DOI: 10.34220/2311-8873-2026-15-21

УДК 621

2.5.6 – технология машиностроения

ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Лебедев Валерий Александрович,
к.т.н., профессор, кафедра «Технология машиностроения", Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону.

✉[1] **Райа Ахмад,**
аспирант, кафедра «Технология машиностроения", Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону.

Аннотация. В статье рассмотрен механизм нанесения твёрдосмазочных покрытий магнитодинамическим методом. Показано, что основным энергетическим фактором, оказывающим комплексное воздействие на весь процесс, является неоднородное вращающееся электромагнитное поле. Ключевым рабочим элементом выступают ферромагнитные неравноосные инденторы цилиндрической формы, формирующие магнитовибрирующий слой. Описан механизм перевода технологической среды покрытия в псевдоожиженное состояние. На основе анализа исследований в области вибрационных механохимических покрытий сформулированы основные этапы формирования покрытия. Установлены модели, которые должны быть положены в основу аналитического описания особенностей и как следствие управления процессом твердосмазочных покрытий магнитодинамическим методом.

Ключевые слова: ТВЁРДОСМАЗОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ, МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД, ВРАЩАЮЩЕЕСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ФЕРРОМАГНИТНЫЕ НЕРАВНООСНЫЕ ИНДЕНТОРЫ.

[1] Автор для ведения переписки

UDC 621

FEATURES OF APPLYING SOLID LUBRICANT COATINGS BY THE MAGNETODYNAMIC METHOD

Lebedev Valery Alexandrovich,
candidate of technical sciences, professor, department of mechanical engineering technology, Don state technical university, Rostov-on-Don.

✉[1] **Raya Ahmad,**
postgraduate student, department of mechanical engineering technology, Don state technical university, Rostov-on-Don.

Annotation. This article examines the mechanism for applying solid lubricant coatings using the magnetodynamic method. It is shown that the primary energy factor, which has a complex effect on the entire process, is a non-uniform rotating electromagnetic field. The key working element is ferromagnetic, non-equiaxed, cylindrical indenters that form a magnetically vibrating layer. The mechanism for converting the coating process medium into a fluidized state is described. Based on an analysis of research in the field of vibration-assisted mechanochemical coatings, the main stages of coating formation have been formulated. Models have been established that should form the basis for an analytical description of the characteristics and, consequently, for the control of the process of applying solid lubricant coatings using the magnetodynamic method.

Keywords: SOLID LUBRICANT COATING, MAGNETODYNAMIC METHOD, ROTATING ELECTROMAGNETIC FIELD, FERROMAGNETIC NONEQUIAXIAL INDENTERS.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Твердосмазочные покрытия на основе порошкообразных материалов (ТСП) со слоистой структурой, нанесенные на металлические поверхности, широко применяются в технологии изготовления деталей для улучшения технологических характеристик, снижения трения, повышения надежности, в том числе долговечности, машин и механизмов.

В качестве компонента для формирования ТСП чаще всего используют сульфиды различных материалов, селениды, теллуриды, хлориды, фториды, иониды, оксиды металлов и др. Большой интерес в этом отношении представляет дисульфид молибдена (MoS2), обладающий слоистой структурой, в которой есть "прочные" и "плотные" слои, в достаточно большой степени удаленные друг от друга. В слое, покрывающем поверхность трения, имеются сильные связи, тогда как между слоями связь слабая. Такие свойства покрытия обеспечивают "легкое" скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга, способствуя снижению коэффициента трения и повышению износостойкости поверхностей деталей, входящих в пары трения различных механизмов и машин.

Методы нанесения ТСП разнообразны и обусловлены эксплуатационными условиями трения и изнашивания узлов и механизмов, конструкциями покрываемых деталей, необходимыми техническими ресурсами. Анализ работ, характеризующих условия образования ТСП и особенности взаимодействия обрабатывающей среды с поверхностью обрабатываемых деталей, показал, что перспективным направлением является формирование механохимических ТСП с использованием ударно-импульсных эффектов [1, 2]. Опыт, накопленный в ДГТУ, показал, что механическая активация процессов нанесения покрытия путём ударно-импульсного воздействия частиц (гранул) рабочей среды в условиях виброволновых технологических систем позволяет повысить эффективность процесса и получить дополнительные технико-экономические преимущества: производить обработку деталей в больших количествах; обеспечить равномерное и всестороннее воздействие на поверхности различной кривизны. Наряду с отмеченными преимуществами, как показали исследования, энергосиловые возможности этого метода, составляющие по силе интервал порядка 3,0…12 кГс, не обеспечивают формирование на поверхности достаточно прочного покрытия. Это сужает область его практического применения и, как следствие, определяет актуальность исследований в этом направлении.

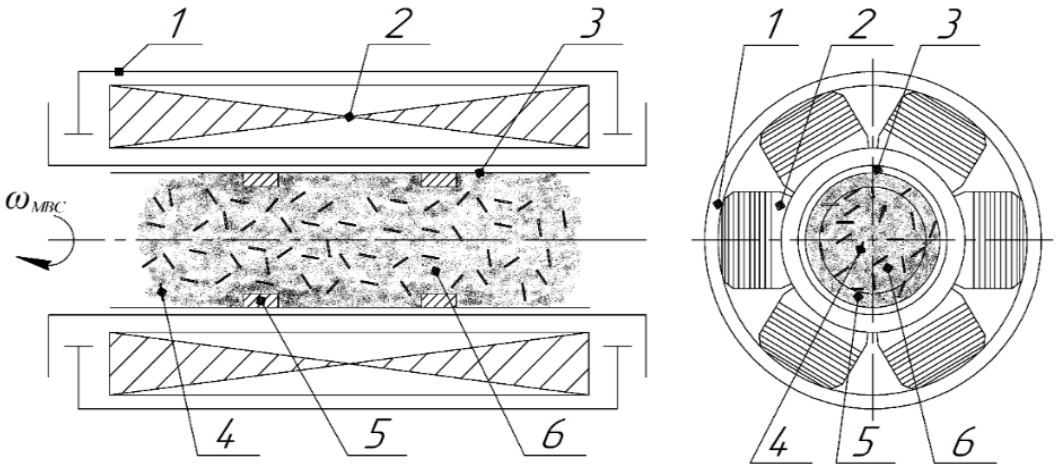
В качестве решения этой задачи предлагается рассмотреть к использованию магнитодинамический метод нанесения тведосмазочных покрытий в устройствах с вращающимся электромагнитным полем [3-6]. Однако для практической реализации этого метода требуется разработка инженерной методики, позволяющей прогнозировать рациональный выбор основных параметров и режимов обработки, а также управлять этими параметрами для получения качественных твердосмазочных покрытий с учетом условий их эксплуатации.

Целью настоящей работы является разработка технологических основ нанесения твердосмазочных покрытий магнитодинамическим методом в устройствах с вращающимся электромагнитным полем на основе анализа физико-механических процессов, кинетики движения рабочих тел и механизма формирования покрытия.

2 Материалы и методы

На рис. 1 представлена схема магнитодинамического метода нанесения покрытий, реализуемого с использованием устройства с вращающимся электромагнитным полем.

Процесс нанесения твёрдосмазочных покрытий происходит за счёт воздействия вращающегося электромагнитного поля на ферромагнитные неравноосные инденторы приходящие в сложное, хаотичное движение, создавая своеобразный магнитовибрирущий слой (МВС), вращающийся с определенной угловой скоростью, от действия которых вносимые в такие устройства твёрдосмазочные материалы, переходя во взвешенное хаотическое состояние попадают на поверхность детали и происходит их внедрение за счёт ударно импульсного воздействия инденторов [3, 7-9].



1 – корпус; *2* – индуктор; *3* – рабочее пространство; *4* – инденторы; *5* – обрабатываемые детали, *6* – среда покрытия (дисульфид молибдена).

Рисунок 1 – Схема магнитодинамического способа нанесения покрытий

В процессе обработки детали могут находиться в рабочей зоне устройства или в свободном состоянии, или в закреплённом относительно магнитовибрирующего слоя, или осуществлять относительное осевое перемещение вдоль рабочей зоны устройства. По форме рабочей зоны различают устройства с цилиндрической рабочей камерой и винтообразной. Винтообразное исполнение рабочей зоны устройства позволяет активизировать процесс перехода частиц твердосмазочного материла покрытия, не обладающего магнитными свойствами во взвешенное псевдоожиженное состояние и, как следствие, интенсифицировать процесс нанесения покрытия.

3 Результаты исследований

Технологическая система (ТС), реализующаяся магнитодинамический метод нанесения покрытий, как представлено на рис. 2, обеспечивает взаимосвязь между входными и выходными параметрами. К входным параметрам ТС нанесения покрытия магнитодинамическим способом относятся:

– деталь, характеризующаяся показателями качества поверхности и физико-механическими свойствами материала, габаритными размерами изделия;

– технологическая среда покрытия, определяющая вид наносимого покрытия в процессе обработки;

– средства механической активации процесса, включающая ферромагнитные неравноосные инденторы, обеспечивающие нанесение покрытия на поверхность в состоянии магнитовибрирования, и винтовой ротор, формирующий форму поверхности рабочей зоны устройства и активирующий процесс псевдосжижения технологической среды покрытия и энергетического состояния магнитовибрирующего слоя;

– технологическое оборудование, создающее вращающееся электромагнитное поле.

В качестве выходных параметров ТС выступают: параметры качества покрытия; производительность процесса; эксплуатационные свойства покрытия; технико-экономические показатели процесса. Установлено, что рабочий процесс представляет собой комплекс явлений и эффектов, протекающих в зоне устройства от воздействий вращающегося электромагнитного поля, проиллюстрированный на рис. 2.

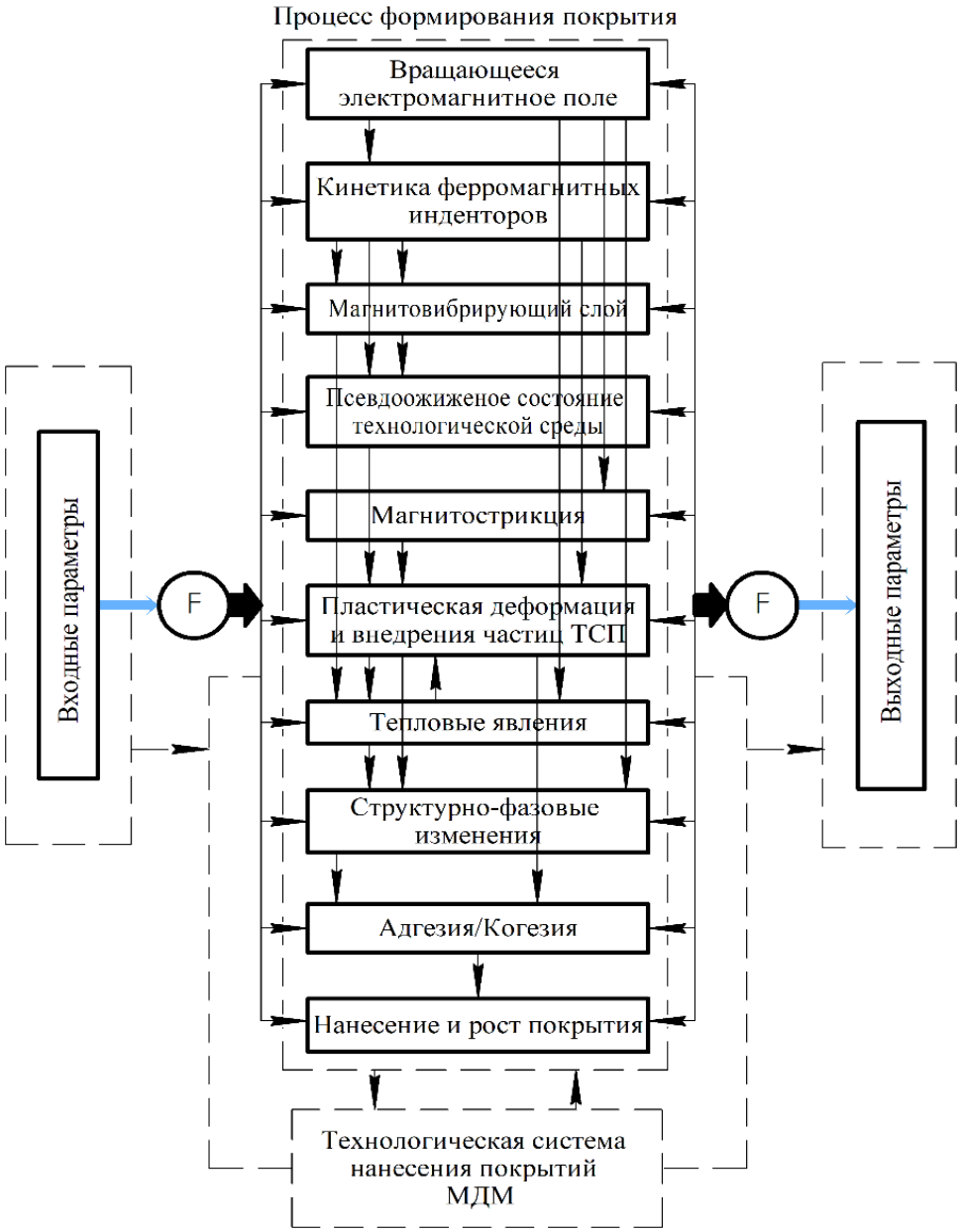


Рисунок 2 – Физические явления и эффекты, определяющие процесс нанесения твёрдосмазочного покрытия магнитодинамическим методом

Рабочий процесс нанесения покрытия является связующим звеном входных и выходных параметров ТС и представляет собой механохимический синтез явлений и эффектов, протекающих в рабочей зоне устройства под воздействием вращающегося электромагнитного поля, обеспечивающих нанесение покрытия на поверхности обрабатываемых деталей. Комплекс взаимосвязанных физических явлений и эффектов, протекающих в поверхностном слое детали, проиллюстрирован на рис. 2.

Основным энергетическим фактором магнитодинамического метода, оказывающим комплексное воздействие на весь процесс нанесения покрытия, является неоднородное вращающееся электромагнитное поле, от напряжённости, градиента и индукции которого зависит эффективность протекания процесса.

Качество наносимого на поверхность детали твердосмазочного покрытия главным образом определяется его адгезионными и когезионными характеристиками, которые обуслов-

лены силами межмолекулярного взаимодействия как в кристаллической структуре среды покрытия, так и в детали, и зависят от степени их сближения [3]. Для повышения степени сближения среды покрытия и металла на макро/нано уровне и как следствие повышение адгезионной прочности покрытия возможно с помощью применения высокого внешнего локального силового воздействия, которое позволит осуществить не только пластическую деформацию поверхности металла, но и внедрение в неё мелкодисперсных частиц технологической среды покрытия. В этом плане магнитодинамический метод по сравнению с вибрационным методом, имеет достаточно широкие преимущества из-за сопровождающих его эффективную реализацию физических явлений и процессов: магнитных, тепловых, структурно-фазовых, магнитострикционных, механических (рис. 2).

Ключевым рабочим элементом метода, непосредственно осуществляющим технологический эффект нанесения покрытия на поверхность, выступают неравноосные инденторы, обладающие ферромагнитными свойствами и имеющие цилиндрическую форму. Энергетическое состояние инденторов и кинетика их движения в рабочей зоне устройства определяется топологией и характеристиками вращающегося электромагнитного поля, а также формой рабочей зоны устройства.

Формирующийся из инденторов магнитовибрирующий слой позволяет перевести технологическую среду покрытия, состоящую из мелкодисперсных частиц, не обладающих магнитными свойствами, из состояния покоя в псевдоожжиженное состояние. Находясь в этом состоянии частицы технологической среды покрытия при попадании между двумя соударяющимися инденторами подвергаются дальнейшему измельчению, а при попадании между индентором, соударяющимся с обрабатываемой поверхностью, вдавливаются в неё и тем самым формируют покрытие.

Процесс внедрения частиц технологической среды покрытия в поверхность метала сопровождается пластической деформацией, в результате чего происходит модификация поверхностного слоя, обусловленная структурно-фазовыми превращениями, изменяются его геометрические и физико-механические параметры. Кроме того следует подчеркнуть, что на эффективность этих процессов формирования покрытия в условиях неоднородного магнитного поля существенное влияние оказывают тепловые эффекты, способствующие возрастанию скорости движения молекул в локальной зоне контактного взаимодействия, а также магнитострикционные процессы, связанные с изменением взаимосвязей между атомами в кристаллической решетке, свойственные всем материалам, что характеризует изменение состояния намагниченности тела, его объёма и линейных размеров [7].

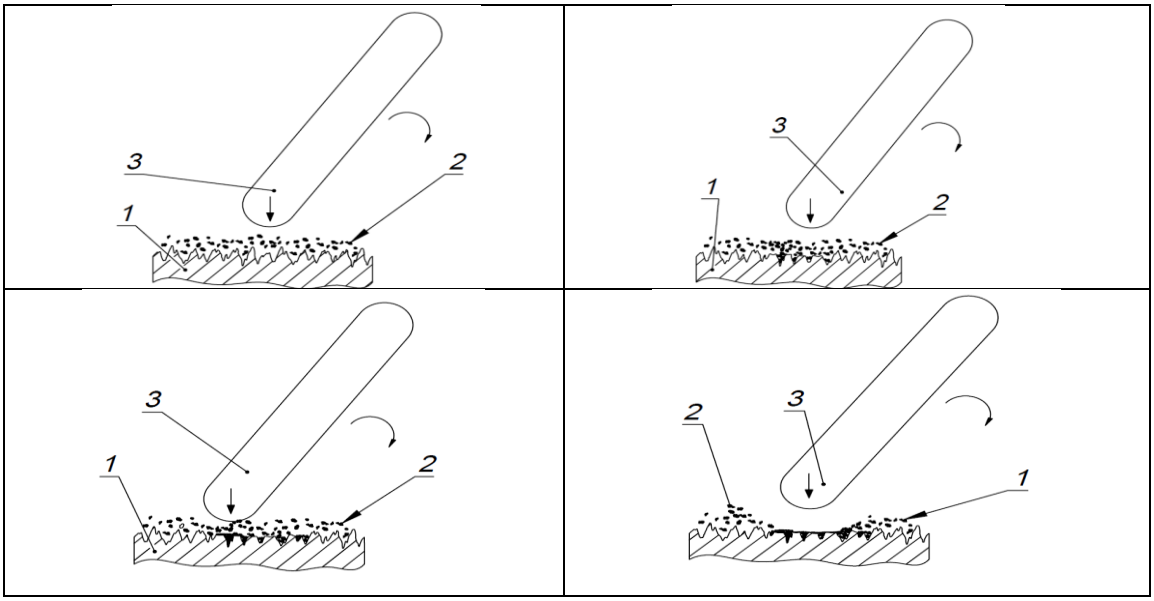
Вышеизложенный анализ механизма образования слоя твёрдой смазки слоистой структуры позволяет представить структурно-логическую последовательность формирования ТСП дисульфида молибдена магнитодинамическим методом следующим образом (рис. 3):

1. Механический контакт и адсорбция частиц MoS_2. В момент приложения внешней нагрузки, благодаря силе соударения индентора с поверхностью обрабатываемого материала, происходит упругопластическая деформация в зоне контакта. За счёт сближения наносимого покрытия с деталью частицы порошка адсорбируются на поверхности металла.

2. Активация поверхностного слоя металла. Активация поверхности осуществляется в результате пластического деформирования и увеличения плотности дислокаций, разрушения оксидных плёнок и образования ювенильных участков поверхности, увеличения площади контакта, повышение температуры в зоне соударения (температурная вспышка).

3. Образование граничного слоя. Этот этап осуществляется вследствие измельчения кристаллитов MoS_2, разрушения ими окисных плёнок металла во впадинах микрорельефа, внедрении частиц порошка и адсорбции их к поверхностному слою активированного металла.

4. Образование слоя покрытия. Этот этап характеризуется уплотнением частиц нанесённого покрытия, измельчением кристаллитов, слипанием их друг с другом, образованием сплошного покрытия.



1 – обрабатываемая поверхность, *2* – среда покрытия (дисульфид молибдена),
3 – неравноосные инденторы

Рисунок 3 – Последовательность формирования твердосмазочного покрытия магнитодинамическим методом

5. Формирование поверхностного слоя покрытия. В результате скольжения частиц рабочей среды (шаров) относительно обрабатываемой поверхности частицы порошка ориентируются базовыми плоскостями параллельно поверхности трения

4 Обсуждение и заключение

Проведенный анализ физических явлений и эффектов процесса формирования твердосмазочных покрытий магнитодинамическим методом и его результаты служат исходной теоретической основой для разработки технологических систем данного процесса и их структуры с учетом его особенностей и сочетания различных материалов основы и покрытий, режимов, конструктивных схем и параметров. Решение данных задач и дальнейшее развитие теоретического описания процесса обоснованно приводит к необходимости разработки и конкретизации физико-математических моделей составляющих исследуемого процесса, которые включают:

– модель магнитовибрирующего слоя, описывающая энергетическое состояние инденторов в зависимости от топологии и характеристик вращающегося электромагнитного поля;

– модель процесса пластической деформации и внедрения среды покрытия в поверхность детали, определяющая величину энергии, накапливаемой в локальных микрообъёмах на границе «покрытие-подложка», модифицированного в процессе ударно-импульсного контактного взаимодействия с поверхностью частиц активирующей среды, среды покрытия, поверхностного слоя;

– модель влияния магнитного поля на процесс нанесения покрытий, устанавливающая степень влияния на изменение величины энергии, накапливаемой в локальных микрообъёмах на границе «покрытие-подложка», модифицированного в процессе нанесения покрытия поверхностного слоя, таких эффектов как тепловой и магнитострикционный;

– энергетическая модель управления процессом нанесения твёрдосмазочного покрытия, определяющая энергетическое состояние локальных микрообъёмов на границе «покрытие – подложка», сформированных в процессе нанесения покрытий магнитодинамическим методом с учетом механических, тепловых и магнитных воздействий, обеспечивающих его реализацию;

– модель адгезионной прочности твердосмазочного покрытия, позволяющая количественно оценить энергию адгезии двух твердых тел, вступающих в адгезионный контакт.

Разработка общей физико-математической модели процесса нанесения твёрдосмазочных покрытий магнитодинамическим методом позволит глубже теоретически изучить данный процесс, определять оптимальные параметры для их экспериментального уточнения. Это особенно важно для разработки технологического обеспечения нанесения твердосмазочных покрытий на трибоповерхности, работающие в условиях сухого трения.

Список литературы

1 Бабичев, А.П. Вибрационные механохимические покрытия [Текст] / А.П. Бабичев, В.В. Иванов. - Саарбрюкен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 119 с.

2 Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев. - Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.

3 Болога, М.К. Магнитоожижение во вращающемся магнитном поле. [Текст] / М.К. Болога, И.Ф. Марта // Магнитная гидродинамика. – 1988. –№ 3. – С. 103-108.

4 Егорова С.И. Магнитовибрационное ожижение. [Текст] / С.И. Егорова - Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2009. – 16 с.

5 Лебедев В.А. Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем [Текст] / В.А. Лебедев, А.А. Ширин, Н.С. Коваль, Ю.М. Вернигоров. // Advanced Engineering Research. – 2022. – Т. 22. –№ 4. – С. 338–345.

6 Лебедев, В.А. Технологическое обеспечение переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитного поля [Текст] / В.А. Лебедев, А.А. Ширин, Н.С. Коваль, Ю.М. Вернигоров. // Воронежский научно-технический Вестник. – 2022. – Т. 2. № 2 (40). – С. 30-37.

7 Лебедев, В.А. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле [Текст] / В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров, А.А. Кочубей. - Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2018. – 135 с.

8 Лебедев, В.А. Энергетические аспекты отделочно-упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля [Текст] / В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров, А.А. Кочубей. // Наукоемкие технологии в машиностроении - Ростов-на-Дону, 2016. – С. 35-42.

9 Логвиненко, Д.Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем [Текст] / Д.Д. Логвиненко, О.П. Щеляков. - Киев.: Техника, 1976. – 143 с.

References

1 Babichev, A.P. Vibration Mechanochemical Coatings [Text] / A.P. Babichev, V.V. Ivanov. - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. - 119 p.

2 Babichev, A.P. Fundamentals of Vibration Technology [Text] / A.P. Babichev. - Rostov-on-Don: DSTU Publishing Center, 2008. - 694 p.

3 Bologa, M.K. Magnetic Fluidization in a Rotating Magnetic Field. [Text] / M.K. Bologa, I.F. Marta // Magnetnaya Hydrodynamics. - 1988. - No. 3. - pp. 103–108.

4 Egorova S.I. Magneto-vibrational liquefaction. [Text] / S.I. Egorova - Rostov-on-Don.: DSTU, 2009. - 16 p.

5 Lebedev V.A. Study of the process of processing conglomerates of grinding slurry in devices with a rotating electromagnetic field [Text] / V.A. Lebedev, A.A. Shirin, N.S. Koval, Yu.M. Vernigorov. // Advanced Engineering Research. - 2022. - Vol. 22. No. 4. - P. 338–345.

6 Lebedev, V.A. Technological Support for the Processing of Slurry Waste from Grinding Production Using an Electromagnetic Field [Text] / V.A. Lebedev, A.A. Shirin, N.S. Koval, Yu.M. Vernigorov. - // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2022. - Vol. 2. No. 2 (40). - P. 30–37.

7 Lebedev, V.A. Strengthening of Long Parts in a Rotating Electromagnetic Field [Text] / V.A. Lebedev, Yu.M. Vernigorov, A.A. Kochubey. - Rostov-on-Don.: DSTU, 2018. - 135 p.

8 Lebedev, V.A. Energy aspects of finishing and hardening treatment of parts under conditions of a rotating electromagnetic field [Text] / V.A. Lebedev, Yu.M. Vernigorov, A.A. Kochubey. // Science-intensive technologies in mechanical engineering - Rostov-on-Don, 2016. - P. 35–42.

9 Logvinenko, D.D. Intensification of technological processes in devices with a vortex layer [Text] / D.D. Logvinenko, O.P. Shchelyakov. - Kyiv.: Tekhnika, 1976. - 143 p.

© Лебедев В. А., Райа Ахмад, 2026