

Кульгейко М. П., Лепший А. П., Кульгейко Г. С.

АНАЛИЗ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ИНДУКТОРА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Введение. В настоящее время в машиностроении широкое применение находят комбинированные методы финишной обработки деталей машин [1-3]. Одним из перспективных методов формирования поверхностного слоя является магнитно-абразивная обработка (МАО). Метод отличается относительной простотой в осуществлении, экологической чистотой, обеспечивает высокое качество микрогеометрии поверхности, формирование остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивляемости коррозии [4, 5].

Постановка задачи. Технология МАО плоскостей предполагает применение в основном одной из двух принципиальных схем реализации процесса: обработка ферроабразивным порошком, сформированным магнитным полем в инструменте на торцовой поверхности или периферии магнитного (электромагнитного) индуктора. В многочисленных устройствах первого варианта магнитный поток, выходящий из торцовой поверхности индуктора, проходит через обрабатываемую поверхность детали. Такие схемы применяются при обработке материалов, обладающих различными магнитными свойствами, т. е. как диамагнитными, так и ферромагнитными. Устройства, основанные на данном принципе, имеют достаточно широкую конструкторскую проработку и всесторонние теоретические и экспериментальные исследования.

Схемы МАО плоских поверхностей по второму варианту основаны на формировании режущего инструмента на периферии (цилиндрической поверхности) магнитного индуктора, т. е. рабочий магнитный поток проходит по касательной к обрабатываемой поверхности. Формирование такого инструмента имеет свои особенности и закономерности. Оценка его эффективности и перспектив практического применения требует проведения соответствующих исследований.

На эффективность процесса МАО, в том числе плоских поверхностей, оказывают влияние много факторов и параметров, которые можно разделить на конструктивные и технологические.

К конструктивным относятся такие факторы, как геометрия и конфигурация полюсных наконечников и рабочих зазоров магнитного индуктора, величина рабочего зазора, наличие и форма концентраторов магнитного поля, конструкция магнитной системы и др., которые определяют количество участвующих в процессе резания зерен магнитно-абразивного порошка, ориентацию порошка относительно обрабатываемой поверхности, условия удержания порошка в рабочем зазоре и т. п.

Из технологических факторов наибольшее влияние на процесс МАО оказывает величина магнитной индукции, скорость вращения магнитного индуктора, материал магнитно-абразивного порошка и его зернистость, скорость подачи заготовки, наличие и вид СОЖ, физико-механические свойства обрабатываемой детали и состояние исходной поверхности, характер вспомогательных движений и ряд других факторов.

В настоящее время достаточно широко изучены вопросы влияния технологических факторов на процесс МАО с целью выработки практических рекомендаций по применению данного способа финишной обработки.

Возможности повышения эффективности МАО за счет изменения конструктивных факторов, не связанных с повышением энергоемкости оборудования и усложнением устройств, в настоящее время изучены недостаточно.

Цель работы – исследование особенностей и закономерностей формирования режущего инструмента для обработки плоскостей на основе обобщенной модели магнитного индуктора.

Результаты исследований и их обсуждение. Представленная работа направлена на изучение вопросов расширения технологических возможностей МАО за счет применения магнитных индукторов, формирующих абразивный инструмент на его цилиндрической поверхности, а также установление взаимосвязи различных конструктивных параметров индуктора и их влияния на работоспособность инструмента.

В основу исследований положена разработка обобщенной модели магнитного индуктора, реализующего схему кинематического резания, основной особенностью которой является уменьшающийся рабочий зазор между индуктором и обрабатываемой поверхностью при ее обработке, а также комплексный анализ различных форм полюсных наконечников, образующих варианты разной конфигурации межполюсного пространства при обеспечении сил магнитного поля, достаточных для производительной обработки.

Обобщенная модель индуктора представляет собой конструкцию, состоящую из двух полюсных наконечников 1 и 2, разделенных немагнитной прокладкой 3 (рис. 1), и характеризуется следующими параметрами: d_1 – диаметр шейки под электромагнитную катушку; d_2 – посадочный диаметр; D_1 и D_2 – наружный и внутренний диаметры магнитного индуктора, соответственно; α – угол наклона торцовой поверхности полюса к его оси вращения; ψ и β – внутренний и наружный углы скоса торцовой поверхности полюса, соответственно; ε – угол заострения торцовой поверхности полюса; T и ω – шаг и угол направления концентраторов магнитного поля, соответственно; t_n – толщина кольцевого полюсного наконечника; a – нормальный межполюсный зазор, т. е. расстояние между полюсами по нормали к их торцовым поверхностям; A – осевой межполюсный зазор, т. е. расстояние между полюсами вдоль оси вращения индуктора.

Конструкция данного индуктора обеспечивает формирование абразивного инструмента на цилиндрической поверхности в магнитных потоках выпучивания. Его особенностью является наличие наклонной торцовой поверхности полюсов под углом α к оси вращения, что обеспечивает при создании магнитного поля между полюсами N и S формирование кольцевого наклонного абразивного инструмента также под соответствующим углом к оси индуктора.

Очевидно, что чем меньше угол α ($D_1 = \text{const}$), тем большую площадь обрабатываемой поверхности перекроет абразивный инструмент при задании магнитному индуктору вращательного движения. Увеличение диаметра магнитного индуктора D_1 (при $\alpha = \text{const}$) также приводит к увеличению площади обрабатываемой поверхности, но никак не влияет на форму рабочей зоны, поэтому во всех исследованиях он остается постоянным.

Кольцевой абразивный инструмент формируется в области дугообразных магнитных потоков выпучивания и его форма в значительной степени определяется параметрами межполюсного зазора. Величина осевого зазора A зависит от угла α наклона межполюсного пространства и расстояния между полюсами, т. е. от величины нормального зазора a : $A = a / \sin \alpha$. На рис. 2,а представлена номограмма для определения зазора A в зависимости от угла α и значения зазора a .

Кульгейко Михаил Петрович, к. т. н., доцент кафедры «Графика» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта».

Беларусь, БелГУТ, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.

Лепший Александр Парфенович, к. т. н., доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого».

Кульгейко Галина Степановна, старший преподаватель кафедры «Нефтегазоразработка и гидроневомоавтоматика» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого».

Беларусь, ГГТУ им. П. О. Сухого, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

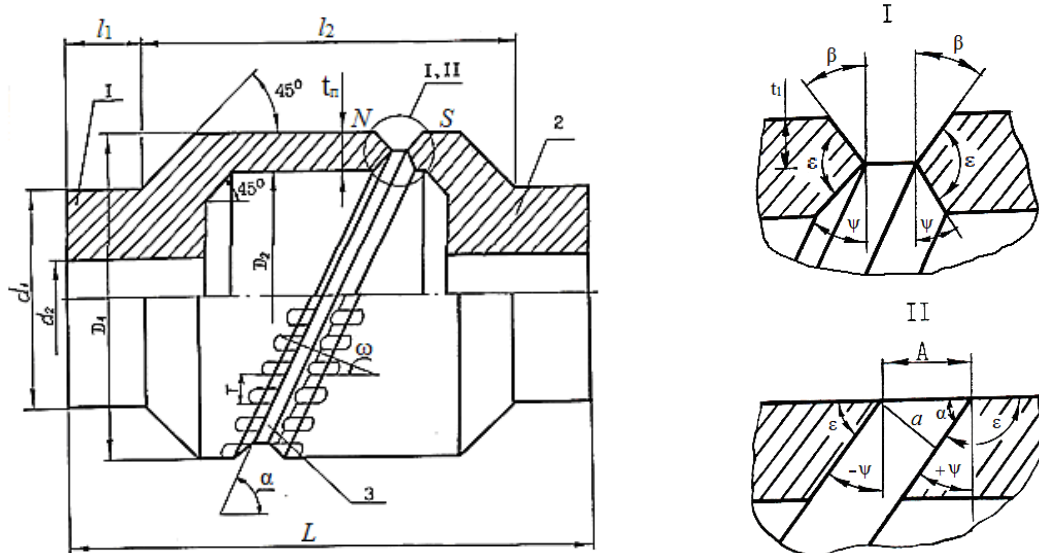


Рисунок 1 – Обобщенная модель магнитного индуктора

A, t_n, мм

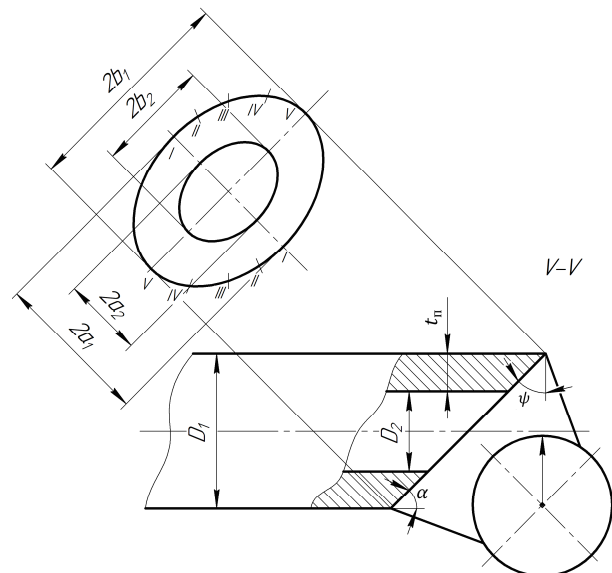
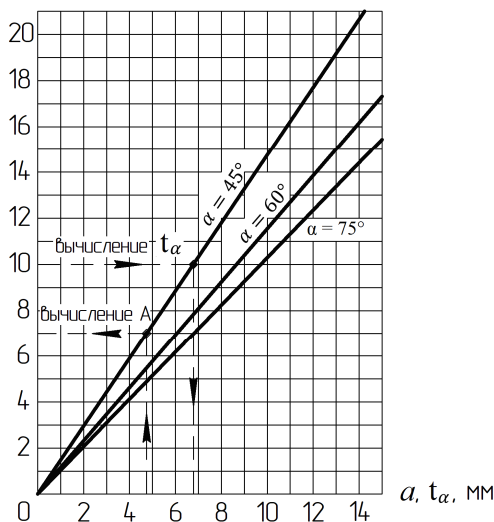


Рисунок 2 – Номограмма определения зазора A и толщины t_n (а) и схема к определению площади торцевой поверхности магнитного индуктора и угла psi (б)

С уменьшением угла α увеличивается площадь торцевой поверхности полюсов. Это очевидно, т. к. торцевая поверхность полюса представляет собой эллипс, площадь которого равна $S = \pi(a_1 b_1 - a_2 b_2)$, где $a_1 = D_1/2$; $a_2 = D_2/2$; $b_1 = D_1/2 \sin \alpha$; $b_2 = D_2/2 \sin \alpha$ (см. рис. 2,б). Тогда площадь торцевой поверхности полюса $S = \pi(D_1^2 - D_2^2)/4 \sin \alpha$. Так как магнитный поток зависит от сечения магнитопровода, то в исследованиях обобщенной модели индуктора необходимо обеспечить равенство торцевых площадей при различных углах наклона α . Практически это условие достигается изменением толщины стенки полюса t_n путем изменения внутреннего диаметра D_2 магнитного индуктора. Значение величины t_n также можно определить из номограммы, представленной на рис. 2,а, заменив оси координат A и a на t_n и t_α соответственно.

Так как угол α меньше 90° , то внутренний угол скоса ψ будет иметь переменное значение в различных диаметральных сечениях торца полюсного наконечника. А это в свою очередь приводит к изменению угла заострения ε – одного из важных параметров, определяющих картину магнитного поля в межполюсном пространстве. В общем случае для любой диаметральной плоскости справедливо соотношение $\beta + \varepsilon + \psi = 180^\circ$, а угол заострения находится в пределах

$90^\circ - \psi \leq \varepsilon \leq 90^\circ + \psi$ (см. рис. 1). Динамика изменения угла ψ , измеренного по схеме на рис. 2,б, для некоторых значений угла α представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Динамика изменения внутреннего угла ψ , в град

Угол α , град	Номер сечения				
	I-I	II-II	III-III	IV-IV	V-V
75	0	4	8	12	15
60	0	8	15	23	30
45	0	11	22	34	45

Анализ обобщенной конструкции магнитного индуктора дает основание считать, что наличие угла наклона торцевых поверхностей полюсов к оси их вращения (α), отличного от прямого, вносит определенные изменения в картину распределения магнитного поля как в межполюсном, так и в рабочем зазорах, что влияет на производительность обработки. Обобщенная модель магнитного индуктора позволяет реализовать широкую гамму различных вариантов конструкций, характеризующихся изменяемыми геометрическими параметрами межполюсного пространства (α , a) и формой рабочей поверхности полюсов (β , ε , ψ).

Картину магнитного поля в индукторе определяют два потока – основной (B_O), действующий в межполюсном зазоре, и поток выпучивания (B_B), определяющий характер формирования абразивного инструмента и действующий в рабочем зазоре. Соотношение между потоками не является постоянной величиной, а зависит главным образом от геометрии межполюсного зазора. Основное влияние на перераспределение потоков оказывает площадь торцовых поверхностей полюсов (при проведении исследований остается постоянной) и расстояние между полюсами a (рис. 3).

B , Тл

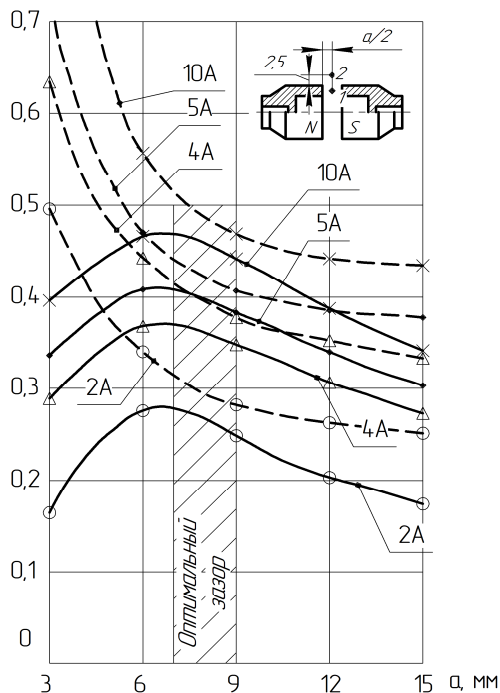
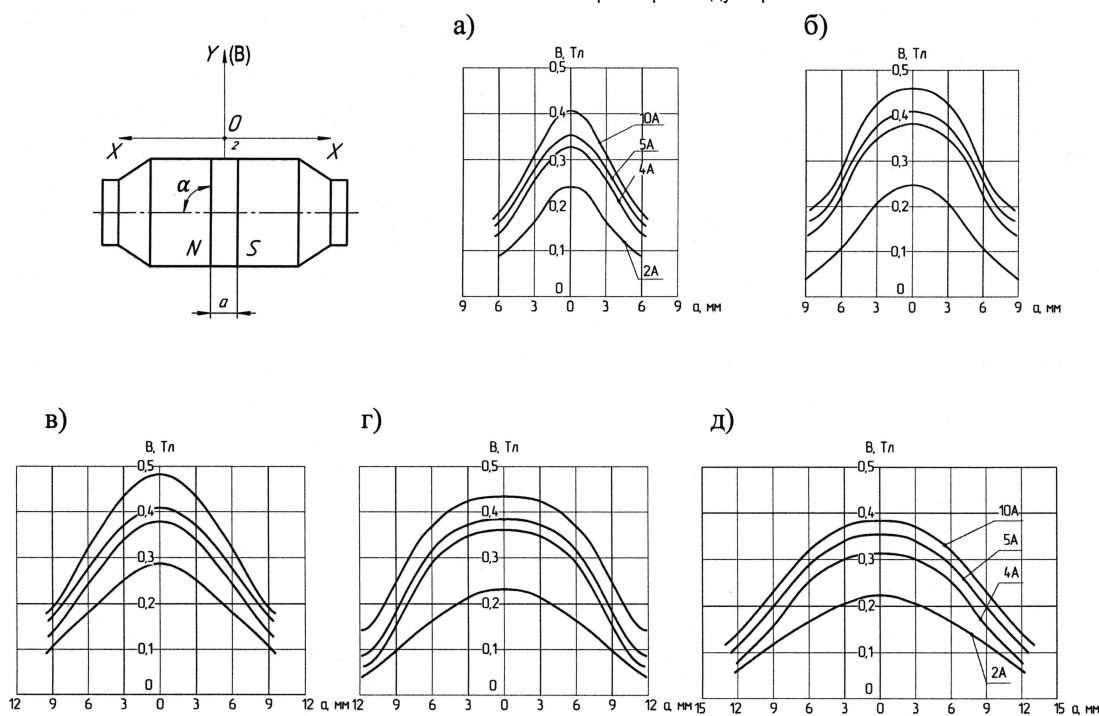


Рисунок 3 – Зависимость магнитной индукции B (--- основной поток B_O , ---- поток выпучивания B_B) от величины межполюсного зазора a

Для основного потока контроль осуществляли в середине межполюсного зазора (точка 1) и для потока выпучивания на расстоянии 2,5 мм от периферии индуктора (точка 2). Как видно из рис. 3, зависимость магнитной индукции основного потока (B_O) от величины межполюсного зазора носит монотонно убывающий характер, причем наиболее интенсивно при меньших значениях a . Уменьшение B_O , обусловленное увеличением магнитного сопротивления при увеличении расстояния между полюсами, приводит к росту магнитного потока выпучивания (B_B), особенно в начальный период при $a=5-8$ мм. Дальнейшее увеличение межполюсного зазора приводит к снижению, а затем к некоторой стабилизации значений магнитной индукции B_O и B_B . При этом ранее стабилизируется основной поток. Энергетически оптимальное перераспределение магнитных потоков наблюдается при величине зазора $a=7-9$ мм, для которого отношение $B_O/B_B \approx 1,0$. Это обеспечивает максимальное распределение ферроабразивного порошка на периферии индуктора.

Экспериментальные исследования распределения магнитного поля в рабочей области инструмента проводились для индукторов с наклоном межполюсного пространства $\alpha=90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$. Схема контроля и результаты измерений представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 представлены графики распределения магнитной индукции в рабочем зазоре вдоль периферии индуктора с перпендикулярным межполюсным пространством. Измерение индукции проводилось на расстоянии 2,5 мм от образующей индуктора в плоскости симметрии межполюсного зазора и в двух направлениях по оси X в области формирования абразивного порошкового инструмента. Данные приведены для ряда индукторов с различной величиной зазора a . С увеличением зазора a до 6–9 мм магнитная индукция в центре зазора увеличивается до значения $B_B=0,45-0,47$ Тл, а затем закономерно уменьшается, так как основной магнитный поток замыкается через межполюсное пространство и, следовательно, поток выпучивания ослабляется. При этом следует отметить, что для всех a по мере удаления точки измерения по оси X от начала координат в сторону того или иного полюса магнитная индукция выравнивается, принимая значения $B_B=0,13-0,17$ Тл (при $I=10$ А). Следовательно, ширина кольца формируемого абразивного инструмента определяется прежде всего величиной межполюсного зазора при прочих постоянных параметрах индуктора.



а – 3 мм; б – 6 мм; в – 9 мм; г – 12 мм; д – 15 мм

Рисунок 4 – Распределение магнитной индукции в рабочем зазоре при $\alpha = 90^\circ$ и межполюсном зазоре

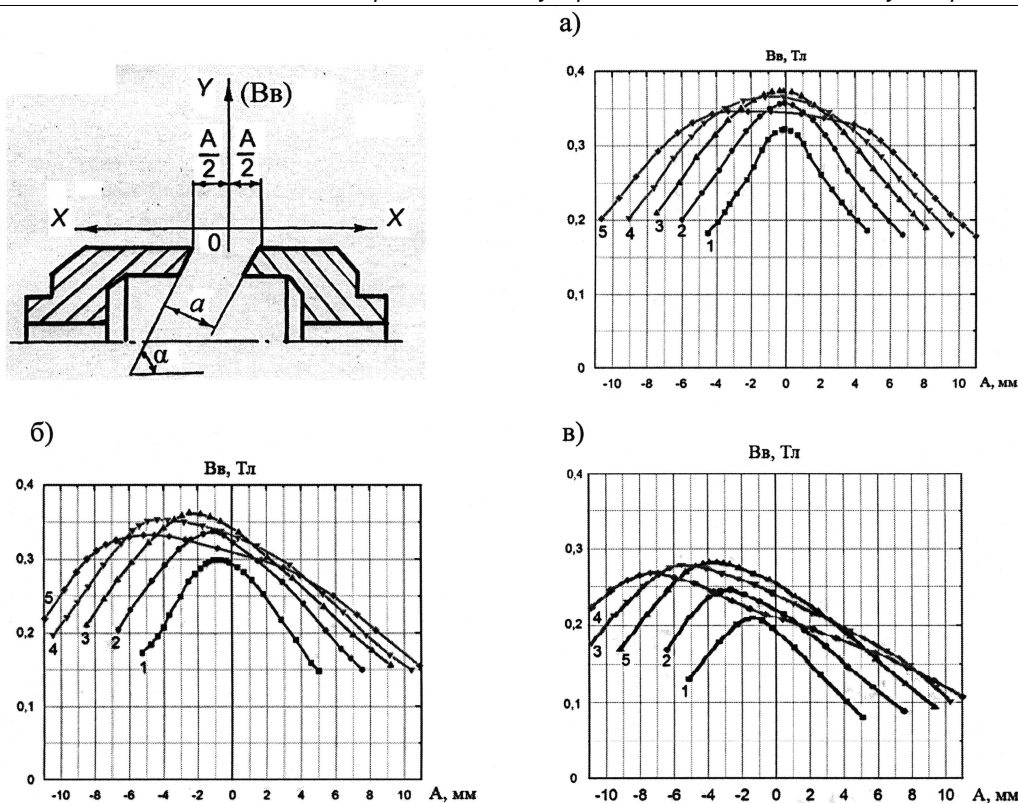


Рисунок 5 – Распределение магнитного потока выпучивания при наклонном межполюсном пространстве с углом α : а – 75 $^\circ$; б – 60 $^\circ$; в – 45 $^\circ$ и зазором а: 1 – 3 мм; 2 – 6 мм; 3 – 9 мм; 4 – 12 мм; 5 – 15 мм

В связи с конструктивными особенностями индуктора значительный интерес представляет картина магнитного поля в рабочей зоне при наклонном межполюсном зазоре (тип II, рис. 1). Измерения магнитной индукции потока выпучивания проводились также на расстоянии 2,5 мм от периферии индуктора для различных углов α и зазоров а. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при $\alpha=75^\circ$ магнитная индукция распределяется практически симметрично относительно середины зазора (оси Y). Причем с увеличением зазора а изменение магнитной индукции потока выпучивания B_v носит такой же характер, что и при $\alpha=90^\circ$, т. е. вначале увеличивается, а затем уменьшается. Этот же вывод относится и к характеру распределения магнитной индукции потока выпучивания, измеренной при $\alpha=60^\circ$ и $\alpha=45^\circ$ (см. рис. 5, б, в). Абсолютное значение индукции по мере уменьшения угла α уменьшается, что связано с соответствующим изменением осевого зазора А.

С увеличением наклона межполюсного пространства, т. е. уменьшением α , происходит асимметричное смещение магнитного поля. Смещение максимума магнитной индукции наиболее значимо при $\alpha=60^\circ$ и 45° и направлено в сторону острого угла полюсного наконечника. В диаметральной плоскости, где угол заострения ε имеет минимальное значение, величина смещения практически равна половине осевого зазора А. Так как угол заострения ε изменяется вдоль окружности межполюсного зазора, то и смещение магнитного поля будет различное в разных диаметральных сечениях индуктора.

Следовательно, изменяется положение рабочей области кольца ферромагнитного порошка, что необходимо учитывать при формировании абразивного инструмента.

Заключение. Анализ обобщенной модели магнитного индуктора позволил установить взаимосвязь конструктивных параметров индуктора и их влияние на распределение магнитного поля в рабочей области инструмента. Выявлены особенности и закономерности формирования абразивного инструмента с наклонным межполюсным пространством индуктора.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика, М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 376 с.
2. Григорьев, С. Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии / С. Н. Григорьев, Е. В. Смоленцов, М. А. Волосова. – Старый Оскол : ГНТ, 2012. – 280 с., 2015. – 279 с.
3. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца, С. А. Клименко. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 463 с.
4. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.
5. Обработка заготовок деталей машин / А. В. Миранович [и др.]; под ред. Ж. А. Мрочка. – Минск : Вышэйшая школа, 2014. – 171 с.

Материал поступил в редакцию 17.02.2020

KULGEIKO M. P., LEPSHIY A. P., KULGEIKO G. S. The review of the generalized model of the inductor for magnetic abrasive processing of plane surfaces

The results of the geometric and magnetic-static review of the generalized model of the inductor for the magnetic-abrasive processing of plane surfaces are presented. The feature of the inductor is the formation of an abrasive tool on the periphery of the pole tips, forming an inter-pole space inclined to the axis.

The relationship of the geometric parameters of the inductor and their influence on the distribution of magnetic fluxes in an inter-pole space and the work area of a tool is established. The features of formation of the magnetic field in the work area when changing the geometry of the pole tips are determined.