

УДК 621
DOI:10.30987/2223-4608-2020-10-22-28

**В.А. Лебедев, к.т.н., А.А. Кочубей, к.т.н.,
Г.В. Дёмин, аспирант, А.А. Ширин, аспирант**
(Донской государственной технической университет, 340010 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1)
E-mail: va.lebedev@yandex.ru

Технологические возможности обработки деталей в устройствах с вращающимся электромагнитным полем и перспективы их применения

Представлены области использования устройств с вращающимся электромагнитным полем. Показана сущность и физические эффекты, обуславливающие их применение в технологии изготовления деталей машин, нанесения покрытий, а также для переработки отходов металлопроизводства в процессе обработки ферромагнитными инденторами. Приведены результаты экспериментальных исследований, раскрывающие технологические возможности магнитодинамической обработки на отделочно-упрочняющих операциях.

Ключевые слова: вращающееся электромагнитное поле; ферромагнитный индентор; магнитовибрирующий слой; упрочнение; интенсивность обработки; качество поверхностного слоя.

**V.A. Lebedev, Can. Sc. Tech., A.A. Kochubey, Can. Sc. Tech.,
G.V. Dyomin, Post graduate student, A.A. Shirin, Post graduate student**
(Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, 340010)

Technological potentialities of parts machining in devices with rotating electromagnetic field and outlooks in their use

There are presented application fields of devices with the rotating electromagnetic field. The essence and physical effects stipulating for their use in the technology of manufacturing machinery, coating application, and also metal production waste processing during the processing with ferromagnetic indenters are shown. There are shown the results of experimental investigations depicting technological potentialities of magnetic-dynamic processing in finish-strengthening.

Keywords: rotating electromagnetic field; ferromagnetic indenter; magnetic-vibrating layer; strengthening; processing intensity; surface layer quality.

На сегодняшний день круг производственных задач, решаемых с применением магнитного поля, достаточно широк. Рассмотрим некоторые из них, применяемые в технологических процессах изготовления деталей машин. В числе методов, разработанных в отечественной и зарубежной практике, можно выделить следующие методы [1].

1. Методы поверхностной пластической деформации деталей инструментом с наложением переменного магнитного поля высокой напряженности. Эти методы позволяют путём

совмещения в пространстве и во времени двух технологических факторов обеспечивать модификацию структуры фазового состава упрочненного поверхностного слоя и поля напряжений в объеме изделия.

2. Методы обработки с использованием магнитного поля как источника энергии, придающей движение обрабатывающей среде или инструменту. К этим методам относятся: отделочная магнитно-абразивная обработка, представляющая собой процесс абразивной обработки, осуществляемый при относитель-

ном движении изделия и абразивных зерен в магнитном поле; ударная магнитно-импульсная обработка, в которой движение обрабатываемой среде придается энергией импульсного магнитного поля; обработка магнитно-динамическим инструментом, при которой силовое взаимодействие деформирующих шаров с поверхностью детали осуществляется за счет энергии магнитного поля, введенного в зону обработки.

3. Методы воздействия магнитным полем. Различают магнитно-импульсную и магнитную обработку, которые применяют для уп-

рочняющей обработки различных деталей и их соединений.

Энергетические возможности вращающегося электромагнитного поля (ВЭМП) на протяжении многих лет привлекают исследователей для решения технологических задач. Разработанные на его основе устройства, как показано в табл. 1. получили применение для выполнения технологических переделов в различных отраслях производства, обеспечивая при этом их высокую производительность и качество продукции [1, 2].

1. Области применения устройств с вращающимся электромагнитным полем

Отрасль применения	Технологические процессы
Химическо-биологический комплекс	<ul style="list-style-type: none"> – окисление фенола, спиртов в сточных водах; – очистка сточных (в т.ч. гальванических) вод от тяжелых металлов; – получение дисперсий из латекса; – приготовление эмульсий вода-масло и СОЖ; – ликвидация илов из отстойников городов; – обработка дизельного топлива с водой, топливного мазута, в т.ч. обводненного, отработанных масел; – производство масляных и фасадных красок, минеральных пигментов для красок, смазок с твердыми добавками (MoS₂, WS₂ и др.)
Агропромышленный комплекс	<ul style="list-style-type: none"> – производство соков и паст из ягод и овощей при комнатной температуре, комбикормов из местного сырья; этилового спирта из соломы, стеблей кукурузы, подсолнечника и др. – обеззараживание навоза и производство гранул органоминеральных удобрений; – получение высокопитательных кормов из соломы, стеблей кукурузы, подсолнечника и др. с добавкой водяной суспензии ряски; – предпосевная обработка семян; – утилизация отходов от производства подсолнечного и оливкового и др. масел; – экстракция эфирных масел и др. из полевых растений
Строительный комплекс	<ul style="list-style-type: none"> – переработка гудрона в битум, отработанных покрышек в тепло и звукоизолирующую плитку, черепицу, резиновые изолирующие прокладки и т.д.; – производство изоляционных от тепла и звука плиток из песка, опилок, золы и их смесей, водонепроницаемого песка для гидроизоляции (гидрофобных материалов), газобетона
Нефтегазовый комплекс	<ul style="list-style-type: none"> – разжижение нефти и мазута для перевозки при низких температурах; – нейтрализация пластовых вод при добыче нефти или газа; извлечение из них ценных компонентов; – активация нефти перед крекингом;
Горнодобывающий комплекс	<ul style="list-style-type: none"> – переработка отвалов фосфоргипса и его смесей, отвалов с целью извлечения ценных примесей (золота, меди, вольфрама, никеля и др.); – выработка ценных компонентов из месторождений с малыми запасами (W, Mo, Au и др.); – подготовка глинистых растворов для бурения

Высокая эффективность устройств с вращающимся электромагнитным полем обусловлена способностью их формировать магнитовибрирующий слой (МВС), обеспечивающий комплексное активационное воздействие на объект обработки или переработки

физических эффектов и, как следствие, высокую интенсивность движения частиц дисперсной среды [2, 3]. В качестве основных управляющих характеристик МВС, определяющих технологический эффект устройств с ВЭМП, выделяют следующие [4]:

– первой характеристикой МВС является индукция начала магнитовибрирования или градиент индукции переменного поля. Дисперсная система переходит в магнитовибрирующее состояние при индукции переменного магнитного поля выше некоторого критического, зависящего от размера частиц, их магнитного момента, частоты поля, индукции постоянного поля и др.;

– второй характеристикой служит средняя скорость поступательного движения частиц в состоянии развитого магнитовибрирования, зависящая от режимных и физических параметров системы, от свойств ферромагнитного материала, топологии поля;

– третьей характеристикой МВС является удельная мощность, затрачиваемая на магнитовибрирование единицы массы дисперсной системы;

– четвёртой, характеристикой рассматриваемого способа магнитовибрирования выступает порозность среды. Порозность в реальной системе является сложной функцией индукции постоянной и переменной составляющей поля, градиента индукции, частоты переменного поля, числа Рейнольдса, а также отношения объемов слоя и твердой фазы;

– пятой характеристикой МВС может быть его эквивалентная температура – квазitemпература, зависящая для данной дисперсной системы от соотношения индукций постоянной и переменной составляющих магнитного

поля, а также частоты поля. Квазitemпература определяет параметры перехода из состояния «квазижидкость» в состояние «квазитвердое тело».

Универсальность предложенных характеристик магнитовибрационного слоя заключается в том, что они связаны с такими физическими величинами, как индукция постоянного и переменного магнитного поля.

Исследования, проведенные в НИИ «Вибротехнология» ДГТУ показали, что введение в рабочую зону устройств с ВЭМП неравновесных ферромагнитных инденторов (рис. 1) позволяет расширить их технологические возможности и эффективно применять в технологии изготовления деталей машин [1, 3, 5, 6].

На рис. 2 представлено, изготовленное на основе трехфазного асинхронного электродвигателя, опытно экспериментальное устройство с ВЭМП, потребляемая мощность которого составляет 225 Квт.

Экспериментальные исследования позволили обосновать критическое значение индукции равное 0,08 Т, при котором формируется МВС, характеризующийся хаотичным движением частиц в рабочей зоне под воздействием вращающегося электромагнитного поля и приводящий к большому количеству столкновений между частицами, частиц с обрабатываемыми изделиями, сопровождающихся как прямыми, так и скользящим ударами (рис. 3). Число таких соударений достигает на каждую частицу $10^3 \dots 10^4$ в секунду.



Рис. 1. Обрабатываемая среда – стальные цилиндры из материала:
а – ШХ15 ГОСТ 801-78; *б* – 50ХФА ГОСТ 14959-79

В процессе ударно-импульсного контактного взаимодействия происходит локальная пластическая деформация поверхности изделий, находящихся в рабочей зоне устройства.

Именно этот эффект предопределил перспективность применения устройства с ВЭМП для отделочного упрочнения поверхностного слоя деталей и создания на их основе магнитодинамического метода обработки [1]. Сле-

дует отметить, что предложенный метод в силу компактности устройств и высоких энергосиловых возможностей позволил решить проблему, связанную с упрочнением длинномерных деталей летательных аппаратов таких как тонкостенные трубы, стрингеры, пояса (рис. 4), а также деталей, имеющих внутренние полости (например, ланжерон и др.).



Рис. 2. Устройство с вращающимся электромагнитным полем



Рис. 3. Характер движения ферромагнитных частиц во вращающемся электромагнитном поле

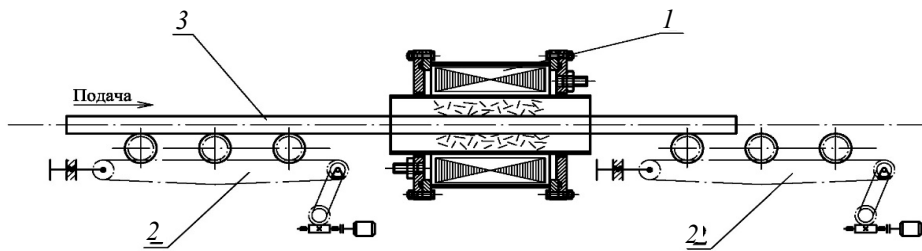


Рис. 4. Схема обработки длинномерных деталей:

1 – рабочий блок устройства с ВЭМП; 2 – приводной роликовый рольганг; 3 – деталь

Представленная на рис. 4 технологическая система проходного типа магнитодинамического упрочнения длинномерных деталей позволяет, по сравнению с существующими на практике дробеструйными установками, снизить материалоемкость и энергоёмкость оборудования до 8 раз, повысить производительность процесса упрочнения деталей до 30 % за счёт перекрытия вспомогательного времени на их установку и получить требуемое качество поверхности

На интенсивность покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками P и, как следствие, производительность процесса, главным образом влияет количество инденторов, загружаемых в рабочую зону устройства, их размеры и индукция электромаг-

нитного поля B . Как показали исследования (рис. 5), превышение количества радиально расположенных кольцевых слоёв, соизмеримых с длиной индентора l , больше трех приводит к снижению интенсивности процесса.

Оптимальная величина соотношения геометрических размеров ферромагнитных инденторов (отношение длины к диаметру l/d), при котором достигается наилучший эффект обработки, находится на уровне $l/d = 10$ (рис. 7).

Установлено, что с увеличением индукции электромагнитного поля свыше критической, ниже которой, как отмечено выше, обрабатываемая среда находится в «твёрдой» фазе, приводит к повышению интенсивности процесса (рис. 6).

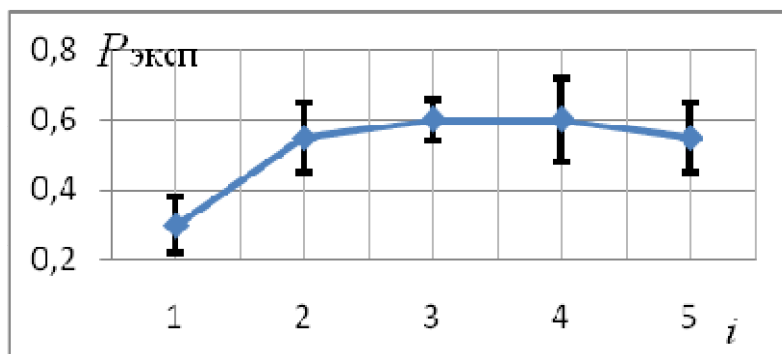


Рис. 5. Зависимость изменения степени покрытия локального участка поверхности пластическими отпечатками P от количества слоёв загрузки инденторов i с величиной соотношения $l/d = 10$, при $B = 0,1$ Тл; $t = 10$ с

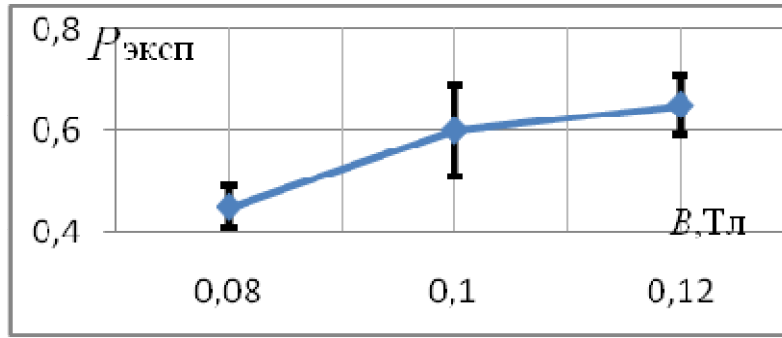


Рис. 6. Зависимость изменения степени локального участка поверхности пластическими отпечатками P от индукции магнитного поля B при $i = 3$; $l/d = 10$; $t = 10$ с

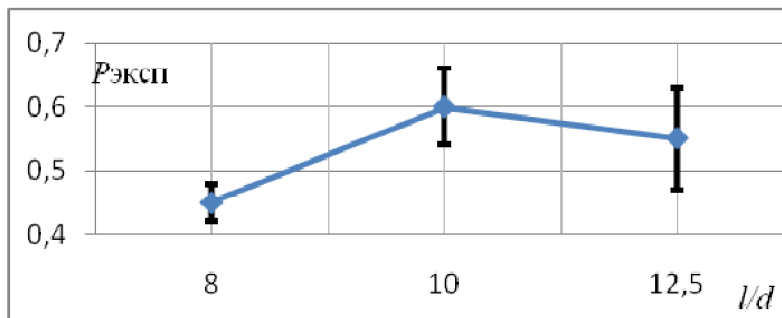


Рис. 7. Зависимость изменения степени покрытия локального участка поверхности пластическими отпечатками P от соотношения размеров ферромагнитных инденторов l/d при $i = 3$; $B = 0,1$ Тл; $t = 10$ с

Результаты исследований влияния магнитодинамической обработки на параметры качества поверхностного слоя, модифицированного в процессе упрочнения, показали, что с увеличением продолжительности обработки высота профиля микронеровностей уменьшается до достижения определённой величины, соответствующей согласно работе [5], величине установившейся шероховатости (рис. 8).

Микротвёрдость, глубина упрочнённого слоя, величина остаточных напряжений первого рода (рис. 9) возрастают с увеличением времени обработки до определенной предельной величины [4, 5], обусловленной механическими характеристиками обрабатываемого материала. Дальнейшая обработка приводит к их снижению в результате перенаклёпа, вызывающего разрушение поверхностного слоя.

Рассмотрим ещё один из существенных физических эффектов, позволяющих расширить технологические возможности устройств с вращающимся электромагнитным полем. Каждый индентор во вращающемся магнитном поле является ярко выраженным магнитом [4]. При вращении происходит смена полярности на полюсах индентора, т.е. он перемагничивается. При этом возникает явление магнитострикции. Механизм воздействия магни-

тострикции на вещество заключается в следующем: любая частица или молекула любого вещества, находясь в соприкосновении с индентором в момент перемагничивания, испытывает мощный удар (импульс).

Магнитострикционные явления стимулируются не столько непосредственным воздействием внешнего переменного магнитного поля на материал индентора, сколько взаимодействием вторичных полей самих инденторов, частота которых в значительной степени превосходит частоту базового поля. В результате по окружающей среде наносится удар с силой около $15...20$ т/мм², действующий, однако, на очень малом расстоянии. Таким образом, при своём движении индентор как бы непрерывно излучает силовые импульсы, выдержать которые при непосредственном контакте не могут земные материалы.

В работе [4] отмечается, что при достижении технического магнитного насыщения в рабочей зоне устройства с вращающимся электромагнитным полем измельчаются кварцевый песок, карбиды, окислы и др. Если техническое магнитное насыщение не достигнуто, то имеет место практически только перемешивание. Использование этого физического эффекта позволяет рассматривать устройства

с вращающимся электромагнитным полем в качестве эффективного технического средства, во-первых, для нанесения на поверхности твёрдо смазочных антифрикционных покрытий, обеспечивающих повышение износостойкости поверхностей высокоресурсных де-

талей, а во-вторых, для измельчения и переработки шламовых металлоотходов с целью получения высококачественного сырья для изготовления изделий, являющихся объектом литейного производства и порошковой металлургии.

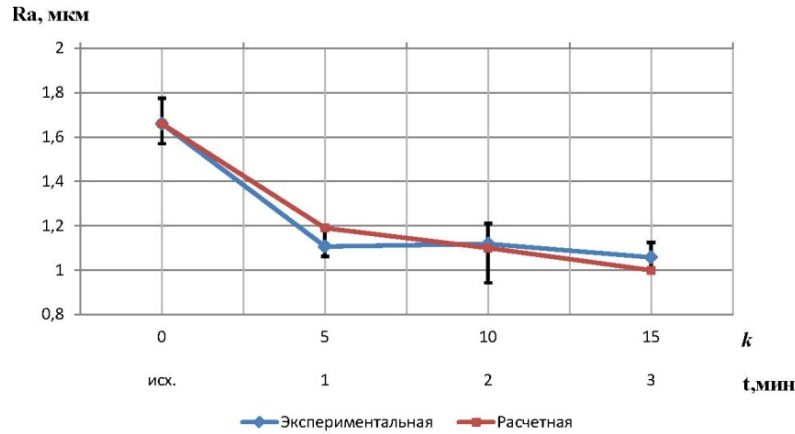


Рис. 8. Изменение шероховатости поверхности в зависимости от кратности сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками k и продолжительности обработки в устройствах с вращающимся электромагнитным полем

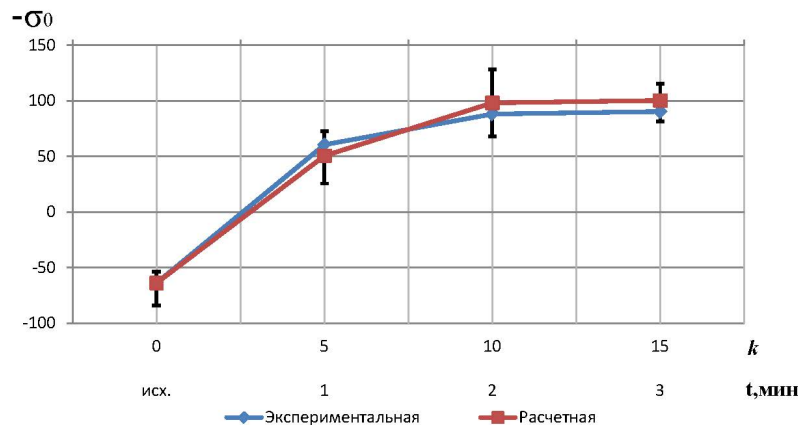


Рис. 9. Изменение остаточных напряжений в зависимости от кратности сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками k и продолжительности обработки в устройствах с вращающимся электромагнитным полем

Следует особо подчеркнуть, что для получения из отходов шлифовального производства сырья, которое будет использоваться в порошковой металлургии, существующий технологический процесс их переработки предусматривает выполнение ряда последовательных этапов: отделение СОЖ, сушка, измельчение и разделение. Применение устройства с ВЭМП позволяет сократить эту технологическую цепочку, объединив выполнение этапов измельчения и разделения магнитной и немагнитной компонент шлама в один, бес-

печивая при этом сырьё более высокого качества. Характерная особенность шлифовального шлама – повышенная способность стружкообразных частиц к образованию микроагрегатов за счет сил механического и магнитоэлектростатического взаимодействий, внутри которых заключены частицы немагнитной фракции. При соответствующем подборе параметров – амплитуды и градиента магнитной индукции, частоты электромагнитного поля и времени процесса, можно реализовать режимы при которых в устройствах с ВЭМП будет происхо-

дить наиболее интенсивное разрушение агрегатов и обеспечено получение сырья с требуемыми гранулометрическими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кочубей, А.А.** Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле / А.А. Кочубей, В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров и др. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – 135 с.
2. **Логвиненко, Д.Д., Щеляков, О.П.** Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. – Киев: Техника, 1976. – 143 с.
3. **Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Кочубей А.А.** Энергетические аспекты отделочно-упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. – 2016. – №6(60). – С. 35-42.
4. **Вернигоров, Ю.М., Лелетко, К.К., Фролова, Н.Н.** Моделирование разрушения частиц ферромагнитных материалов в магнитовибрирующем слое // В сборнике: *World Science Proceedings of articles the international scientific conference*. – 2017. – С. 59-70.
5. **Кочубей, А.А.** Эффективность применения вращающегося электромагнитного поля для отделочно-упрочняющей обработки деталей летательных аппаратов / А. А. Кочубей, В. А. Лебедев // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: сб. трудов XVI всероссийской науч.-техн. конф.* – Пермь, 2015. – С. 175–178.
6. **Lebedev V.A., Kochubey A.A., Kiricheck A.V.** The use of the rotating electromagnetic field for hardening treatment of details / IOP conference series: materials science and engineering 10. Ser. «International Conference on Mechanical

Engineering, Automation and Control Systems 2016» Institute of Physics Publishing, – 2017.

REFERENCES

1. Kochubey, A.A. *Long-length Parts Strengthening in Rotating Electromagnetic Field* / A.A. Kochubey, V.A. Lebedev, Yu.M. Vernigorov et al. – Rostov-upon-Don: DSTU, 2018. – pp. 135.
2. Logvinenko, D.D., Shchelyakov, O.P. *Engineering Procedure Intensification in Devices with Vortex Layer*. – Kiev: Engineering, 1976. – pp. 143.
3. Lebedev, V.A., Vernigorov, Yu.M., Kochubey, A.A. Power aspects of parts finish-strengthening under conditions of rotating electromagnetic field // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.6(60). – pp. 35-42.
4. Vernigorov, Yu.M., Leletko, K.K., Frolova, N.N. Modeling of ferromagnetic parts destruction in magneto-vibrating layer // In collection: *World Science Proceedings of the Inter. Scientific Conf.* – 2017. – pp. 59-70.
5. Kochubey, A.A. Effectiveness in rotating electromagnetic field use for aircraft parts finish-strengthening / A.A. Kochubey, V.A. Lebedev // *Aerospace Engineering, High Technologies and Innovations: Proceedings of the XVI-th All-Russian Scientif.-Tech. Conf.* – Perm, 2015. – pp. 175-178.
6. Lebedev V.A., Kochubey A.A., Kiricheck A.V. The use of the rotating electromagnetic field for hardening treatment of details / IOP conference series: materials science and engineering 10. Ser. «International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016» Institute of Physics Publishing, – 2017.

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев

