

Саяпина П. О., Крупский Р. Ф., Черный С. П., Савельев Д. О.
P. O. Sayarina, R. F. Krupsky, S. P. Cherniy, D. O. Savelyev

АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC ACCELERATOR RESEARCH PROBLEM

Саяпина Полина Олеговна – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Polina O. Sayarina – Postgraduate, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Крупский Роман Фаддеевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник – руководитель научно-производственного инжинирингового центра Филиала ПАО «ОАК» – КнААЗ имени Ю. А. Гагарина (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: roman_krupskiy@rambler.ru.

Roman F. Krupsky – PhD in Engineering, Chief Researcher – Head of the Scientific and Production Engineering Center of the Branch of PJSC «UAC» – KnAAZ named after Yu. A. Gagarin (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: roman_krupskiy@rambler.ru.

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Sergey P. Cherniy – PhD in in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Савельев Дмитрий Олегович – старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», руководитель Центра робототехники Ресурсного центра Технопарка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Dmitriy O. Savelyev – Senior Lecturer, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Head of the Center for Robotics of the Resource Center of the Technopark, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Аннотация. Показана актуальность исследования электромагнитного ускорителя ферромагнитных частиц для дробемётных (дробеструйных) аппаратов. Рассмотрены устройства ускорения сыпучих ферромагнитных сред, и выявлено, что наиболее перспективными являются устройства, принцип действия которых основывается на взаимодействии магнитного момента ферромагнитных частиц с импульсным магнитным полем. Приведена методика расчёта движения ферромагнитных сред в магнитном поле. Описан порядок выбора выходных параметров, и показаны этапы научно-исследовательской работы. Приводятся описание структурной схемы и назначение основных блоков и модулей.

Summary. The relevance of the study of the electromagnetic accelerator of ferromagnetic particles for shot blasting (shot blasting) devices is shown. Devices for accelerating bulk ferromagnetic environment are considered and it is revealed that the most promising devices are those whose principle of operation is based on the interaction of the magnetic moment of ferromagnetic particles with a pulsed magnetic field. A method for calculating the motion of ferromagnetic media in a magnetic field is presented. The procedure for selecting output parameters is described and the stages of research work are shown. A description of the block diagram and the purpose of the main blocks and modules is given.

Ключевые слова: электромагнитный ускоритель, магнитное поле, ферромагнитная среда.

Key words: electromagnetic accelerator, magnetic field, ferromagnetic medium.

УДК 681.5

Введение. В литейном и формообразующем производстве широко применяется обработка поверхностей изделий, полученных после изготовления, ферромагнитной дробью или абразивом. Такие технологические процессы осуществляются с помощью устройств (дробемётных или дробеструйных аппаратов), в которых происходит ускорение частиц ферромагнитного материала за счёт использования энергии движущихся газов, жидкостей или механической энергии различных тел вращения. Однако такие устройства не удовлетворяют современным требованиям с точки зрения надёжности, экономичности и экологии.

Главный недостаток этих устройств – быстрый износ рабочих поверхностей аппаратов, по которым дробь или абразив скользят под действием центробежной силы, ввиду большого трения частиц ферромагнитного материала о поверхность. Для работы аппаратов требуются большие затраты энергии.

На поверхность обрабатываемых изделий из аппаратов выбрасывается расходящийся поток (факел) частиц. Для эффективной обработки импульс силы, передаваемый частицами ферромагнитного материала поверхности обрабатываемого изделия, должен иметь достаточно большую величину. Поскольку он равен произведению массы отдельной частицы на скорость, то для получения необходимого импульса силы при малой массе частиц последние разгоняются в таких устройствах до высоких скоростей порядка 60-80 м/с.

Широкий факел разгоняемых частиц резко снижает эффективность использования аппаратов при обработке малогабаритных изделий. Кроме того, при эксплуатации таких устройств создаются неблагоприятные санитарно-гигиенические условия на рабочих местах. Ограничена возможность автоматизации работы аппаратов.

Одним из общепризнанных направлений в разработке устройств, отвечающих запросам современных технологий, является непосредственное использование электромагнитных сил для ускорения сыпучих ферромагнитных материалов, представляющих собой сыпучую ферромагнитную среду. О перспективности этого направления свидетельствует широкое практическое применение взаимодействия магнитного поля с сыпучей ферромагнитной средой в электромагнитных методах сепарации и магнитно-абразивной обработки. Однако в разработке устройств электромагнитного ускорения сыпучих ферромагнитных материалов до сих пор наблюдается заметное отставание. Несмотря на многочисленные авторские свидетельства и патенты в этой области, промышленных аппаратов не создано.

Для решения задач по зачистке и/или формообразованию дробью необходимо задать дроби первоначальную кинетическую энергию при помощи ускорения. Задача ускорения дроби необходима как для зачистки металлической заготовки, так и для формообразования. Принцип ускорения заключается в придании изначально статичному телу дроби некоторой кинетической энергии.

Для придания ускорения необходимо задать импульс. Физически придание какого-либо ускорения телу передаётся при помощи воздействия – механического или электрического импульса. Как для любого вектора, для импульса важна не только величина, но и направление.

Физическими способами ускорения дроби могут быть:

- ускорение дроби при ударе о механические лопатки. Разгон дроби при помощи лопаток осуществляется в дробемётной установке. Основным рабочим механизмом дробемётной установки является дробемётная турбина. Она конструктивно состоит из двигателя, на котором закреплено рабочее колесо с лопатками, помещённое в стальной экранирующий короб. Специальный профиль лопаток позволяет за счёт вращения рабочего колеса с очень большой скоростью (1500-7500 об/мин) создавать центробежную силу, обеспечивающую разгон дроби до 90 м/с. Лопатки дробемётной турбины выполняются из износостойкого высокохромистого чугуна. Скорость вращения лопаток регулируется для подбора оптимального режима подачи дроби;

- ускорение дроби при помощи сжатого воздуха. Устройство дробеструйной установки подразумевает наличие специальной камеры со сжатым воздухом, в которой абразивные частицы набирают ускорение. При запуске аппарата дробь попадает под струю сжатого воздуха, который

сообщает дроби большую кинетическую энергию – это приводит к серьёзному разгону. Под действием струи сжатого воздуха дробь на большой скорости вылетает из распылителя и ударяется о поверхность металла. Если на поверхности металлического объекта есть какие-либо посторонние частицы (грязь, пыль, мусор, ржавчина, окалина и т. д.), то дробь сообщает таким частицам большое количество кинетической энергии. Это приводит к тому, что из-за избытка кинетической энергии посторонние частицы слетают с поверхности, что приводит к очистке металла. Под давлением абразивной струи удаляется весь старый слой с поверхности заготовки;

- ускорение дроби при помощи электрических и/или электромагнитных ускорителей.

У каждого способа имеются недостатки и функциональные ограничения. К примеру, при ускорении дроби при помощи удара о лопатки рабочего колеса не вся дробь прилетает в область зачистки. Есть вероятность навредить сотруднику, работающему в непосредственной близости к данной установке.

Что касается очистки и/или обработки заготовок с ускорением дроби при помощи сжатого воздуха, то данные аппараты могут быть применимы на локальных участках производства, т. к. площадь обработки мала. При обработке мелких металлических деталей есть риск их повреждения из-за высокого давления. Толщина обрабатываемой металлоконструкции не должна быть менее 3 мм, в противном случае рельеф покрытия на металле после такой очистки может быть неровным, внешне напоминая лимонную корку. Нежелательно для обработки использовать детали в масле, т. к. это негативно скажется на конечном результате.

Из совокупности вышеуказанных способов придания ускорения дроби наиболее интересным для производства является вариант ускорения дроби при помощи электромагнитного импульса. Поскольку в большинстве случаев дробь для рассматриваемых задач (зачистки/формообразования) ферромагнитная, то импульс можно создавать при помощи нескольких индукторов (индукционных катушек). Полученным электромагнитным импульсом можно управлять, регулируя входные электрические характеристики, такие как ток и напряжение.

Практическая разработка устройств электромагнитного ускорения сыпучей ферромагнитной среды сильно сдерживается отсутствием надёжных методов определения электромагнитных характеристик таких устройств.

На начальном этапе решения задачи разработки инженерных методов расчёта электромагнитных характеристик устройств необходимо в первую очередь сделать правильный выбор физической модели, в которой возможно наиболее эффективное использование энергии взаимодействия частиц ферромагнитного материала с магнитным полем. Поэтому представляет интерес оценка уже известных идей создания устройств ускорения сыпучей ферромагнитной среды с целью выделения устройств с таким принципом действия, имеющих такие конструктивные особенности, которые позволяют свести к минимуму недостатки механических аналогов.

Устройства с магнитным удержанием частиц на поверхности вращающегося ротора механического дробёмётного аппарата. В этих устройствах за счёт силового воздействия магнитного поля ферромагнитные частицы удерживаются на поверхности вращающегося ротора. Поскольку в предлагаемых устройствах отсутствует скольжение частиц по поверхности вращающегося ротора под действием центробежной силы, следует ожидать, что в них износ поверхности будет существенно меньше, чем в механических аналогах. Однако некоторые существенные недостатки, свойственные механическим аналогам, остаются непреодоленными. По-прежнему требуются большие затраты электроэнергии для получения высоких частот вращения ротора, сообщаемого ферромагнитным частицам необходимую выходную скорость, и поэтому коэффициент полезного действия рассматриваемых устройств не может быть выше, чем у механических аналогов. Таким же широким остаётся и факел разгоняемых частиц.

Предлагаются конструкции устройств для ускорения сыпучей ферромагнитной среды, работа которых основана на принципе действия асинхронных двигателей или с вращающимся/бегущим магнитным полем. Достоинством этих устройств является то, что, в отличие от устройств с магнитным удержанием ферромагнитных частиц, в них может происходить прямое преобразование электроэнергии в кинетическую энергию ферромагнитных частиц. Однако прак-

тически применить предлагаемые устройства для ускорения сыпучей ферромагнитной среды достаточно сложно.

Сыпучая ферромагнитная среда в устройствах, в которых предлагается использовать принцип действия классических асинхронных двигателей с вращающимся магнитным полем, должна двигаться по спиралевидной направляющей трубе из немагнитного и непроводящего материала. В этом случае траектория движения частиц из ферромагнитного материала представляет собой вращательно-поступательное перемещение. На частицы будут действовать центробежные силы, прижимающие их к стенкам трубы. Поэтому будет происходить быстрый износ направляющей трубы из-за сильного трения частиц о стенки трубы, как и при механическом способе разгона сыпучей ферромагнитной среды.

Трение частиц ферромагнетика о стенки направляющей трубы станет существенно меньше, если перемещение частиц будет происходить по прямой направляющей трубе разгона. Такой отличительной конструктивной особенностью обладают предлагаемые в авторских свидетельствах и патентах устройства, работа которых основана на использовании принципа действия линейных асинхронных двигателей. Тем не менее практическое применение таких устройств для ускорения сыпучей ферромагнитной среды может также натолкнуться на определённые трудности, обусловленные свойствами токопроводящих ферромагнитных частиц, из которых состоит сыпучая ферромагнитная среда. Поскольку они обладают большим электрическим сопротивлением, индукционные токи в них не могут достигать значительных величин. Электромагнитные силы, действующие на частицы и обусловленные взаимодействием бегущего магнитного поля с индукционными токами, также не могут быть большими. Поэтому движение сыпучей ферромагнитной среды по направляющей трубе будет происходить существенно асинхронно с магнитным полем и для сообщения частицам необходимой высокой скорости потребуется труба с длиной, во много раз превосходящей расстояние, определяемое заданной скоростью бегущего магнитного поля. Следовательно, массогабаритные размеры рассматриваемых устройств должны быть достаточно солидными.

Скорость бегущего магнитного поля можно увеличить, а длину направляющей трубы, соответственно, уменьшить, если повысить частоту тока, питающего катушки индуктора, которые создают магнитное поле. Однако это повлечёт за собой применение достаточно громоздких мощных преобразователей частоты и в конечном итоге не позволит решить проблему существенного уменьшения массогабаритных размеров предлагаемых устройств ускорения сыпучей ферромагнитной среды.

Другим существенным недостатком этих устройств является разогрев частиц токопроводящего ферромагнетика наводимыми в них индукционными вихревыми токами. Это обстоятельство требует создания системы дополнительного охлаждения устройств.

Перечисленные недостатки устройств, работа которых основана на принципе действия асинхронных двигателей, указывают на то, что эти устройства не могут обладать значительными преимуществами перед механическими аналогами и, следовательно, практическое применение их для ускорения сыпучей ферромагнитной среды вряд ли целесообразно.

В предлагаемых устройствах порция сыпучего ферромагнитного материала разгоняется по прямой направляющей трубе из немагнитного и непроводящего материала под действием импульсного магнитного поля. Это поле создаётся идеальными катушками (индуктором), надетыми последовательно друг за другом на трубу. В катушки попеременно подаются импульсы постоянного тока. В промежутках между импульсами порция ферромагнетика движется по инерции. Регулируя амплитуду, длительность и время следования импульсов, можно добиться такого режима работы устройств, при котором порция сыпучей ферромагнитной среды приобретает ускорение в прямой направляющей трубе.

Питание индуктивных катушек импульсами постоянного тока позволяет создать магнитные поля очень высокой интенсивности и, соответственно, большую электромагнитную силу для ускорения сыпучей ферромагнитной среды в течение достаточно короткого интервала времени. Это

открывает возможность получения высокой скорости вылета порции ферромагнетика из направляющей трубы с длиной много меньшей, чем в ранее рассмотренных устройствах.

Качественная оценка предлагаемых идей создания устройств ускорения сыпучей ферромагнитной среды позволяет сделать заключение, что взаимодействие частиц ферромагнитного материала с магнитным полем можно наиболее эффективно использовать в устройствах, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитного момента ферромагнитных частиц с импульсным магнитным полем. Поэтому неслучайно последние стали объектом пристального внимания исследователей. Исследования процессов, происходящих в устройствах по ускорению сыпучей ферромагнитной среды в импульсном магнитном поле, показали перспективность применения таких устройств в качестве электромагнитных формовочных устройств. Это объясняется рядом важных преимуществ их по сравнению с механическими аналогами.

В конструкции устройств нет движущихся механических частей. Поэтому такие устройства работают с низким уровнем шума. Так как ферромагнитные частицы двигаются в прямой направляющей трубе по прямолинейной траектории, значительно уменьшается трение частиц о поверхность скольжения. Становится возможным существенно снизить выходную скорость частиц при использовании устройств для обработки поверхностей изделий. Теперь импульс силы, передаваемый поверхности, равен произведению массы порции частиц на скорость вылета порции из трубы, в отличие от импульса в механических аналогах, где он равен произведению массы отдельной частицы на скорость. Следовательно, необходимый для обработки поверхности, в соответствии с технологическими требованиями, импульс силы можно создать при значительно меньшей скорости частиц. Это позволяет существенно сократить затраты электроэнергии на процесс ускорения.

Указанные устройства (независимо от условий их применения в различных технологических процессах) имеют характерный общий конструктивный признак, а именно: наличие прямой направляющей трубы из непроводящего и немагнитного материала, по которой разгоняется порция ферромагнитных частиц и на которую надеты соленоидальные катушки (индуктор), питаемые импульсами постоянного тока. Такая конструкция устройств ускорения сыпучей ферромагнитной среды импульсным магнитным полем может быть выбрана в качестве обобщённой физической модели устройства.

Заключение. Рассмотрение большого количества устройств ускорения сыпучих ферромагнитных сред показало, что наиболее перспективными являются устройства, принцип действия которых основывается на взаимодействии магнитного момента ферромагнитных частиц с импульсным магнитным полем. В таких устройствах предполагается наличие прямой направляющей трубы из непроводящего и немагнитного материала, по которой разгоняется порция сыпучей ферромагнитной среды под воздействием магнитного поля соленоидальных катушек, питаемых импульсами постоянного тока. Большое значение при расчёте указанных устройств приобретает разработка методов расчёта взаимодействия ферромагнитных частиц между собой и распределения электромагнитных сил по объёму порции. Это связано с тем, что условием физической работоспособности устройства является порционное движение сыпучей ферромагнитной среды по направляющей трубе, т. е. движение сплошного ферромагнитного тела. Поэтому в любой рассматриваемый интервал времени требуется производить оценку распределения электромагнитных сил по всему факелу дроби и рассчитывать силы взаимодействия между отдельными частями порции, а также проверки возможности движения порции без расслоения её на отдельные части.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашков, А. Е. Математическое моделирование процесса формирования факела дроби в дробемётном аппарате контактного типа / А. Е. Пашков, В. В. Герасимов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 12 (59). – С. 48-52.
2. Патент № 125505 U1 Российская Федерация, МПК В24С 3/06. Дробемётное устройство: № 2012136404/02: заявлено 24.08.2012: опубликовано 10.03.2013 / Пашков А. Е., Герасимов В. В., Гришаев П. Г., Пашков А. А.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет»

(ФГБОУ ВПО «ИрГТУ»), Открытое акционерное общество «Научно-производственная корпорация "Иркут"» (ОАО «Корпорация "Иркут"»). – Бюл. 14.

3. Патент № 2626254 С Российская Федерация, МПК В24С 5/08. Электромагнитный дробемётный аппарат: № 2015145802: заявлено 23.10.2015: опубликовано 25.07.2017 / Башкиров Н. И. – 16 с.

4. Трофимова, Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 11-е изд., стер. – М.: Академия, 2006. – 560 с.

5. Электромеханическая система для формования алюминиевых изделий транспортных объектов / П. О. Саяпина, М. Б. Колесник, Р. Ф. Крупский, К. К. Ким // Проблемы безопасности и эффективности технических систем: сборник докладов конференции с международным участием, посвящённой 95-летию со дня рождения А. В. Плакса, Санкт-Петербург, 11-12 мая 2023 года. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. – С. 97-99.

6. Automated method based on a neural network model for searching energy-efficient complex movement trajectories of industrial robot in a differentiated technological process / M. A. Gorkavyu, A. I. Gorkavyu, V. P. Egorova, M. A. Melnichenko // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – DOI 10.3389/fenrg.2023.1129311.

7. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров / С. П. Черный, Д. О. Савельев, Н. Р. Сбитнев, П. О. Саяпина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 4-10.

8. Горькавый, М. А. Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66. – № 2. – С. 85-95.

9. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, А. С. Гудим [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2 (52). – С. 97-104.