
УДК 621.9.044

М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович

РОЛЬ ИНВЕРСИОННОСТИ СПОСОБОВ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ СОЗДАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГЕНЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

UDC 621.9.044

M. P. Kulgeiko, G. V. Petrishin, N. M. Simanovich

ROLE OF INVERSIONALITY OF MAGNETOELECTRIC MACHINING METHODS IN THE CREATION OF TECHNOLOGICAL COMPLEXES OF SURFACE GENERATION

Аннотация

В работе проанализированы два наиболее важных направления технологии магнитно-электрической обработки: магнитно-электрическое упрочнение и магнитно-абразивная обработка. Показана взаимосвязь этих направлений, основанная на принципе инверсии. Приведен обзор наиболее значимых технологических факторов технологии магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки, показаны области их применения. Определены перспективные направления исследований технологии магнитно-электрической обработки, направленные на совмещении технологий, обеспечивающих создание на поверхности обрабатываемой детали комплекса свойств.

Ключевые слова:

поверхность, магнитно-абразивная обработка, магнитно-электрическое упрочнение, инверсионность процессов, совмещенные технологии.

Abstract

This article analyzes the two most important areas of the technology of magnetoelectric machining, namely magnetoelectric hardening and magnetic abrasive machining. The interrelation of these areas based on the principle of inversion is shown. An overview of the most significant technological factors of magnetoelectric hardening and magnetic abrasive machining is given, and the areas of their application are shown. The perspective directions of the research into the technology of magnetoelectric machining have been determined which are aimed at combining the technologies ensuring the obtaining of a complex of properties on the surface of a workpiece.

Keywords:

surface, magnetic abrasive machining, magnetoelectric hardening, inversionality of processes, combined technologies.

Введение

Важнейшим фактором научно-технического, экономического и социального прогресса на современном этапе развития общества стало качество продукции. Высокий технический уровень и качество изготовления продукции являются не только одной из основных целей производства, но и его средством, одним из самых мощных инструментов. Без коренного повышения качества продукции

невозможно обеспечить ускоренное развитие всех отраслей народного хозяйства страны. Качество продукции является главным условием ее конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках, необходимым требованием выхода на мировой уровень.

Ведущая роль в интенсификации всех отраслей промышленного производства принадлежит машиностроению. Обеспечение высокого качества продукции, повышение производительности

труда и эффективности общественного производства, повышение конкурентоспособности производимой продукции является одной из важнейших задач современного машиностроения.

Стремление поддерживать конкурентоспособность продукции машиностроения приводит к непрерывному усложнению технических средств, повышению мощности и производительности, силовых и скоростных параметров машин. Современные тенденции развития машиностроения направлены на повышение требований к улучшению технических характеристик машин. Это требует обеспечения их функциональных характеристик, важнейшими из которых являются точность, надежность, долговечность и экономичность.

Постановка задачи

В решении задач, стоящих перед машиностроением, большое внимание отводится проблеме обеспечения надежности и долговечности деталей машин. А так как большинство деталей машин отказывает не из-за поломок, а в результате износа и разрушения поверхностей, то актуальной является проблема создания эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей. Таким образом, задача состоит в создании гетерогенного поверхностного материала, обладающего дифференцированными свойствами по отношению к объемно-прочностным свойствам детали.

Инженерия поверхности, модификация ее эксплуатационных свойств непосредственно связаны с развитием современной технологии машиностроения. Основная роль в создании поверхности принадлежит окончательным (отделочным) финишным технологиям обработки материалов. До настоящего времени вопросы поверхностных явлений во многом решаются эмпирически, т. е. при создании и изучении поверхности применяется «прикладной», феноменологический подход, преимущественно

с технологической точки зрения. В результате поверхность, как особое состояние материала, применительно к области машиностроения образуется, в том числе, вследствие энергетического воздействия технологическими методами.

В современном машиностроении прикладная инженерия поверхности обладает большим разнообразием технологических методов генерации поверхностного слоя. Отличаются известные методы способом энергетического воздействия, определяющего физико-механические и электрохимические явления, лежащие в основе обеспечения гетерогенности материала поверхностного слоя относительно объема детали. И, как следствие, они, соответственно, отличаются результатами этого воздействия, т. е. достигаемыми геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами поверхности. При всей сложной совокупности явлений, происходящих в поверхностном слое, каждый из методов характеризуется своим доминирующим процессом, определяющим изменение состояния поверхности и модификацию ее свойств. Это может быть изменение химического состава и структуры поверхностного слоя, шероховатости поверхности, образование нового слоя в виде пленки или покрытия и т. п. Выбор конкретного метода повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя определяется технологическими, экономическими, экологическими и другими факторами.

В зависимости от результата энергетического воздействия с технологической точки зрения среди известных методов можно выделить следующие направления генерации поверхности.

1. Образование поверхности путем удаления материала и формирование заданной микрогеометрии. Включает финишные методы механической и физико-технической обработки.

2. Формирование заданной микрогеометрии и структуры поверхностного слоя без удаления материала, практи-

чески не изменяя исходную точность размеров. Это, в основном, методы обработки поверхностно-пластическим деформированием.

3. Создание поверхностного слоя определенного химического состава и структуры, практически не изменяя микро- и макрогеометрии поверхности и геометрии детали (исходных размеров). Это направление включает методы термической, криогенной, химико-термической обработки, а также физико-термической (лазерная и плазменная закалка) и др.

4. Создание поверхностного слоя путем нанесения дополнительного материала на поверхность детали. К этому направлению относятся многочисленные методы напыления и наплавки, а также другие методы создания поверхностных пленок.

Для решения поставленных задач по созданию поверхностного слоя деталь должна пройти ряд технологических систем, решающее значение среди которых имеют процессы модификации поверхности на заключительных стадиях технологического маршрута, устраняющие накопленные дефекты на предшествующих операциях [1]. Взаимосвязанная совокупность технологических систем, которые дополняют возможности друг друга по обеспечению состояния поверхностного слоя, образуют технологический комплекс [2, 3]. Такой технологический комплекс обеспечивает в целом эволюцию и трансформацию свойств поверхностного слоя детали. Технологические модули, входящие в технологический комплекс, реализуют заданное технологическое направление генерации поверхности за счет определенного энергетического воздействия на поверхностный слой детали. Они, как правило, имеют возможность автономного функционирования, обладают условиями самоорганизации процессов, структурного синтеза и параметрической оптимизации компонентов системы. Важной особенностью технологических модулей явля-

ется совместимость и дополняемость реализуемых ими процессов.

Цель работы – определение методологической основы принципа совместности технологий при формировании поверхностей на базе магнитно-электрических методов обработки.

Основная часть

В настоящее время в машиностроении широкое развитие находят методы формирования поверхностного слоя с использованием концентрированных потоков энергии [4, 5]. Значительный интерес представляет применение в технологических целях энергии электрического и магнитного полей [1, 6–12]. В частности, на основе электромагнитных технологий разрабатывается ряд технологических комплексов высокоэффективной обработки, упрочнения и восстановления деталей машин [1–3, 13]. Такому направлению развития способствует, отчасти, высокая технологичность электрофизических воздействий [1, 13] и управляемость электромагнитными процессами [3, 9], и как следствие – перспективность финишных методов, в которых магнитным полем формируется абразивный инструмент и осуществляется управление процессом обработки [3, 9, 13]. Однако, несмотря на то, что электромагнитные потоки энергии наиболее технологичны и удобны в управлении, применение энергии магнитного поля в технологических целях является сложной научной и технической задачей [8], и совместное использование нескольких потоков энергии создает технологические ограничения при оптимизации режимов и стабилизации процессов [10]. Поэтому при создании технологии и оборудования для комбинированной обработки целесообразно использовать синергетический подход и явление самоорганизации в технологических системах.

Технологические процессы, основанные на использовании магнитных и

электрических полей, образуют совокупность магнитно-электрических способов обработки. Сущность способов магнитно-электрической обработки (МЭО) в общем случае заключается в генерации поверхности детали при одновременном совместном воздействии магнитной, электрической и механической энергии [14]. Такое комбинированное сочетание видов энергии позволяет концентрировать в небольшом объеме формируемого поверхностного слоя значительную величину управляемого энергетического воздействия, что обеспечивает интенсификацию технологического процесса. А так как в процессе обработки возможно преобразование видов энергии, то, комбинируя их параметры и характеристики энергетического воздействия, можно создавать новые технологические

способы, позволяющие решать различные технологические задачи.

На основе общности процессов энергетического воздействия при МЭО предложено [14] символическое изображение способов обработки в виде векторной интерпретации, где магнитная, электрическая и механическая энергии изображены, соответственно, векторами: магнитной индукции \vec{B} , электрического тока \vec{I} , механического движения \vec{V} , и разработана [15] классификация возможных принципиальных схем обработки применительно к процессам упрочнения.

Наиболее общая классификация способов магнитно-электрической обработки может быть выполнена на основе признаков, представленных в табл. 1.

Табл. 1. Характеристика классификационных признаков МЭО

Номер признака	Признак классификации (образуемое классификационное множество способов)	Характеристика	Условное обозначение
1	Взаимное направление факторов энергетического воздействия (класс)	Перпендикулярное	1. $\vec{B} \perp \vec{I} \perp \vec{V}$
		Параллельно-перпендикулярное	2. $(\vec{B} // \vec{I}) \perp \vec{V}$
		Параллельно-перпендикулярное	3. $(\vec{B} // \vec{V}) \perp \vec{I}$
		Параллельно-перпендикулярное	4. $\vec{B} \perp (\vec{I} // \vec{V})$
		Параллельное	5. $\vec{B} // \vec{I} // \vec{V}$
2	Временной характер энергетического воздействия (группа)	Постоянное заданной величины	$F_i = \text{const}(c)$
		Переменное с заданной частотой	$F_i = f(\omega t)$
		Импульсно	$F_i = f(\tau)$
		Отсутствует	$F_i = 0$
3	Энергетическое преобразование факторов в рабочей зоне (подгруппа)	В тепловую энергию	$F_i \rightarrow T$
		В механическую энергию	$F_i \rightarrow P$
		В химическую энергию	$F_i \rightarrow R$
4	Энергетический фактор как результат взаимодействия других факторов (вид)	Магнитное поле создается электрическим током в движущемся проводнике (рабочем теле)	$B = f(I, V)$
		Электрический ток индуцируется при перемещении рабочего тела в магнитном поле	$I = f(B, V)$
		Рабочее тело с током перемещается в магнитное поле	$V = f(B, I)$

Использование феноменологической классификации позволяет более рационально и результативно осуществлять анализ известных и разработку новых технологий магнитно-электрической обработки.

Одним из первых практически освоенных способов магнитно-электрической обработки является магнитно-абразивная обработка (МАО). МАО реализует первое технологическое направление генерации поверхности, т. е. образование поверхностного слоя путем удаления материала и формирования заданной микрогеометрии.

Сущность МАО заключается в том, что порошковая ферромагнитная абразивная масса под действием магнитного поля уплотняется и прижимается к обрабатываемой детали и при их относительном перемещении осуществляет абразивное воздействие на ее поверхность, в результате которого происходит процесс микрорезания со снятием тончайших слоев металла и его окислов, а также сглаживание микронеровностей поверхностного слоя путем их пластического деформирования.

Диспергирование и пластическое деформирование поверхностного слоя при МАО усиливается химическими и адсорбционными процессами, происходящими на поверхности детали в присутствии химических и поверхностно-активных веществ (ПАВ) – компонентов СОЖ. Процесс микрорезания сопровождается разрушением и удалением непрерывно образующихся на поверхности химических пленок, в основном оксидных [6, 12]. Таким образом, в основе процесса формирования поверхностного слоя при МАО лежит механический и (или) механохимический механизм съема металла и его оксидов [1, 7, 13]. В целом, МАО включает в себя признаки как механического, так и физического методов обработки и по существу, в соответствии с традиционной терминологией, относится к физико-техническим методам обработки, как и все

способы МЭО.

Магнитно-абразивная обработка является способом МЭО, который характеризуется отсутствием целенаправленного использования электрической энергии. Реализация технологии МАО осуществляется без подвода электрического тока как одного из энергетических технологических факторов процесса. Однако его присутствие в зоне обработки отмечается в многочисленных исследованиях технологии МАО. Собственно, технология наплавки в магнитном поле как способ генерации поверхностей деталей возникла вследствие обнаруженного эффекта оплавления частиц порошка и вершин микронеровностей обрабатываемой поверхности под действием электрического тока [16].

Если фактор присутствия электрического тока в рабочей зоне МАО практически у всех исследователей не вызывает возражений, то о его роли в процессе съема материала существуют различные точки зрения [1, 6–8, 11–13]. Обобщая известную информацию, можно сделать вывод, что значимость роли электрического тока в процессе формирования обрабатываемой поверхности зависит от многих факторов и, прежде всего, от величины ЭДС, самопроизвольно индуцируемой в зоне обработки, или же электрической энергии, подводимой извне от специальных источников. В первом случае имеем четвертый классификационный признак способов МАО (см. табл. 1), т. е. один энергетический фактор (электрический) является результатом взаимодействия двух других факторов, $I = f(B, V)$.

Магнитно-абразивная обработка как составная часть большой совокупности способов магнитно-электрической обработки, в свою очередь, объединяет способы формирования поверхностного слоя, основанные на комплексном воздействии силовых факторов абразивным методом в магнитном поле.

Наиболее распространенной областью МАО является генерация поверх-

ностного слоя с формированием минимальной шероховатости поверхности. Совокупность этих способов предложено называть магнитно-абразивным полированием (МАП) [6]. Кроме основной функции – снижения шероховатости поверхности, МАП обеспечивает повышение точности геометрической формы и размеров, уменьшение волнистости и гранности, увеличение опорной площади поверхности, повышение физико-механических характеристик поверхностного слоя, обеспечивая формирование в нем остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивления коррозии [6, 12].

Отдельную область МАО образуют технологические операции магнитно-абразивной зачистки (МАЗ) поверхностей деталей. Под МАЗ понимаются способы обработки (генерации поверхности), имеющие своей основной целью удаление с обрабатываемой поверхности слоя окислов, других химических и механических загрязнений [12], т. е. создание максимально чистой (ювенильной) поверхности. Эти способы охватывают операции подготовки (зачистки) поверхностей изделий для дальнейшего передела и, в зависимости от их технологического назначения, кроме очистки, решают и другие задачи [17, 18].

Магнитно-абразивная обработка, наряду с широким распространением в

области технологий МАП и МАЗ, применяется также на операциях удаления заусенцев и скругления острых кромок, получения на поверхности рельефных изображений, упрочнения металлорежущих инструментов и т. п. [6].

Во всех способах МАО магнитное поле, как важнейший и неотъемлемый фактор процесса, кроме основной функции формирования инструмента и создания силового взаимодействия между режущими элементами и обрабатываемой поверхностью, оказывает влияние непосредственно на материал детали [6, 8]. В тонких процессах магнитно-абразивного полирования роль магнитного поля в повышении эксплуатационных свойств изделий, например режущих инструментов [6], сопоставима с эффектом от их отделочной механической обработки. В этих условиях важным является преобразование энергетических факторов не только в механическую, но также в тепловую и химическую энергию (см. табл. 1). В результате реализуется как первое технологическое направление генерации поверхности путем удаления материала и формирования заданной микрогеометрии, так и третье направление – создание поверхностного слоя определенного химического состава и структуры.

В общем случае условная символическая (см. табл. 1) запись процесса МАО может быть представлена в виде

$$[\bar{B}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [\bar{I}(c \vee \omega t \vee 0) \wedge f(B, V)] \perp [V(c \vee c \wedge \tau)] \Rightarrow P \vee (P \wedge T \wedge R).$$

Тогда краткая интерпретация записи будет следующая. Возможно использование энергии постоянного, переменного или импульсного магнитного поля. Электрический ток может быть постоянным, переменным или вообще отсутствовать, но в любом случае он индуцируется при перемещении рабочих элементов системы в магнитном поле. Механическое движение – постоянное равномерное или с дополнительным импульсным (осциллирующим). При этом

векторы, характеризующие энергетическое воздействие, взаимно перпендикулярны, или векторы \bar{B} и \bar{I} могут быть параллельными. Энергетическое преобразование факторов – преимущественно в механическую работу, с возможностью дополнительного преобразования в тепловую и химическую энергию.

Вторым по времени появления, уровню практического освоения и глубине теоретической проработки способом МЭО является магнитно-электриче-

ское упрочнение (МЭУ). Как отмечается в [7], предпосылкой к созданию способа МЭУ явился обнаруженный при исследованиях процесса МАО [16] эффект действия микротоков, возникающих при движении ферромагнитных зерен порошка в магнитном поле.

Сущность способа МЭУ заключается в одновременном воздействии на ферроабразивный порошок и обрабатываемую деталь электрической, магнитной и механической энергии, в результате которого под действием электрических разрядов происходит расплавление зерен порошка, сформированного магнитным полем в токопроводящие цепочки между деталью и полюсным накопником, оплавление поверхности детали, полярный перенос капель расплава на деталь, распределение расплава порошка по упрочняемой поверхности и формирование нового поверхностного слоя в магнитном поле [19].

Процесс формирования поверхности при МЭУ сопровождается одновременно двумя явлениями: нанесением покрытия и эрозией его отдельных участков, т. е. разрушением поверхностного слоя [7]. По физической сущности происходящих явлений МЭУ имеет много общего с электроискровым легированием [7, 20]. В то же время, как отмечается в [11], по характеру формирования разрядных импульсов процесс МЭУ близок вибродуговой наплавке. Основываясь на том, что основную роль – нагрев и плавление зерен порошка, выполняет энергия электрического поля, а энергия магнитного поля совместно с механической выполняет вспомогательную роль – удержание порошка и формирование токопроводящих цепочек, метод назван электромагнитной наплавкой (ЭМН). Здесь магнитное поле рассматривается как силовой фактор, воздействующий на макроскопические элементы технологической системы, в т. ч. частицы ферромагнитного порошка. При этом не принимается во внимание воздействие электромагнитных полей на микрообъемы

металла, т. е. на расплав микрованны и диффузионные процессы при формировании поверхностного слоя из расплава порошка.

Однако, результаты экспериментальных исследований, представленные далее в указанной работе, а также в ряде других [10, 13–15], свидетельствуют о более значимой роли магнитного поля в процессе формирования покрытий. Магнитная индукция влияет не только на интенсивность образования цепочек порошка, их устойчивость и электрическую проводимость, но и на распределение расплава порошка и эрозию наплавленного покрытия. Очевидно, что магнитное поле также оказывает влияние на структурные и фазовые превращения в материале поверхностного слоя при МЭУ аналогично, как и при МАО [6, 8].

Относительно терминологии при МЭУ можно отметить еще ряд вариантов, предложенных в зависимости от акцентирования внимания на отдельных явлениях и преобладающих факторах процесса. Например, нанесение покрытий магнитно-электрическим методом [21], упрочнение и восстановление деталей машин в электромагнитном поле [10], упрочнение и восстановление деталей машин наплавкой в электромагнитном поле (наплавка в ЭМП) [11] и т. п.

Необходимость дополнительной обработки для обеспечения микрогеометрии поверхности, а также развитие комбинированных технологий с применением концентрированных потоков энергии, стимулировало развитие совмещенных процессов генерации поверхностного слоя деталей машин. В качестве отдельного метода можно выделить перспективную технологию электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием (ЭМН с ППД) [11].

На основе метода МЭУ получило развитие термомеханическое упрочнение и восстановление деталей в электромагнитном поле [10] и некоторые другие упрочняющие технологии.

МЭУ является одним из эффективных методов упрочнения и восстановления деталей машин, позволяющим реализовать в едином технологическом процессе восстановление геометрических размеров и формы поверхности и создание упрочненного поверхностного слоя. Особенно эффективно применение МЭУ для упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин и технологического оборудования, работающих в условиях абразивного и абразивно-коррозионного изнашивания с переменными по величине ударными нагрузками, а в сочетании с последующей механической обработкой позволяет также повышать долговечность деталей, работающих в условиях трения скольжения.

$$[\bar{B}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [\bar{I}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [V(c \vee c \wedge \tau) \wedge f(B, D)] \Rightarrow T \wedge R.$$

Интерпретация условной записи процесса следующая. Магнитно-электрическое упрочнение осуществляется при постоянном, переменном или импульсном воздействии магнитного поля и электрического тока. Механическое движение может быть постоянным или с дополнительным импульсным активированием. Кроме того, механическое перемещение осуществляется как результат взаимодействия магнитного поля и электрического тока. При этом векторы магнитной индукции, электрического тока и механического движения могут быть взаимно перпендикулярными и параллельными в любых их сочетаниях. Энергетическое преобразование факторов процесса – в тепловую и химическую энергию.

Условная символьная запись предусматривает полное феноменологическое многообразие возможных вариантов реализации технологии. Разумеется, в настоящее время на практике применяется ограниченное количество способов и схем процесса обработки.

В целом анализ способов маг-

технология магнитно-электрического упрочнения реализует четвертое технологическое направление генерации поверхности, т. е. формирование поверхностного слоя путем нанесения дополнительного материала на поверхность детали. В соответствии с энергетическими факторами, действующими в процессах магнитно-электрической обработки, процесс МЭУ заключается в формировании поверхности из ферромагнитных порошковых материалов под воздействием импульсов электрического тока в зоне влияния магнитного поля с (или без) направленным механическим воздействием на расплав порошка. Тогда условная символьная (см. табл. 1) запись процесса МЭУ имеет вид:

нитно-электрической обработки позволяет сделать вывод, что технология МЭУ имеет много общего с процессами МАО. Так магнитно-абразивную обработку можно проводить на устройствах для магнитно-электрического упрочнения [11], т. к. в устройствах, реализующих эти процессы, силовым источником и упругой связкой является энергия магнитного поля. В обоих процессах могут применяться одни и те же ферроабразивные материалы [12, 21, 22]. Отмечается также аналогия некоторых явлений в процессе реализации методов МЭО при различных технологических направлениях формирования поверхностного слоя.

Таким образом, магнитно-абразивную обработку и магнитно-электрическое упрочнение объединяет такое свойство, как инверсионность процессов, т. е. их обратимость при соответствующем задании параметров реализации. Это свойство особенно важно при проектировании технологических модулей совмещенной обработки.

Заключение

Технология магнитно-электрической обработки реализует в основном два технологических направления генерации поверхности: методами магнитно-абразивной обработки и магнитно-электрического упрочнения. Эти методы имеют органическую связь их осуществ-

ления, основанную на принципе инверсии. Развитие свойства инверсионности представляет методологическую основу для создания технологий на принципе совмещения. Свойство совмещенности определяет основополагающий подход к созданию и развитию технологий с использованием современных технологических комплексов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 376 с.
2. **Ящерицын, П. И.** Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении / П. И. Ящерицын, Л. М. Акулович, М. Л. Хейфец. – Минск: Технопринт, 2006. – 248 с.
3. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 239 с.
4. **Григорьев, С. Н.** Технология обработки концентрированными потоками энергии / С. Н. Григорьев, Е. В. Смоленцов, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 279 с.
5. **Паркин, А. А.** Технология обработки концентрированными потоками энергии / А. А. Паркин. – Самара: СГТУ, 2004. – 494 с.
6. **Барон, Ю. М.** Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 176 с.
7. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1988. – 270 с.
8. **Скворчевский, Н. Я.** Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 215 с.
9. **Кожуро, Л. М.** Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
10. **Акулович, Л. М.** Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л. М. Акулович. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
11. **Мрочек, Ж. А.** Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.
12. **Хомич, Н. С.** Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
13. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с.
14. **Шулев, Г. С.** Перспективы использования магнитных и электрических полей в машиностроении и металлообработке / Г. С. Шулев // Материалы 3 науч.-техн. семинара с междунар. участием по технологии финишной обработки. – Варна (Болгария), 1987. – С. 4–7.
15. **Люцко, В. А.** Технология и установки магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Люцко; ПГУ. – Новополоцк, 2004. – 24 с.
16. **Коновалов, Е. Г.** Исследование процесса генерации поверхностей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев, Б. П. Чемисов // Докл. АН БССР. – 1970. – Т. 14, № 4. – С. 127–129.
17. **Кульгейко, М. П.** Разработка процессов и оборудования для магнитно-абразивной обработки проволоки: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. П. Кульгейко; БПИ. – Минск, 1989. – 20 с.
18. **Хомич, Н. С.** Магнитно-абразивная зачистка кромок листов и проволоки перед сваркой / Н. С. Хомич, С. И. Романюк, М. П. Кульгейко // Материалы 4 науч.-техн. семинара с междунар. участие по неконвенцион. технологиям в машиностр. – Ботевград, 1989. – Т. 2. – С. 36–45.
19. Механизм формирования поверхностного слоя при магнитно-электрическом упрочнении / М. П. Кульгейко [и др.] // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2000. – № 1. – С. 19–25.
20. **Химухин, С. Н.** Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии: монография / С. Н. Химухин, Хосен Ри, Э. Х. Ри. – Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2015. – 127 с.

21. **Петришин, Г. В.** Износостойкие гетерогенные покрытия из борированных материалов на основе отходов стальной дроби, нанесенных магнитно-электрическим методом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. В. Петришин; ПГУ. – Новополоцк, 2006. – 24 с.

22. **Хомич, Н. С.** Работоспособность ферромагнитных абразивов в условиях автоматизированной обработки длинномерных изделий / Н. С. Хомич, М. П. Кульгейко, А. П. Лепший // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пензен. политехн. ин-т, 1991. – Вып. 19. – С. 49–53.

Статья сдана в редакцию 24 ноября 2020 года

Михаил Петрович Кульгейко, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет транспорта. Тел.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Григорий Валентинович Петришин, канд. техн. наук, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-029-188-76-50. E-mail: petrishin@gstu.by.

Наталья Михайловна Симанович, аспирантка, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-044-545-83-59. E-mail: kulgeikolianat@mail.ru.

Mikhail Petrovich Kulgeiko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State University of Transport. Tel.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Grigori Valentinovich Petrishin, PhD (Engineering), Associate Prof., P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: 8-029-188-76-50. E-mail: petrishin@gstu.by.

Natalia Mikhailovna Simanovich, PhD student, P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: 8-044-545-83-59. E-mail: kulgeikolianat@mail.ru.