

---

УДК 621.923

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОСТЕЙ НА БАЗЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ИНДУКТОРА**

---

UDC 621.923

*M. P. Kulgeiko, A. P. Lepshiy, G. S. Kulgeiko*

**RESEARCH ON OPERABILITY OF A TOOL FOR MAGNETIC ABRASIVE PROCESSING OF PLANES BASED ON THE GENERALIZED MODEL OF A MAGNETIC INDUCTOR**

---

**Аннотация**

Представлены результаты экспериментальных исследований режущей способности инструмента из ферроабразивного порошка при магнитно-абразивной обработке плоскостей. Установлены зависимости производительности обработки от конструктивных и геометрических параметров магнитного индуктора с наклонным межполюсным пространством. Определены оптимальные значения изменяемых параметров полюсных наконечников.

**Ключевые слова:**

магнитно-абразивная обработка, магнитный индуктор, полюсные наконечники, производительность, оптимизация.

**Abstract**

The paper presents the results of experimental studies of the cutting ability of a tool made of ferroabrasive powder during magnetic abrasive processing of planes. The relationships between the processing productivity and the design and geometric parameters of a magnetic inductor with an inclined interpolar space have been established. The optimal values of changing parameters of the pole pieces have been determined.

**Keywords:**

magnetic abrasive processing, magnetic inductor, pole pieces, productivity, optimization.

---

**Введение**

Обеспечение высокого качества продукции, повышение производительности труда и эффективности общественного производства являются важнейшими задачами современного машиностроения. В решении задач, стоящих перед машиностроением, большое внимание отводится проблеме обеспечения надежности и долговечности деталей машин. А так как большинство деталей машин выходят из строя в результате износа и разрушения поверх-

ностей, то актуальной является проблема создания эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей. Таким образом, задача состоит в формировании поверхностного слоя материала, обладающего соответствующими функциональными свойствами.

В настоящее время широкое распространение находят комбинированные методы формирования поверхности, в том числе с использованием концентрированных потоков энергии [1–5]. Значительный интерес представляют технологии, основанные на применении

энергии электрических и магнитных полей, образующих совокупность магнитоэлектрических способов обработки [6–12]. Определенное место в ряду таких технологий занимает магнитно-абразивная обработка (МАО).

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, 5, 7, 12]. Метод МАО широко применяется для отделочно-зачистной обработки поверхностей различной геометрической формы: наружных и внутренних поверхностей вращения, плоскостей, фасонных поверхностей, стандартизованных и специальных профилей и т. п. [6, 12].

### ***Постановка задачи***

При магнитно-абразивной обработке плоскостей применяются в основном две принципиально различные схемы процесса. Основная особенность заключается в конструкции магнитного индуктора и, как следствие, кинематике процесса.

По первой схеме обработка осуществляется режущим инструментом, сформированным магнитным полем из ферроабразивного порошка на торцевой поверхности магнитного индуктора. Индуктор вращается относительно оси, перпендикулярной обрабатываемой поверхности детали. Ферроабразивный порошок, находящийся в рабочей зоне между торцем индуктора и поверхностью детали, под действием магнитного поля прижимается к обрабатываемой поверхности. При реализации рабочих движений в технологической системе осуществляется процесс обработки поверхности детали сформированным инструментом.

Для реализации процесса МАО по второй схеме применяется индуктор, состоящий из двух оппозитно расположенных полюсных наконечников, между которыми создается магнитное поле. Режущий инструмент формируется из ферроабразивного порошка на периферии индуктора в дугообразных магнитных потоках выпучивания. При обработке индуктор вращается вокруг оси, параллельной обрабатываемой поверхности, а рабочая зона охватывает близлежащую к образующей цилиндра область между индуктором и поверхностью детали. При вращении инструмента ферроабразивный порошок перемещается в сужающийся рабочий зазор и производит абразивное воздействие на поверхность детали.

Мощность потока выпучивания, под действием которого формируется инструмент, во многом определяется конструктивными и геометрическими параметрами полюсных наконечников. В [13] представлены результаты геометрического и магнитостатического анализа обобщенной модели индуктора для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей (рис. 1). Характерной особенностью представленного индуктора является формирование абразивного инструмента на периферии полюсных наконечников, образующих наклонное межполюсное пространство.

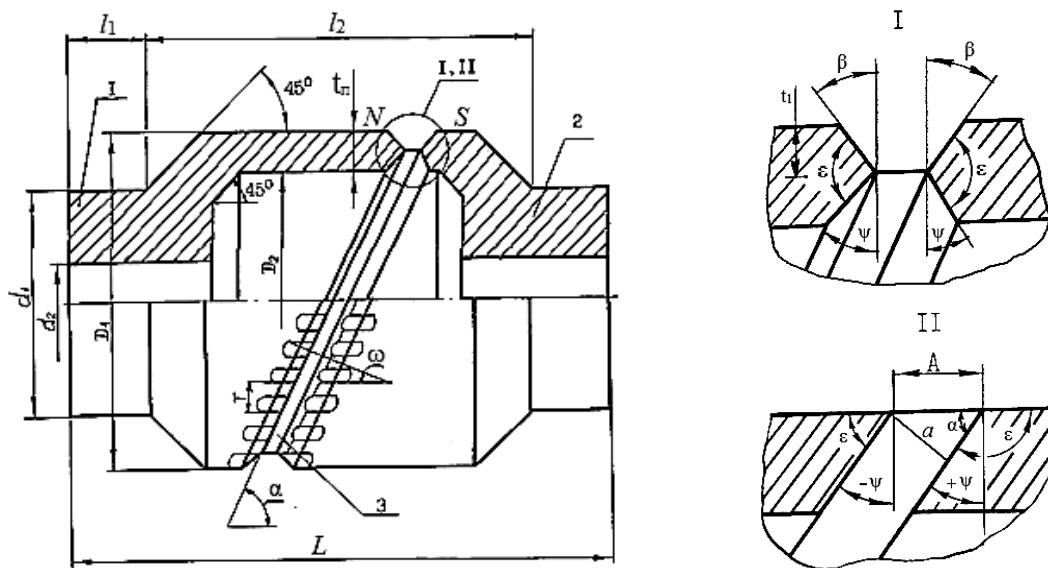


Рис. 1. Обобщенная модель магнитного индуктора

Индуктор состоит из двух полюсных наконечников 1 и 2, разделенных немагнитной прокладкой 3, 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;  $\alpha$  – угол наклона торцевой поверхности полюса к его оси вращения;  $\psi$  и  $\beta$  – внутренний и наружный углы скоса торцевой поверхности полюса, соответственно;  $\varepsilon$  – угол заострения торцевой поверхности полюса;  $T$  и  $\omega$  – 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 торцевым поверхностям;  $A$  – осевой межполюсный зазор, т. е. расстояние между полюсами вдоль оси вращения индуктора.

Ранее выполненные исследования обобщенной модели индуктора позволили установить взаимосвязь геометрических параметров индуктора и их влияние на распределение магнитных потоков в межполюсном пространстве и рабочей области инструмента. Были опре-

делены особенности и закономерности формирования магнитного поля в рабочей зоне при изменении геометрии полюсных наконечников. Однако, для обоснованной оценки эффективности принятых решений и практической реализации технологии требуется проведение исследований по работоспособности инструмента, сформированного на базе оригинальной модели магнитного индуктора.

### Цель исследования

Оптимизация конструктивных и геометрических параметров полюсных наконечников индуктора для обработки плоскостей.

### Объект и методика исследований

Объектом исследований является инструмент из ферроабразивного порошка, сформированный с использованием индуктора с изменяющимися параметрами. Изучалось влияние варьируемых конструктивных и геометрических параметров полюсных наконечников на производительность процесса обработки латуни Л62 и нержавеющей стали X18H10T.

Решение поставленной задачи осуществлялось на основе построения математических моделей влияния отдельных параметров на процесс обработки. Исследования проводились с использованием планирования эксперимента и математической обработки данных. Параметром оптимизации принят удельный весовой съем материала  $\Delta q$ . Независимыми переменными выбраны основные параметры полюсных наконечников. Постоянными факторами при обработке приняты следующие: скорость вращения индуктора  $V_{\Gamma} = 1,7$  м/с; скорость подачи заготовки  $S = 45$  мм/мин; время обработки  $\tau = 1$  мин; величина рабочего зазора  $\delta = 2,5$  мм; зернистость абразивного порошка  $\Delta = (-315 + 100)$  мкм; смазочно-охлаждающая жидкость – 5-процентный раствор «Аквол-10» в воде.

На основе предварительных исследований установлено, что одномерные зависимости функции выхода представляют собой кривые, близкие к кривым второго порядка. Поэтому искомые зависимости находили в виде уравнений регрессии второй степени. Полученные уравнения представляли в натуральных значениях факторов и строили графические зависимости, на основе которых выполнен анализ результатов исследований.

## Основная часть

**Влияние угла наклона полюсов и межполюсного зазора.** На рис. 2 представлены графики зависимости удельного съема материала при обработке индуктором с обычным (см. рис. 2, а) и увеличенным (см. рис. 2, б) межполюсным зазором  $a$ . Анализ данных зависимостей показывает, что для индуктора с нормальным зазором практически для всех углов наклона торцов полюсных наконечников  $\alpha$  максимум производительности наблюдается при величине зазора  $a$  от 7 до 9 мм. При этом, с уменьшением угла наклона максимум удельного съема смещается в сторону меньших значений  $a$ , что в общем согласуется с характером распределения магнитного поля в рабочем зазоре и межполюсном пространстве [13]. С увеличением магнитной индукции потока выпучивания повышается жесткость абразивного инструмента и, соответственно, его режущая способность. В [13] было установлено, что при межполюсном зазоре  $a = 7 \dots 9$  мм магнитная индукция в рабочем зазоре имеет максимальное значение, чему соответствует максимум удельного съема материала с обрабатываемой поверхности.

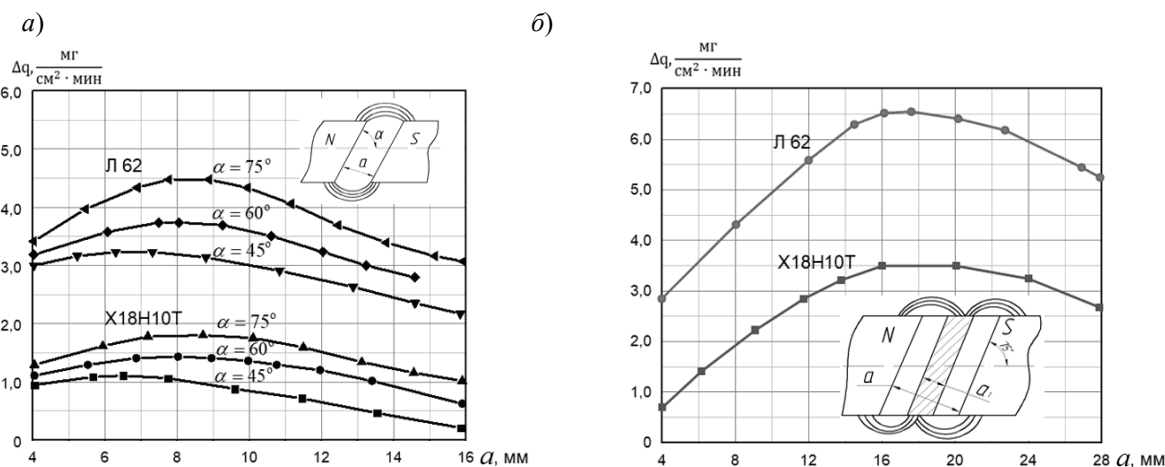


Рис. 2. Зависимость удельного съема материала ( $\Delta q$ ) при обработке индуктором с обычным (а) и увеличенным (б) межполюсным зазором ( $\alpha = 75^\circ$ )

Увеличение угла наклона межполюсного пространства  $\alpha$  позволяет увеличить ширину режущего инструмента. Однако при этом происходит смещение максимума магнитной индукции от середины полюсов в сторону полюса с острым углом  $\varepsilon$  и к увеличению осевого зазора  $A$  при той же величине нормального зазора  $a$  [13]. В результате происходит ослабление магнитного поля, удерживающего порошок, жесткость абразивного инструмента уменьшается, наблюдается выброс зерен порошка с рабочей зоны и поверхности полюсов, а, следовательно, производительность процесса снижается. Таким образом, рекомендуемое значение угла наклона полюсов составляет  $\alpha \geq 75^\circ$ , а величина межполюсного зазора находится в пределах  $7 \leq a \leq 9$  мм.

Известно, что если ферромагнитный материал поместить во внешнее магнитное поле, то он выступает в качестве концентратора магнитного потока. Поэтому размещение в межполюсном пространстве магнитного индуктора прокладки из ферромагнитного материала позволит значительно увеличить расстояние между полюсами без существенной потери жесткости инструмента. Такая конструкция магнитного индуктора обеспечивает замыкание магнитного потока выпучивания с полюсов через магнитную прокладку с образованием двойной абразивной щетки. Тем самым увеличивается ширина инструмента и, соответственно, площадь обрабатываемой поверхности.

Исследование производительности MAO индуктором с ферромагнитной прокладкой проводилось при постоянных факторах, описанных выше. Угол наклона полюсов принят  $\alpha = 75^\circ$ , толщина прокладки из стали Ст 3  $a_1 = 3$  мм, межполюсный зазор изменялся в пределах от 4 до 28 мм с интервалом 4 мм.

Из результатов исследований (см. рис. 2, б) видно, что наличие ферромагнитной прокладки позволяет обеспечить максимум производительности при

межполюсном зазоре  $a = 16 \dots 20$  мм. При этом удельный съем материала увеличивается до  $\Delta q = 6,85$  мг/см<sup>2</sup>·мин при обработке латуни Л62 и  $\Delta q = 3,74$  мг/см<sup>2</sup>·мин при обработке стали X18H10T.

Анализ зависимостей  $\Delta q = f(a)$  при MAO обычным индуктором (без прокладки (см. рис. 2, а)) и с ферромагнитной прокладкой (см. рис. 2, б)) показывает, что при малых зазорах (до 7 мм) удельный съем материала в первом случае больше, чем при обработке индуктором с прокладкой. По мере увеличения межполюсного зазора производительность увеличивается, причем во втором варианте с большей интенсивностью. Ранее [13] было установлено, что наибольшая магнитная индукция потока выпучивания наблюдается при зазоре  $7 \leq a \leq 9$  мм и соотношении  $B_O/B_B \approx 1,0$ , где  $B_O$  и  $B_B$  – величина магнитной индукции основного потока и потока выпучивания соответственно. Поэтому увеличение зазора между полюсом и прокладкой до 7 мм, что соответствует  $a = 17$  мм для индуктора с прокладкой, способствует увеличению магнитного потока выпучивания и, следовательно, повышению производительности обработки. Внесение ферромагнитного материала (в данном случае – прокладки) во внешнее магнитное поле усиливает последнее. Поэтому, если у обычного магнитного индуктора при зазоре более 9 мм наблюдается значительный выброс ферроабразивного порошка, то применение прокладки позволяет увеличить межполюсный зазор до  $a = 16 \dots 20$  мм. При этом производительность обработки повышается в 1,4–1,9 раза по сравнению с обычным индуктором.

**Влияние угла заострения.** Угол заострения  $\varepsilon$  находится в геометрической зависимости с другими углами, определяющими форму торцевой поверхности полюсов ( $\beta + \varepsilon + \psi = 180^\circ$ ). Поэтому в качестве изменяемого независимого параметра принят угол  $\psi$  при  $\beta = 0^\circ$ . Выбор угла  $\beta = 0^\circ$  основан на

следующих соображениях. При увеличении угла  $\beta$  увеличивается расстояние между полюсами на периферии индуктора, т. е. в зоне формирования абразивного инструмента. А, следовательно, перераспределение магнитных потоков приводит к увеличению магнитного поля внутри полюсов  $B_0$  и уменьшению сил магнитного поля  $B_B$ , формирующего инструмент. Соответственно уменьшается жесткость инструмента, его режущая способность и производительность процесса обработки.

Конфигурация межполюсного пространства магнитного индуктора зависит также от параметра  $t_1$  (см. рис. 1), опре-

деляющего положение минимального внутреннего расстояния между торцами полюсных наконечников. Учитывая, что от этого параметра зависит положение концентраторов магнитного поля  $B_0$ , принимаем  $t_1$  постоянным и конструктивно равным 3 мм. Другие параметры, формирующие межполюсное пространство, принимаем предельными из области оптимума:  $\alpha = 75^\circ$ ,  $a = 9$  мм. Независимый параметр – внутренний угол скоса торцевой поверхности полюса  $\psi$  – изменяли в пределах от  $0$  до  $60^\circ$  с интервалом  $15^\circ$ , что соответствует изменению  $\varepsilon$  от  $180$  до  $120^\circ$  (рис. 3).

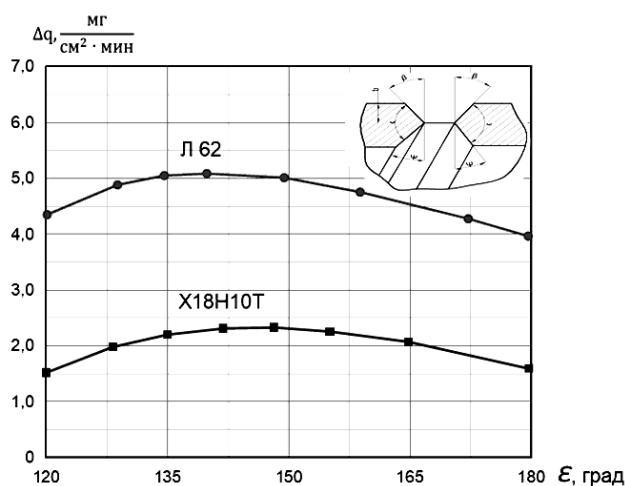


Рис. 3. Зависимость удельного схода материала ( $\Delta q$ ) от угла заострения ( $\varepsilon$ )

С увеличением  $\psi$ , т. е. уменьшением угла  $\varepsilon$  увеличивается расстояние между полюсами во внутренней области индуктора. Это приводит к перераспределению магнитных потоков в сторону уменьшения  $B_0$  и, соответственно, увеличению потока  $B_B$ , формирующего инструмент. В связи с этим увеличивается интенсивность схода материала и достигает максимума при  $\varepsilon = 135 \dots 150^\circ$ . Так, удельный сход при обработке стали Х18Н10Т и латуни Л62 составляет  $\Delta q = 2,54$  мг/(см<sup>2</sup>·мин) и  $\Delta q = 5,36$  мг/(см<sup>2</sup>·мин) соответственно. Дальнейшее увеличение угла  $\varepsilon$  приводит к возрастанию основного магнитно-

го потока  $B_0$ , проходящего через торцы полюсных наконечников, и уменьшению жесткости и режущей способности инструмента. Производительность процесса обработки снижается.

Таким образом, обеспечение равенства угла заострения на противоположных торцах полюсных наконечников в пределах  $\varepsilon = 135 \dots 150^\circ$  позволяет повысить производительность обработки плоскостей на  $15 \dots 20\%$ .

**Влияние концентраторов магнитного поля.** Исследования проводились с целью определения целесообразности и эффективности применения

концентраторов магнитного поля в конструкции представленного индуктора. Изучалось влияние шага  $T$  (частоты), глубины  $t$  и угла расположения  $\omega$  концентраторов на производительность обработки.

На основании априорной информации [6–12] и предварительных исследований формой концентраторов принята трапеция с углом при вершине  $60^\circ$ . При этом полюсные наконечники маг-

нитного индуктора имели следующие основные геометрические параметры (см. рис. 1):  $D_1 = 100$  мм;  $D_2 = 86$  мм;  $\alpha = 75^\circ$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  $\psi = 30^\circ$ ;  $a = 9$  мм;  $\varepsilon = 150^\circ$ .

В качестве геометрической интерпретации результатов исследования на рис. 4 представлены графики зависимости удельного съема материала от каждого из факторов процесса при фиксированных значениях остальных факторов.

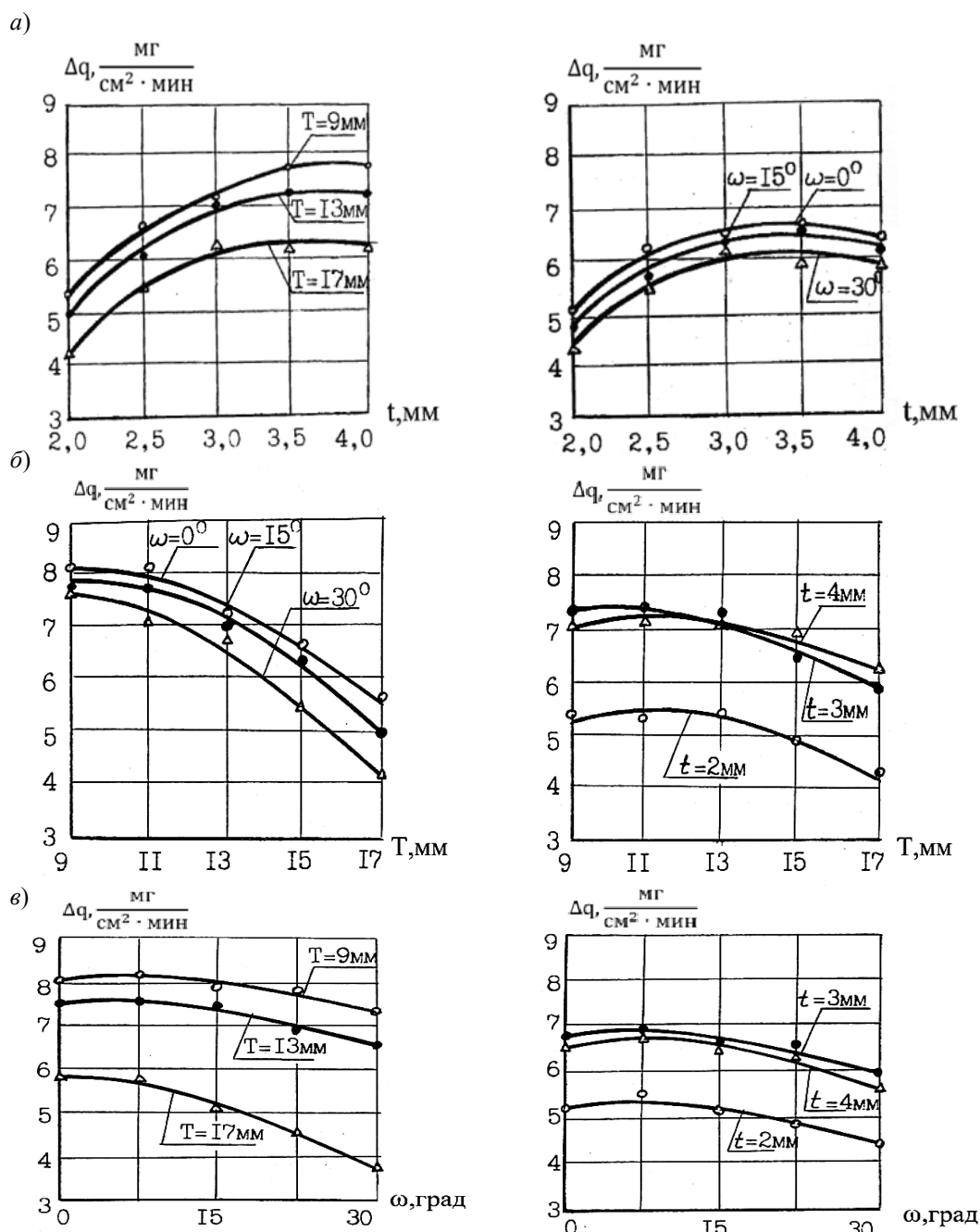


Рис. 4. Зависимость удельного съема материала от: а – глубины  $t$ ; б – шага  $T$ ; в – направления  $\omega$  концентраторов

Влияние глубины концентратора на удельный съём металла (см. рис. 4, а) носит сложный характер. Увеличение глубины  $t$  до 3,0...3,5 мм способствует повышению интенсивности обработки. Происходит это благодаря более плотному удержанию порошка как за счет механического зацепления во впадинах концентраторов, так и за счет неоднородности магнитного поля, создания градиента магнитной индукции на кромках концентраторов по периферии полюсов. Дальнейшее увеличение глубины концентраторов не отражается на конфигурации магнитного поля, а приводит к уменьшению магнитного потока выпучивания, т. к. уменьшается периферийная площадь торцевой поверхности полюсов. Уменьшается режущая способность сформированного инструмента и производительность процесса обработки снижается.

Увеличение шага  $T$  при постоянной ширине концентраторов ( $b = 4$  мм) приводит к уменьшению количества выступов с 35 до 21 (при  $T = 9$  мм и  $T = 17$  мм, соответственно), что уменьшает площадь рабочей поверхности полюсов и, прежде всего, в периферийной зоне, где формируется инструмент. Этим объясняется убывающий характер зависимости производительности обработки от шага концентраторов (см. рис. 4, б).

Изменение угла расположения концентраторов относительно направления магнитного поля незначительно влияет на величину удельного съема материала, обеспечивая максимальное его значение при  $\omega$  до  $15^\circ$  (см. рис. 4, в). Объясняется это тем фактором, что благодаря наклонному расположению полюсных наконечников образуется угол

между вектором магнитной индукции и направлением концентраторов. Поэтому для создания осевой составляющей скорости перемещения зерен порошка, их переориентации и обновления режущих кромок дополнительный поворот концентраторов не требуется.

Таким образом, для повышения производительности процесса обработки могут быть рекомендованы следующие параметры концентраторов магнитного поля на периферии полюсных наконечников: шаг  $T = 9...11$  мм; глубина  $t = 3,0...3,5$  мм; угол направления  $\omega = 0...15^\circ$ .

### Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить рациональные конструктивные и геометрические параметры магнитного индуктора для обработки плоскостей. Результаты исследований согласуются с данными магнитостатического анализа обобщенной модели индуктора и закономерностями формирования абразивного инструмента с наклонным расположением межполюсного пространства.

Изменение конструкции индуктора путем размещения в межполюсном пространстве ферромагнитной прокладки позволяет увеличить ширину сформированного инструмента и, соответственно, площадь обработки, что обеспечивает повышение производительности процесса в 1,4–1,9 раз.

Установлены оптимальные геометрические параметры полюсных наконечников, обеспечивающие формирование эффективного режущего инструмента.

### 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: 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: ТНТ, 2012. – 280 с.



3. **Паркин, А. А.** Технология обработки концентрированными потоками энергии / А. А. Паркин. – Самара: СГТУ, 2004. – 494 с.
4. **Рогов, В. А.** Технология конструкционных материалов. Обработка концентрированными потоками энергии / В. А. Рогов, А. Д. Чудаков, Л. А. Ушомирская. – Москва: Юрайт, 2019..
5. 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: Беларуская навука, 2013. – 463 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: Наука и техника, 1988. – 270 с.
8. **Кожуро, Л. М.** Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
9. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: ФТИ НАНБ, 1997. – 415 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. **Кульгейко, М. П.** Анализ обобщенной модели индуктора для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестн. БрГТУ. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 4 (117). – С. 100–103.

*Статья сдана в редакцию 10 июня 2020 года*

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

**Александр Парфенович Лепший**, канд. техн. наук, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого.

**Галина Степановна Кульгейко**, ст. преподаватель, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого.

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

**Alexander Parfenovich Lepshiy**, PhD (Engineering), Associate Prof., P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel.

**Galina Stepanovna Kulgeyko**, senior lecturer, P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel.