

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Л.М. Акулович,

профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Л.Е. Сергеев,

доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.В. Шабуня,

ассистент каф. технологии металлов БГАТУ

Показано влияние градиента магнитной индукции на стружкообразование при магнитно-абразивной обработке. Приведен расчет величины сил, действующих на ферроабразивное зерно в направлении градиента магнитной индукции. Предложено на поверхностях полюсных наконечников создавать концентраторы магнитного потока, позволяющие изменять величину и направление градиента магнитной индукции.

Ключевые слова: финишная обработка, магнитно-абразивная обработка (МАО), стружкообразование, ферроабразивное зерно, ферроабразивный порошок (ФАП), градиент магнитной индукции.

The effect of magnetic induction gradient on chip formation during magnetic abrasive treatment is shown. The calculation of the magnitude of the forces acting on the ferroabrasive grain in the direction of the magnetic induction gradient is given. It is proposed to create magnetic flux concentrators on the surfaces of pole tips, which allows changing the magnitude and direction of the magnetic induction gradient.

Key words: finishing, magnetic abrasive treatment (MAO), chip formation, ferro abrasive grain, ferroabrasive powder (FAP), magnetic induction gradient.

Введение

В технологических процессах изготовления деталей машин эксплуатационные свойства рабочих поверхностей формируются, как правило, на финишных операциях. Финишной обработке подвергается до 80 % всех деталей машин, а ее удельная трудоемкость составляет 20-45 % от общей трудоемкости машиностроительного производства [1]. Финишная обработка, включающая механические, физические, химические и комбинированные способы обработки поверхностей, является эффективным методом получения изделий требуемого качества поверхности. Поэтому их развитие представляет важный резерв машиностроения.

В машиностроении применяются различные методы формообразования поверхностей деталей машин с обеспечением заданных параметров их точности и шероховатости для формирования требуемых высоких эксплуатационных свойств, среди которых доминирует абразивная обработка. По виду режущего инструмента существующие способы финишной абразивной обработки можно разделить на обработку жестко-связанным, свободным и подвижно-скоординированным абразивным зерном. Одним из перспективных способов абразивной обработки подвижно-скоординированным зерном является магнитно-абразивная обработка (МАО) [2, 3].

МАО представляет собой избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Сущность этого процесса состоит в том, что при сравнительно большой шероховатости поверхности, зерна порошка контактируют первоначально преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждое зерно порошка в магнитном поле устанавливается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. При износе и затуплении вершин происходит переориентация элемента порошка таким образом, что вновь образовавшаяся наибольшая ось направляется вдоль магнитных силовых линий. В результате процесс микрорезания производится постоянно обновляющимися кромками на протяжении всего процесса обработки. При МАО происходит непрерывный контакт ферроабразивного порошка (ФАП) с обрабатываемой поверхностью детали, так как отсутствует жесткое крепление абразивного зерна в связке, что способствует самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно формы обрабатываемой поверхности. Все это позволяет управлять жесткостью режущего инструмента, с целью повышения производительности обработки и повышения качества обработанной поверхности (шероховатость поверхности $Ra = 0,1-0,2$ мкм). Однако интенсивное резание при МАО происходит в первые 15...30 с., а затем наблюдается его «затухание». Это

связано с тем, что в процессе обработки происходит износ и затупление ферроабразивного зерна, что приводит к уплотнению ФАП в рабочем зазоре, и вследствие этого снижается его режущая способность.

Поэтому целью данного исследования является поиск методов интенсификации процесса МАО.

Основная часть

В теории абразивного резания установлено [4], что стружкообразование возможно при определенном соотношении между глубиной h внедрения режущих вершин зерен абразивного инструмента в обрабатываемую поверхность и радиусов округления ρ этих вершин. Локальные контакты единичных зерен с неровностями обрабатываемой поверхности должны заканчиваться следующими событиями: 1) упругой деформацией; 2) пластической деформацией; 3) деформацией сдвига (микрорезание, снятие стружки).

И. В. Крагельским [5] установлено граничное условие перехода пластического деформирования в микрорезание:

$$h = 0,5\rho\left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_s}\right), \quad (1)$$

где τ – прочность на срез адгезионной связи, МПа;

σ_s – предел текучести, МПа.

Микрорезание абразивными зёрнами пластичных металлов со снятием стружки возможно при значениях отрицательных передних углов γ не более 45° , чему соответствует отношение [6]:

$$k = \frac{a_z}{\rho} \approx 0,5, \quad (2)$$

где a_z – толщина среза;

ρ – радиус округления вершин зерна.

При $k < 0,5$ наблюдается пластическое деформирование металла или даже скольжение зерен по металлу, т.е. имеет место процесс микровыглаживания поверхности. При $k > 0,5$ происходит процесс микрорезания, причем при $k = 1,0$ микрорезание обеспечивается стабильно во всех случаях. От пластичности металла зависит степень его деформации при абра-

зивной обработке.

Установлено [7], что форма стружки, образующейся при МАО аналогична форме стружки при шлифовании. Соотношение длины стружки (l) и ее толщины (a) находится в пределах $l/a = 5-20$. Однако при одинаковых размерах радиусы кривизны стружек при МАО меньше, чем у стружек, полученных при шлифовании. Это косвенно свидетельствует о более высокой степени пластических деформаций диспергируемого металла в процессе МАО. Процесс МАО сталей в отличие от шлифовании происходит в пределах $h/\rho < 0,005-0,13$, следовательно, стружкообразование при МАО происходит при более неблагоприятных условиях. Благодаря этому, пластические деформации обрабатываемой поверхности и стружкообразование могут происходить при меньших значениях действующих сил.

Для определения коэффициентов стружкообразования и навалов проведены экспериментальные исследования и использована установка с программно-аппаратным комплексом, которая приспособлена для нанесения царапин зернистостью $\Delta = 160/125$ мкм на поверхность исследуемого металла (рис. 1). В процессе работы с помощью датчиков производили измерения радиальной и тангенциальной составляющих силы резания. С использованием специальной платы аналого-цифрового преобразователя в компьютер передается информация, поступающая от датчиков.

Поверхности образцов предварительно полировали до шероховатости по параметру $Ra < 0,05$ мкм для последующего качественного измерения глубины царапины и высоты навалов. В процессе исследований применяли нагрузки, действующие на ФАП в процессе МАО, выбранные на основании исследований, проведенных Ф.Ю. Сакулевичем, В.И. Ждановичем и др. [3]. Определен диапазон сил, с которыми зерно действует на поверхность обрабатываемой детали при МАО, равный $(0,5-16) \cdot 10^{-3}$ Н. При этом определяли размеры: b – ширина, h – максимальная глубина царапины, b_{n1} и b_{n2} , t_{n1} и t_{n2} – соответственно ширина и высота правого и левого навалов. Скорость принималась $v = 0,5$ м/с при многократных циклических проходах. Исследуемый материал – Ст. 3 ГОСТ 380-71.

В результате проведенных исследований установ-

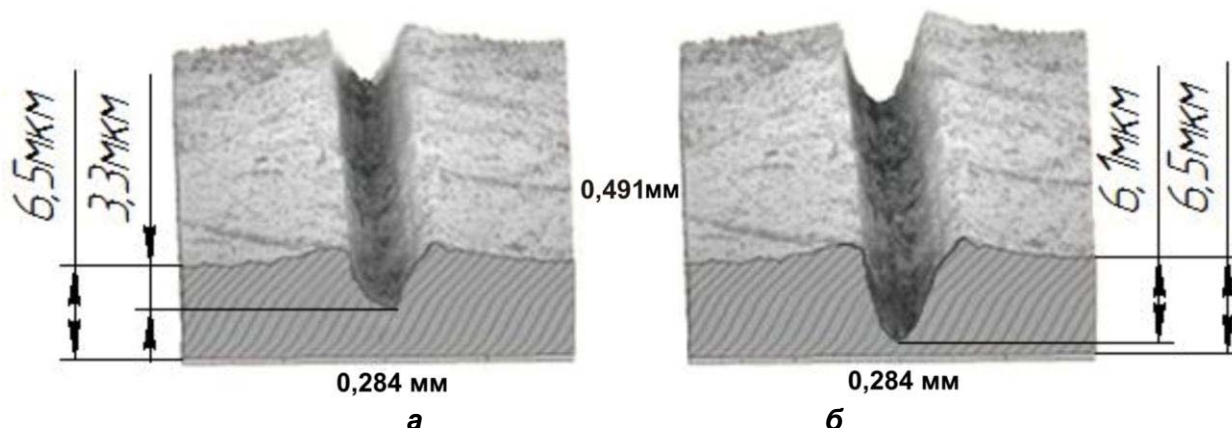


Рисунок 1. 3D-модели царапин поверхности: без (а) и с (б) – использованием магнитного поля

лено, что процесс удаления металла выступами микро- рельефа поверхности зерен имеет место практически при любой глубине микрорезания, определяемой десяти- тыми и сотыми долями микрометра. Исследования пока- зали, что высота навалов меньше, чем глубина цара- пин, т. е. основной объем металла (60-75 %), вытесня- емый зерном, переходит в микростружку.

В результате проведенного анализа и исследова- ния процесса микрорезания единичным зерном фер- ромагнитного материала при наложении магнитного поля установлено, что глубина царапины в 1,5-1,6 раза больше, чем при отсутствии магнитного поля. Объяснением полученных результатов является про- никновение электромагнитных полей в тонкий по- верхностный слой ФАП и возникновение теплового эффекта, который способствует пластической дефор- мации материала [8].

Вместе с тем, на процесс снятия стружки при МАО оказывает влияние величина сил, действующих на ФАП. Величина этих сил зависит от градиента магнитной индукции $grad|\vec{B}|$ и величины микро- токов, образующихся в феррообразивном зерне в про- цессе МАО [9]:

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_a} VB grad|\vec{B}|,$$

где V – объем феррообразивного зерна, m^3 ;

μ_a – магнитная проницаемость материала ферро- образивного зерна, Гн/м;

B – магнитная индукция в точке зазора, где рас- положено ФАП, Тл;

$grad|\vec{B}|$ – вектор градиента магнитной индукции в рассматриваемой точке рабочего зазора, Тл/м.

В зерне ФАП, находящейся в магнитном поле зазора, происходит ориентация молекулярных токов, направление которых таково, что созданные ими магнитные поля совпадают с направлением внешнего магнитного поля и усиливают его. В толще зерна молекулярные токи направлены в противоположные стороны и создаваемые ими магнит- ные поля взаимно компенсируются. Поэтому учитывать будем только магнитные поля, возникающие от молекулярных токов, текущих по поверхности зерна. Рассмотрим дей- ствие в направлении нормали к об- рабатываемой поверхности сил маг- нитного поля на феррообразивное зерно, находящееся в рабочем зазоре при обработке наружных цилиндри- ческих поверхностей. Магнитное поле в рабочем зазоре неоднородно, вектор его индукции можно разло- жить на две составляющие \vec{B}' и \vec{B}'' (рис. 2а).

Мысленно рассечем зерно плоскостями, перпендикулярными

наибольшей оси, на множество элементарных участ- ков и рассмотрим один из них. Поскольку по его пе- риферии течет молекулярный ток, то поведение эле- ментарного участка в магнитном поле зазора можно уподобить поведению контура проводника с током в неоднородном магнитном поле. Под действием ин- дукции \vec{B}'' возникают радиальные силы, действующие по периферии участка в плоскости, перпендику- лярной направлению магнитных силовых линий. Эти силы взаимно уравниваются. Составляющая ин- дукции \vec{B}' вызывает возникновение силы, направленной вдоль вектора \vec{B}'' . На элементарную длину dl пе- риметра рассматриваемого участка действует сила:

$$df = J_m B' dl, \quad (3)$$

где J_m – молекулярный ток по периметру участка, возникший вследствие намагничивания зерна.

Учитывая, что $B' = B \sin \alpha$ (рис. 2а), и интегри- рую формулу (3), определим силу f , действующую на весь периметр участка L :

$$f = J_m B \sin \alpha \int_0^L dl = J_m B L \frac{\Delta r}{\Delta x}. \quad (4)$$

Радиальная сила, действующая на зерно ферро- образивного порошка, находящаяся в неоднородном магнитном поле:

$$f_p = \sum f = P_m \frac{\Delta B}{\Delta x}, \quad (5)$$

где P_m – магнитный момент зерна феррообразив- ного порошка.

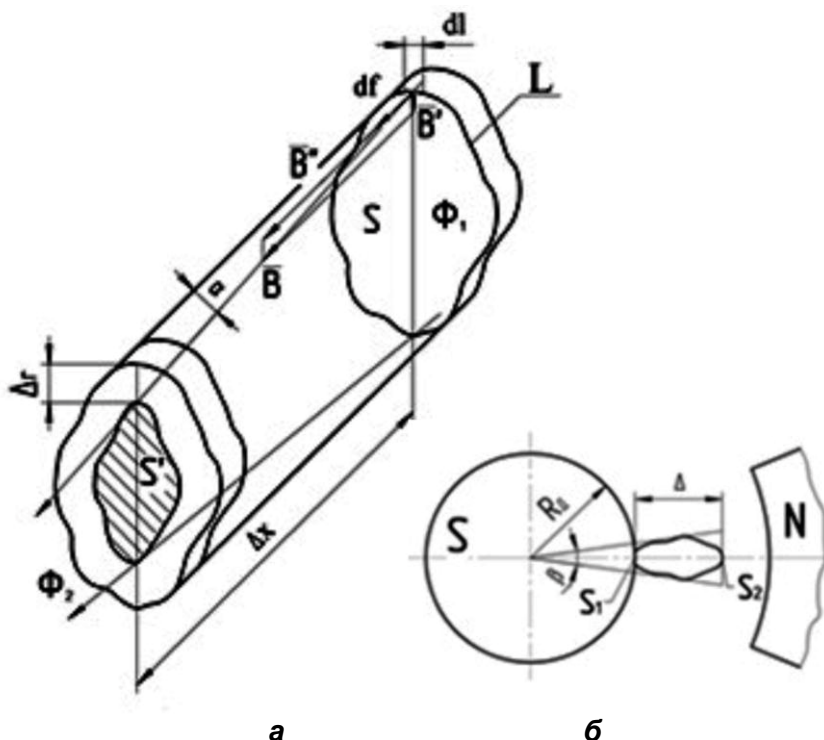


Рисунок 2. Схема расчета сил, действующих на зерно феррообразивного порошка нормально к поверхности детали: для элементарного участка (а) и на зерно в целом (б).

Определим величину градиента индукции магнитного поля, приняв за Δx наибольший размер зерна порошка – Δ (рис. 2б).

Тогда изменение индукции на расстоянии Δx :

$$\Delta B = \frac{\Phi}{S_1} - \frac{\Phi}{S_2}, \quad (6)$$

где Φ – магнитный поток;

S_1 и S_2 – площади сечений.

Так как $S_1 = R_d \beta b$ и $S_2 = (R_d + \Delta) \beta b$ то:

$$\Delta B = \frac{\Phi \Delta}{\beta b R_d (R_d + \Delta)}, \quad (7)$$

где R_d – радиус обрабатываемой поверхности, мм;

b – размер зерна в направлении оси детали (малая ось эллипсоида), мм;

β – угол между радиусами деталей, касательными к наибольшему сечению зерна в плоскости, перпендикулярной оси детали, град.

Тогда

$$\frac{\Delta B}{\Delta x} = \frac{\Phi}{\beta b R_d (R_d + \Delta)}. \quad (8)$$

Магнитный момент зерна порошка в форме эллипсоида вращения:

$$P_m = \frac{4}{3} K H_1 \Delta^2 b, \quad (9)$$

где K – магнитная восприимчивость материала ФАП;

H_1 – напряженность магнитного поля на нижней границе зерна, А/м;

Δ – размер большой оси эллипсоида, направленной вдоль магнитного поля, м.

Подставив (8) и (9) в выражение (7) и учитывая, что $\Phi = B_1 S_1 = \mu H_1 R_d \beta b$, для единичного зерна, получим:

$$f_p = \frac{4}{3} \frac{\mu \Delta^2 b K H_1^2}{R_d + \Delta}, \quad (10)$$

где μ – магнитная проницаемость материала порошка.

Так как образовавшаяся вдоль магнитных силовых линий поля цепочка состоит из нескольких зерен, то на граничащее с обрабатываемой поверхностью зерно будет действовать суммарная сила со стороны всех более удаленных от оси детали зерен:

$$f_{\Sigma} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_i^2}{R_i + \Delta_i}, \quad (11)$$

где n – число зерен в цепочке;

R_i – расстояние от начала i -го зерна до оси упрочняемой поверхности;

H_i – напряженность магнитного поля на границе i -го зерна;

Δ_i и b_i – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего i -е зерно.

Таким образом, ферроабразивные зерна под действием силы f_{Σ} прижимаются к обрабатываемой по-

верхности, создавая нормальную составляющую усилия резания.

При относительном перемещении ферроабразивных зерен и обрабатываемой поверхности возникает тангенциальная или главная составляющая усилия резания:

$$f_T = f_{N \text{ пц}} \cdot k_{\text{тр}}, \quad (12)$$

где $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения.

На основе проведенного расчета сил, действующих на ферроабразивное зерно, предложено для интенсификации процесса МАО на поверхностях полюсных наконечников создавать концентраторы магнитного поля по типу, приведенному на рисунке 3. Концентраторы магнитного поля представляют собой вставки, выполненные из немагнитного материала, образуя при этом паз, в котором величина магнитной индукции достигает требуемой величины для удержания ферроабразивных зерен в рабочем зазоре.

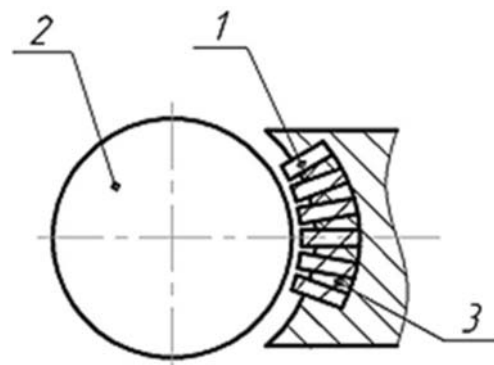


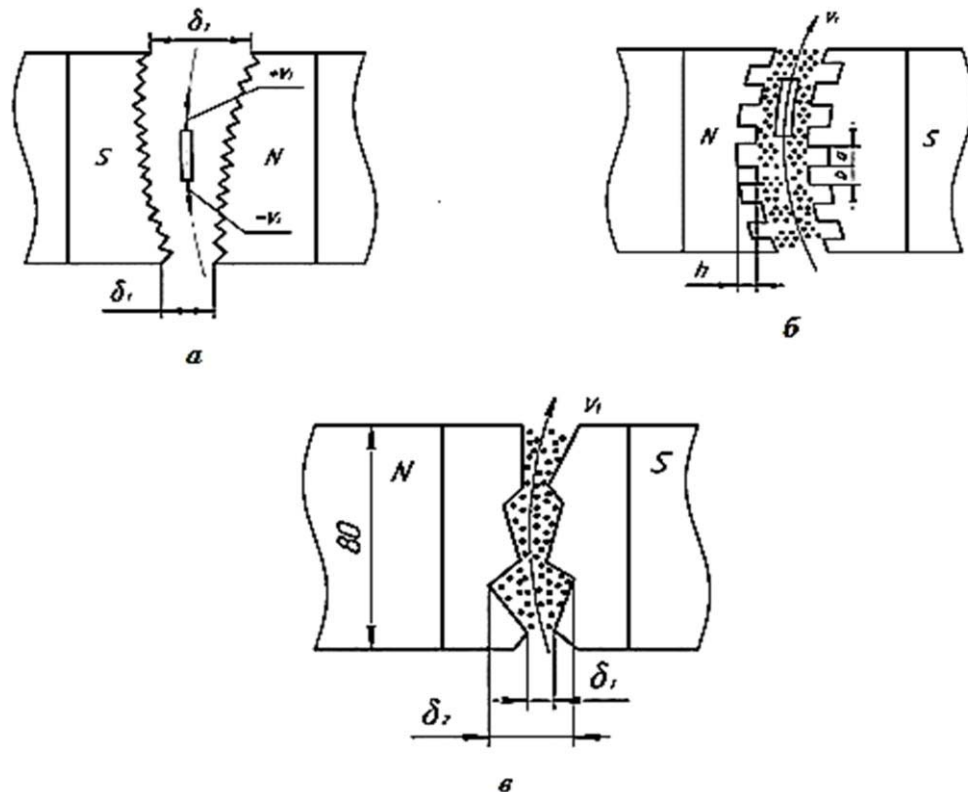
Рисунок 3. Схема конструктивного исполнения полюсного наконечника:

1 – полюсный наконечник; 2 – заготовка;
3 – вставка из немагнитного материала

Применение принципов концентрации магнитного потока позволяет увеличить градиент индукции магнитного поля в рабочем зазоре более чем на 50 %, а процесс ориентированного абразивного резания будет происходить наиболее интенсивно.

Установлено, что пространственное распределение магнитного потока зависит от формы и размеров концентраторов [10]. В работе [11] были изготовлены 16 пар полюсных наконечников и выполнен трехфакторный эксперимент, в котором переменными факторами были количество i пазов на рабочей поверхности полюсного наконечника, глубина пазов h , отношение ширины паза к ширине выступа a/b . Известно, что кромки ферромагнитного тела являются концентраторами магнитного потока и градиент магнитной индукции в ближайшей области направлен к кромке. Каждый из названных факторов варьировали на четырех уровнях в диапазонах: $i = 1 \div 4$, $h = 5 \div 20$ мм, $a/b = 0,5 \div 2$.

Экспериментально установлено, что из рассмотренных вариантов концентраторов магнитного потока полюсных наконечников (рис 4а,б,в) наименьший съем металла ($Q = 0,53$ мг/с) и наибольшую шерохо-



*Рисунок 4. Формы концентраторов магнитного потока полюсных наконечников:
а – I тип – зубчатая серповидная; б – II тип – шахматная; в – III тип комбинированная;
δ – рабочий зазор; h – глубина впадины; a – ширина паза; b – ширина концентратора*

ватость поверхности ($Ra = 0,4$ мкм) обеспечивает полюсный наконечник III типа (комбинированная конфигурация) (рис. 4в) по сравнению с полюсными наконечниками I типа, имеющую зубчатую серповидную конфигурацию (рис. 4а) и II типа, имеющую шахматную конфигурацию (рис. 4б). Таким образом, форма рабочего зазора изменяет топографию магнитного поля и пространственное распределение магнитного потока, которые до настоящего времени в полной мере не исследовались.

В работе [12] предложены три типа концентраторов магнитного потока. Однако при увеличении силы тока в рабочем зазоре не удастся достигнуть значения магнитной индукции, получаемой полюсным наконечником с гладкой рабочей поверхностью. Это связано с тем, что применение графических методов определения топографии электромагнитного поля (ЭМП) в зоне обработки не позволяет провести более строгий анализ динамического и кинематического факторов процесса MAO.

В работе [13] для обеспечения равномерности съема металла с различных участков профиля беговой дорожки подшипника были проведены исследования четырех видов форм полюсного наконечника (эквидистантный, плоский, радиусный с охватом ширины кольца, радиусный с охватом ширины дорожки подшипника). По результатам исследований выявлено, что

наиболее оптимальной схемой является использование серповидных полюсных наконечников с радиусным охватом ширины дорожки подшипника, которая обеспечивает равномерный процесс микрорезания по всей периферии беговой дорожки подшипника.

Заключение

В результате проведенных теоретических исследований обосновано, что процесс MAO будет проходить более интенсивно за счет увеличения на 50 % и более градиента магнитной индукции, которое достигается созданием на поверхности полюсных наконечников концентраторов магнитного поля. Рассмотрены различные формы концентраторов магнитного потока полюсных наконечников и выявлены наиболее оптимальные, которые обеспечивают повышение производительности MAO и качества обработанной поверхности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Филонов, И.П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И.П. Филонов, Ф.Ф. Климович, А.С. Козерук. – Минск: Дизайн ПРО, 1995. – 208 с.
2. Коновалов, Е.Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками /

Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев. – Минск: Наука и техника, 1967. – 125 с.

3. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 326 с.

4. Дечко, Э.М. Резание металлов и режущий инструмент: учеб. пособие / Э.М. Дечко, М.М. Дечко. – Минск: Высшая школа, 2020 – 287с.

5. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

6. Гриб, В.В. Лабораторные испытания материалов на трение и износ / В.В. Гриб, Г.Е. Лазарев. – М.: Наука, 1968. – 141 с.

7. Скворчевский, Н.Я. Научные основы повышения эффективности магнитно-абразивной обработки созданием сверхсильных магнитных полей и новых технологических сред: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / Н.Я. Скворчевский; БГПА. – Минск, 1994. – 35 с.

8. Акулович, Л.М. Микрорезание абразивными зернами при магнитно-абразивной обработке / Л.М. Акулович // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2015. – № 3. – С.49-59.

9. Акулович, Л.М. Интенсификация магнитно-абразивной обработки изменением угла наклона частиц ферроабразивного порошка при ориентированном резании / Л.М. Акулович, А.А. Тиунчик, О.Н. Ворошухо // Агропанорама. – 2018. – № 4. – С. 2-9.

10. Исследование герметичной синхронной машины дискового типа / С.В. Леонов [и др.] // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 23-25.

11. Барон, Ю.М. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса абразивной обработки деталей машин в магнитном поле: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.164 / Ю.М. Барон; ЛПИ. – Ленинград, 1969. – 22 с.

12. A.S. Bulatov. Magnetic concentrator from textured Dysprosium, contributed up to 7.6T / A.S. Bulatov, S.I. Goridov, M.A. Tichonovsky and S.I. Novikov // IEEE Transac. Magn. – 1992. – V. 28. – P. 502-504.

13. Акулович, Л.М. Магнитно-абразивная обработка цилиндрических канавок с радиусным профилем / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, О.Н. Ворошухо // Вестник БарГУ. Серия: технические науки. – 2018. – Вып. 6. – С.20-32.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.02.2022

Навесной оборотный плуг ПНО-3-40/55



Плуг навесной оборотный ПНО-3-40/50 предназначен для гладкой вспашки старопахотных не засоренных камнями почв с удельным сопротивлением до 0,09 МПа. Плуг агрегируется с тракторами класса 2,0 («Беларус 1221»).

Преимущества разработки:

- регулируемая ширина захвата;
- цена на 30-40% ниже зарубежных аналогов.

Производство плугов освоено на ДП «Минойтовский ремонтный завод».

В 2010 году на сельскохозяйственной выставке в г. Москве плуг удостоен золотой медали.

Основные технические данные

Тип.....	навесной
Тип корпуса.....	полувинтовой
Производительность за 1 ч сменного времени, га.....	0,65...1,14
Конструкционная ширина захвата корпуса, мм.....	400/450/500/550
Рабочая скорость движения на основных операциях, км/ч.....	7...9
Масса плуга конструкционная, кг.....	не более 1150
Конструкционная ширина захвата плуга, м.....	1,20/1,35/1,50/1,65