: ланжерон и др.)

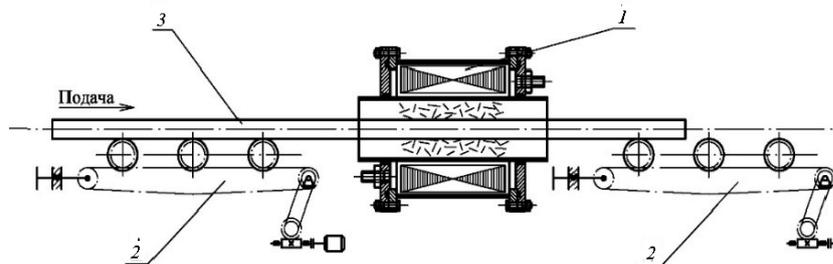


Рис. 3. Технологическая схема магнитодинамической обработки длинномерных деталей: 1 – рабочий блок устройства с ВЭМП; 2 – механизм перемещения детали; 3 – деталь

Fig. 3. Technological scheme of magnetodynamic treatment of long parts: 1 – working unit of the device with VEMT; 2 – mechanism of part moving; 3 – part

Установка проходного типа, представленная на рис. 2, по сравнению с существующими на практике дробеструйными установками, позволяет снизить материалоемкость и энергоёмкость оборудования до 8 раз и повысить производительность обработки деталей в 1,5 раза [4].

Магнитодинамическая переработка шламовых отходов шлифовального производства

Проведённые исследования и полученные при этом результаты показали что устройства с вращающимся электромагнитным полем позволяют достаточно эффективно решить проблему разрушения и измельчения шламовых

отходов, представляющих собой, после удаления технологической жидкости, обезжиривания и сушки, смесь конгломератов различной формы, состоящих на 80 % из ферромагнитных частиц в виде металлической стружки и частиц абразива [5, 7, 10].

В основе разрушения и измельчения конгломератов и его частиц магнитодинамическим методом лежит процесс ударно-импульсного контактного взаимодействия, протекающий в условиях магнитовибрирующего слоя. Установлено, что наибольший технологический эффект разрушения и измельчения конгломератов шлама, достигается при частотах магнитного поля в пределах 50...60 Гц и загрузке их не более 35...40 % объёма рабочей зоны устройства (рис. 4).

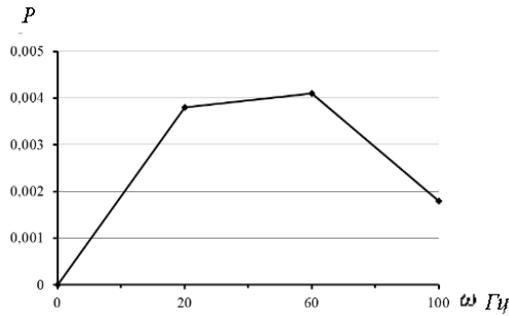


Рис. 4. Влияние частоты ВЭМП на интенсивность разрушения конгломератов шлама

Fig. 4. Influence of the EMF frequency on the intensity of destruction of sludge conglomerates

На основе законов Риттингера и Кирпичева-Кика установлены пороговые значения индукции, обеспечивающие:

– разделение магнитной и немагнитной компонент содержащихся в шламовых отходах [5]:

$$B_{вр} = 8,02 \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi (\rho_{ч} \cdot N \cdot D_{ч} \cdot E_{адгч})^{0,5}};$$

– измельчение ферромагнитных частиц [5, 7]:

$$B_{ви} = 3,42 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{в} \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot D_{ч,к}}{Z_{и}} \cdot \pi \left[\frac{\rho_{ч}}{E} \cdot (Z_{и}^3 - 1) \right]^{0,5}},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Н/А²; μ – относительная магнитная проницаемость; $\rho_{ч}$ – плотность ферромагнитных частиц кг/м³; $D_{ч}$ – размер абразивных частиц конгломерата, м; N – количество частиц, формирующих ферромагнитный агрегат конгломерата, соизмеримых с размером абразивных частиц; π – рад/с; $\sigma_{в}$ – предел прочности ферромагнитного агрегата и его частиц, Па; E – модуль упругости ферромагнитного материала, Па; $Z_{и} = \frac{D_{ч,н}}{D_{ч,к}}$ – степень измельчения ферромагнитного агрегата; $D_{ч,н}$, $D_{ч,к}$ – исходный размер ферромагнитного агрегата и конечный размер измельченных частиц, м.

Экспериментально подтверждена адекватность предложенных аналитических зависимостей, из которых следует, что для реализации процессов разделения конгломератов шлама на составляющие компоненты, индукция вращающегося электромагнитного поля должна быть выше 2,5 мТл, а для измельчения

ферромагнитных (стальных) частиц необходимо высоко градиентное поле с индукцией не менее 5,5 мТл.

Для оценки продолжительности процессов разрушения и измельчения рекомендованы вероятностные зависимости [7]:

$$t_p = \frac{2\pi Z_p}{P\omega}; \quad t_{и} = \frac{2\pi Z_{и}}{P\omega},$$

где P – интенсивность процесса разрушения; Z_p – среднестатистическая степень разрушения конгломератов, представляющая собой отношение масс исходных конгломератов к массе выделившихся при разрушении неферромагнитных частиц.

Конструкторско-технологическое решение технологического комплекса, реализующего разрушение, разделение и измельчение шламов шлифовального производства магнитодинамическим методом приведено на рис. 5 [5].

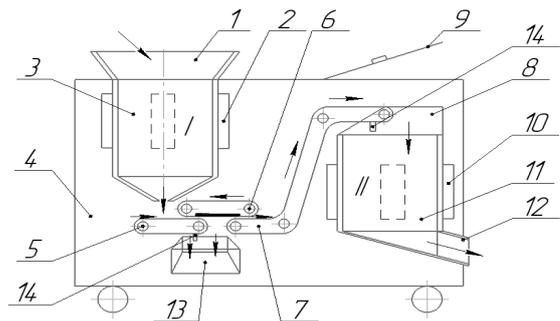


Рис. 5. Технологическая схема разделения и измельчения шламовых отходов: 1 – бункер – приемник; 2, 10 – индукторы с ВЭМП; 3, 11 – рабочая зона; 4 – корпус; 5, 7 – транспортеры ленточные; 6 – транспортер ленточный с электромагнитом; 8 – ограждающее устройство; 9 – люк; 12, 13 – склиз; 14 – щетка

Fig. 5. Technological scheme of separation and crushing of sludge waste:

1 – hopper receiver; 2, 10 – inductors with BEMT; 3, 11 – working area; 4 – housing; 5, 7 – belt conveyors; 6 – belt conveyor with electromagnet; 8 – fence; 9 – hatch; 12, 13 – slide; 14 – brush

Комплекс, имея малые габаритные размеры (1200x400x500 м), позволяет автономно полностью автоматизировать процесс переработки шламов с производительностью 0,8...0,9 кг/мин при индукции магнитного поля 8,5 мТл и частоте 60 Гц и обеспечить измельчение ферромагнитных частиц до размера 40...25 мкм. По сравнению с переработкой на базе

устройства состоящих из бильной мельницы и магнитовибрационного сепаратора комплекс позволяет повысить технико-экономическую эффективность переработки шламовых в 4 раза.

Нанесение твердо-смазочных покрытий магнитодинамическим методом

В качестве наиболее распространённых способов нанесения твердо-смазочных покрытий на основе порошкообразных материалов со слоистой структурой, широко применяемых в технологии изготовления деталей для улучшения технологических характеристик, снижения трения, в машинах, используют ручной и напыление. Существенным недостатком этих способов является низкая адгезионная прочность покрытия [9].

Механическая активация процессов нанесения покрытия путём ударно-импульсного воздействия частиц (гранул) рабочей среды в условиях виброволновых технологических системах позволяет повысить эффективность процесса и получить дополнительные технико-экономические преимущества связанные с обработкой деталей в больших количествах [6, 9]. Однако, как показали исследования, энергосиловые возможности этого метода, составляющие порядка 30...120 Н, не обеспечивают формирование на поверхности достаточно прочного покрытия. Для их повышения предлагается применить магнитодинамический метод, сущность которого заключается в следующем.

В рабочую зону устройства в определённом соотношении одновременно загружаются стальные неравноосные инденторы и среда покрытия, которая не обладает ферромагнитными свойствами (рис. 6). Под воздействием вращающегося электромагнитного поля сформированный из неравноосных инденторов магнитовибрирующий слой приводит твердо-смазочную среду в псевдоожжиженное состояние [8]. Одновременно протекает процесс измельчения её при попадании частиц между двумя соударяющимися инденторами. Частицы, находящиеся на поверхности детали, в результате ударно импульсного воздействия инденторов на них вдавливаются в поверхность и модифицируют поверхностный слой, изменяя его геометрические и физико-механические параметры. Эффективность протекания процесса зависит от напряжённости и градиента индукции магнитного поля.

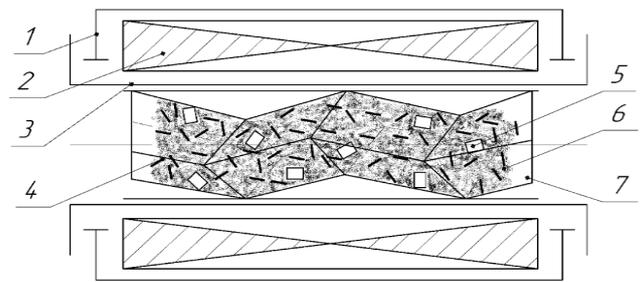


Рис. 6. Технологическая схема нанесения покрытия магнитодинамическим методом:

1 – корпус; 2 – индуктор; 3 – рабочее пространство; 4 – инденторы; 5 – обрабатываемые детали; 6 – среда покрытия; 7 – винтовой ротор

Fig. 6. Technological scheme of coating by magnetodynamic method:

1 – housing; 2 – inductor; 3 – workspace; 4 – indentors; 5 – workpieces; 6 – coating medium; 7 – screw rotor

Нанесение покрытия может осуществляться на поверхность деталей, находящихся в рабочей зоне устройства или в свободном состоянии, или в закреплённом относительно магнитовибрирующего слоя или осуществляющих относительно осевого перемещение вдоль рабочей зоны устройства. Применение винтообразного исполнения рабочей зоны устройства (рис. 6) приводит к дополнительной активации процесса перемешивания среды покрытия, и как следствие интенсифицировать процесс нанесения покрытия.

Об эффективности нанесения твердосмазочных покрытий магнитодинамическим методом свидетельствуют нижеприведённые экспериментальные результаты:

– формируемые на обрабатываемой поверхности шаровидной и эллипсной формы следы ударно-импульсного воздействия инденторов, свидетельствуют об образовании смазочной плёнки, толщина которой зависит от механического сцепления между кристаллами MoS₂ и металлом, обусловленного шероховатостью, т. е. доступной удельной поверхностью;

– уменьшается высота микронеровностей, радиус закругления вершин выступов и истинная площадь контакта между покрытием и поверхностью металла увеличивается;

– сцепление покрытия осуществляется по всей площади контакта индентора с металлической поверхностью;

– равномерность нанесения смазочной плёнки на поверхности деталей практически любой сложной формы.

Заклучение

Проведённые исследования и предложенные на их основе конструкторско-технологические решения позволяют сделать вывод об эффективности и перспективности применения устройств с вращающимся электромагнитным полем в металлообрабатывающем производстве для выполнения технологических операций упрочнения деталей малой жесткости и большой длины, а также, деталей с труднодоступными внутренними полостями; для переработки шламовых отходов шлифовального производства, с целью получения вторичного сырья для порошковой металлургии, инструментального и литейного производства Магнитодинамический метод нанесения покрытий в среде металлических тел сочетает все необходимые условия для нанесения твердосмазочных покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Логвиненко Д.Д., Щеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев.: Техника, 1976. 143 с.
2. Болога М.К., Марта И.Ф. Магнитоожигение во вращающемся магнитном поле // Магнитная гидродинамика. 1988. № 3. С. 103–108.
3. Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Кочубей А.А. Энергетические аспекты отделочно-упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 6 (60). С. 35–42.
4. Кочубей А.А., Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле. Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2018. 135 с.
5. Лебедев В.А., Ширин А.А., Коваль Н.С., Вернигоров Ю.М. Технологическое обеспечение переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитного поля // Воронежский научно-технический Вестник. 2022. Т. 2. № 2 (40). С. 30–37.
6. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. 694 с.

7. Лебедев В.А., Ширин А.А., Коваль Н.С., Вернигоров Ю.М. Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем // Advanced Engineering Research. 2022. Т. 22. № 4. С. 338–345.
8. Егорова С.И. Магнитовибрационное ожигение. Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2009. 162 с.
9. Иванов В.В., Бабичев А.П. Вибрационные механохимические покрытия. Саарбрюкен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 119 с.
10. Повстяной А.Ю., Рудь В.Д. Использование отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения // Устойчивое развитие. 2014. № 19. С. 159–164.

REFERENCES

1. Logvinenko D.D., Shelyakov O.P. Intensification of technological processes in devices with a vortex layer. Kiev: Technika, 1976. 143 p.
2. Bologa M.K., Marta I.F. Magnetic fluidizing in a rotating magnetic field // Magnetic hydrodynamics. 1988, no. 3, pp. 103–108.
3. Lebedev V.A., Vernigorov Yu.M., Kochubey A.A. Power aspects of parts strengthening processing under rotating field conditions // Science intensive technologies in machine building. 2016, no. 6 (60), pp. 35–42.
4. Kochubey A.A., Lebedev V.A., Vernigorov Yu.M. Long parts hardening in the devices with rotating magnetic field. Rostov-on-Don: DSTU, 2018, 135 p.
5. Lebedev V.A., Shirin A.A., Koval N.S., Vernigorov Yu.M. Technological support for processing sludge waste of grinding production using electromagnetic field // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2022, vol. 2, no. 2 (40), pp. 30–37.
6. Babichev A.P. Fundamentals of vibration technology. Rostov-on-Don: Publishing Center of DSTU, 2008. 694 p.
7. Lebedev V.A., Shirin A.A., Koval N.S., Vernigorov Yu.M. Study on processing grinding sludge conglomerates in devices with a rotating electromagnetic field // Advanced Engineering Research. 2022, vol. 22, no. 4, pp. 338–345.
8. Egorova S.I. Magnetovibration liquefaction. Rostov-on-Don: DSTU, 2009, 162 p.
9. Ivanov V.V., Babichev A.P. Vibrational mechanochemical coatings. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 119 p.
10. Povstyanoy A.Yu., Rud V.D. The use of industrial waste materials for the manufacture of constructional purposes // Sustainable development. 2014, no. 19, pp. 159–164.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 24.02.2024.

The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 19.02.2024; asseped for publication 24.02.2024.