

УДК 621.787

А. М. Довгалев

РАЗРАБОТКА МАГНИТНЫХ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ

UDC 621.787

A. M. Dovgalev

DEVELOPMENT OF MAGNETIC SYSTEMS OF COMBINED TOOLS FOR CONCURRENT MAGNETIC DYNAMIC ROLLING

Аннотация

В работе представлены конструкции магнитных систем комбинированных инструментов, обеспечивающих совмещенное магнитно-динамическое накатывание внутренних, наружных и плоских поверхностей ферромагнитных деталей. Разработанные магнитные системы на основе цилиндрических постоянных магнитов из редкоземельных материалов имеют компактные размеры и позволяют получить вращающееся магнитное поле, необходимое для сообщения колебательных движений деформирующим шарам инструмента и магнитного воздействия на поверхностный слой ферромагнитных деталей.

Ключевые слова:

комбинированный инструмент, деформирующие шары, постоянные магниты, магнитопроводы, магнитный поток, магнитное воздействие, накатывание.

Abstract

Designs of magnetic systems of combined tools providing concurrent magnetic dynamic rolling of internal, external and flat surfaces of ferromagnetic parts are presented. The developed magnetic systems based on cylindrical permanent magnets from rare-earth materials have compact dimensions and make it possible to obtain a rotating magnetic field necessary for communicating oscillating movements to the deforming balls of the tool and magnetic action on the surface layer of ferromagnetic parts.

Key words:

combined tools, deforming balls, permanent magnets, magnetic circuits, magnetic flux, magnetic impact, rolling.

Введение

В последнее десятилетие существенно увеличились силовые характеристики различных механизмов и технических систем. В связи с этим для обеспечения требуемой долговечности необходимо повышать качественные и эксплуатационные характеристики входящих в их состав ответственных деталей. Это делает актуальной задачу разработки новых и совершенствование существующих методов поверхностного

упрочнения деталей машин. Особая роль отводится созданию новых методов поверхностного пластического деформирования, являющихся универсальными, экологически чистыми, реализуемыми на существующем металло-режущем оборудовании [1–3].

В Белорусско-Российском университете разработан инновационный метод совмещенной упрочняющей обработки поверхностей ферромагнитных деталей концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного по-



ля и динамическим поверхностным деформированием (далее – метод совмещенного магнитно-динамического накачивания) [4–6]. При этом динамическое поверхностное пластическое деформирование ферромагнитных деталей осуществляют деформирующими шарами, свободно установленными в кольцевой камере, получающими колебательные движения от вращающегося магнитного поля, создаваемого магнитной системой комбинированного инструмента [7–10]. Для реализации процесса совмещенного магнитно-динамического накачивания (МДН) предложено комбинированные инструменты выполнить с двумя независимыми магнитными системами (МС), использующими в качестве источников магнитного поля электромагниты [11–13] или постоянные магниты различных конфигураций [14]. С целью обеспечения минимальных габаритных размеров комбинированных инструментов целесообразно их МС конструировать на основе постоянных магнитов из редкоземельных материалов, имеющих высокие магнитные свойства.

Анализ существующих конструкций инструментов для совмещенного МДН показывает, что их важнейшими составными частями являются две независимые МС, предназначенные для сообщения деформирующим шарам рабочих колебательных движений и магнитного воздействия на упрочняемый поверхностный слой ферромагнитной детали соответственно.

Магнитные системы, обеспечивающие сообщение деформирующим шарам инструмента колебательных движений. Как правило, в состав таких МС входят источник (источники) магнитного поля, магнитопроводы и деформирующие или приводные шары (далее – шары) инструмента. Разработанные конструкции МС различаются конфигурацией и материалом используемых источников магнитного поля, их числом и пространственным расположением в инструменте, а также количе-

ством и формой магнитопроводов.

Каждая из конструкций МС инструментов имеет свою особенность и область применения. Так, в МС, представленной на рис. 1, а, в качестве источников магнитного поля используют призматические постоянные магниты 1, установленные в радиальных пазах 2 диска 3 с идентичным или последовательным чередованием полюсов N и S . Магнитный поток от источников магнитного поля 1 замыкается на деформирующие шары 4. Остальные элементы инструмента (корпус, оправка и т. д.) не входят в состав МС, т. к. изготовлены из немагнитопроводных материалов. Данная конструкция МС проста в изготовлении и не имеет магнитопроводов. Однако она предусматривает клеевое соединение призматических постоянных магнитов 1 с диском 3. Это делает конструкцию МС неразъемной.

Указанного недостатка не имеет МС, изображенная на рис. 1, б, в которой в качестве магнитопроводов применяют зубчатые кольцевые диски 2, 3, позволяющие концентрировать магнитное поле непосредственно в зоне расположения деформирующих шаров 4 инструмента. МС является разборной и легко переналаживается на другой типоразмер обрабатываемых деталей [15].

Недостатком МС, представленной на рис. 1, в, является наличие кольцевого постоянного магнита с диаметром, соответствующим габаритному размеру обрабатываемой детали. Это исключает модульный принцип проектирования МС комбинированных инструментов, предназначенных для осуществления совмещенного МДН.

На рис. 1, в изображена конструкция МС, в состав которой входят: цилиндрические постоянные магниты 1, 2; кольцевой магнитопровод 3 с периодической поверхностью 4 (в виде синусоиды, выступов или зубьев); обоймы 5, 6 с аксиальными отверстиями 7, 8; деформирующие шары 9. Цилиндрические постоянные магниты 1, 2 установ-



лены с равномерным угловым шагом в аксиальных отверстиях 7, 8 обойм 5, 6, выполненных из немагнитопроводного материала; они позволяют использовать модульный принцип при проектировании

МС инструментов. При этом изменяются только габаритные размеры обойм 5, 6, расположение аксиальных отверстий 7, 8 и количество цилиндрических постоянных магнитов 1, 2.

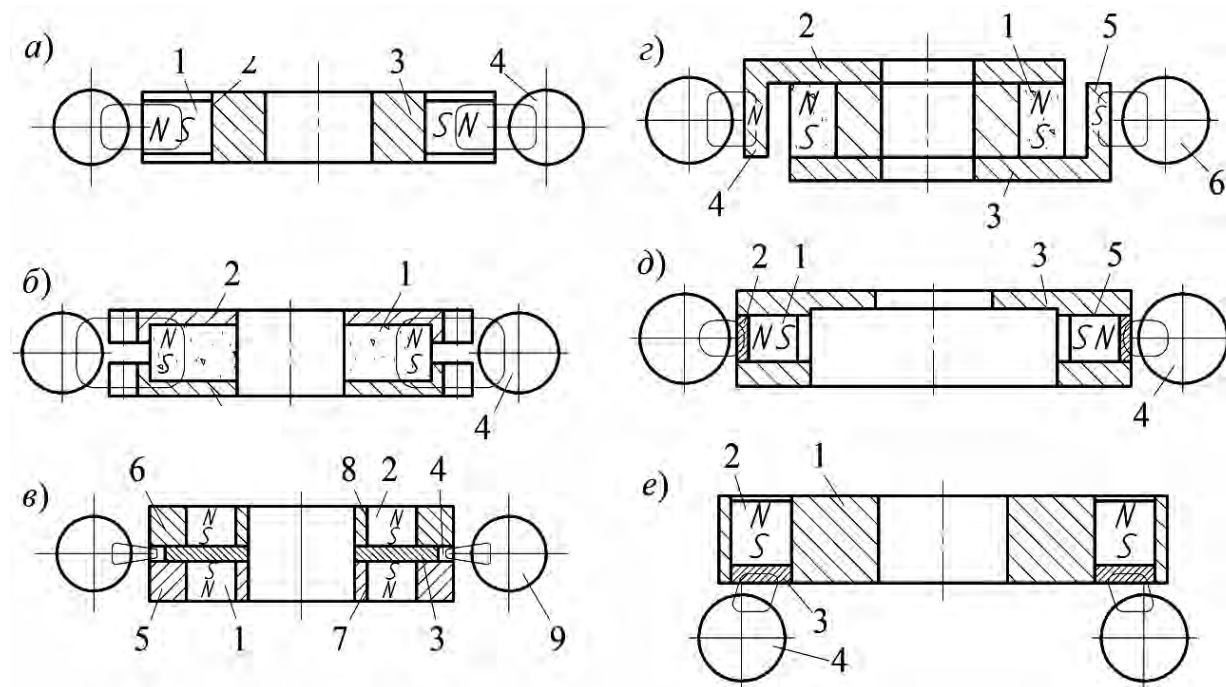


Рис. 1. Конструкции МС инструментов для сообщения деформирующим шарам колебательных движений: *а* – с призматическими постоянными магнитами; *б* – с кольцевым постоянным магнитом и зубчатыми кольцевыми магнитопроводными дисками; *в* – с аксиально расположенными цилиндрическими постоянными магнитами и кольцевым магнитопроводом с периодической поверхностью; *г* – с кольцевым постоянным магнитом осевой намагниченности и зубчатыми магнитопроводами; *д* – с радиально расположенными цилиндрическими постоянными магнитами и магнитопроводами; *е* – с аксиально расположенными цилиндрическими постоянными магнитами и магнитопроводами

МС, указанная на рис. 1, *г*, имеет кольцевой постоянный магнит 1 осевой намагниченности и магнитопроводы 2, 3 с торцовыми зубьями 4, 5. Магнитопроводы 2, 3 взаимодействуют с торцами кольцевого магнита 1, а их торцовые зубья направлены навстречу друг к другу, смещены по углу и расположены с зазором во впадинах сопрягаемых зубьев. При вращении магнитной системы магнитное поле, сфокусированное на торцах зубьев 5, 6 (с полюсами *N* и *S*), периодически действует на деформирующие шары 6 и сообщает им рабочие колебательные движения. Данная МС обеспечивает воздействие на деформирующие шары инструмента перемен-

ным магнитным полем, что повышает эффективность процесса совмещенного МДН. Одним из недостатков такой МС является сложность изготовления кольцевых магнитопроводов с торцовыми зубьями.

Более технологичной является МС, изображенная на рис. 1, *д*. Она включает цилиндрические постоянные магниты 1, магнитопроводы 2, обойму 3, деформирующие шары 4. Обойма 3 выполнена из немагнитопроводного материала. Цилиндрические постоянные магниты 1 и магнитопроводы 2 установлены в радиальных отверстиях 5 обоймы 3. МС обеспечивает периодическое воздействие вращающимся магнитным полем



на деформирующие шары 4 инструмента. В результате повышаются частота ударов деформирующих шаров 4 по упрочняемой поверхности детали и эффективность упрочняющей обработки [16].

На рис. 1, *е* изображена МС инструмента с выводом магнитного поля на ее торец. Конструкция содержит: обойму 1; цилиндрические постоянные магниты 2, расположенные в аксиальных отверстиях; магнитопроводы 3; деформирующие шары 4. Такая МС характеризуется компактностью и обеспечивает повышение жесткости связи деформирующих шаров с корпусом инструмента [17].

Выбор той или иной конструкции МС инструмента, сообщающей деформирующим шарам колебательные движения, определяется свойствами материала упрочняемой детали, требуемыми характеристиками упрочнения, количеством упрочняемых деталей (типом производства), видом имеющихся в наличии постоянных магнитов и рядом других факторов.

Магнитные системы, обеспечивающие магнитное воздействие на упрочняемую поверхность ферромагнитных деталей. Конструкции МС комбинированных инструментов, обеспечивающих намагничивание поверхностного слоя ферромагнитных деталей, зависят от вида упрочняемых поверхностей (внутренние или наружные цилиндрические поверхности, плоская поверхность и т. д.) и, как правило, содержат постоянные магниты (или электромагниты) соответствующих конфигураций, а также держатели и магнитопроводы. На рис. 2, *а–з* изображены разработанные МС инструментов, предназначенные для намагничивания поверхности ферромагнитных деталей и содержащие в качестве источников магнитного поля цилиндрические постоянные магниты.

Конструкция МС, показанная на рис. 2, *а*, содержит немагнитопроводящие диски 1, 2 с радиальными отверсти-

ями 3, 4, цилиндрические постоянные магниты 5, 6, магнитопроводы 7, 8. Деформирующие шары 9 фактически не входят в состав данной МС, т. к. замыкание на них силовых линий магнитного потока несущественно. Магнитопроводы 7, 8 устанавливаются к упрочняемой цилиндрической поверхности ферромагнитной втулки 10 с требуемым зазором. При вращении дисков 1, 2 инструмента осуществляется воздействие на поверхность втулки 10 вращающимся переменным магнитным полем. При расположении цилиндрических магнитов 5, 6 в радиальных отверстиях 3, 4 с чередованием полюсов *N* и *S* обеспечивается перемагничивание поверхностного слоя ферромагнитной втулки 9 с изменением направления силовых линий магнитного поля на 180° .

Особенность данной конструкции МС – достаточно большие габаритные размеры. Кроме того, имеет место рассеивание магнитного потока от цилиндрических постоянных магнитов 5, 6, что снижает эффективность магнитного воздействия на упрочняемый поверхностный слой.

Этих недостатков не имеет МС, изображенная на рис. 2, *б*, характеризующаяся компактностью осевых размеров и исключением рассеивания магнитного потока от источников магнитного поля. В ее состав входят шайба 1, диск 2 с аксиальными отверстиями 3, цилиндрические постоянные магниты 4, кольцевой магнитопровод 5, деформирующие шары 6. Шайба 1 и диск 2 выполнены из немагнитопроводящих материалов.

Кольцевой магнитопровод 5 инструмента устанавливается к поверхности ферромагнитной втулки 7 с требуемым зазором. При вращении кольцевого магнитопровода 5 и деформирующих шаров 6 осуществляется воздействие на внутреннюю поверхность втулки 7 вращающимся постоянным магнитным полем. При необходимости воздействия на упрочняемую поверхность переменным



магнитным полем магнитопровод 5 выполняют с периодической наружной по-

верхностью (в виде синусоиды, выступов, зубьев и т. д.).

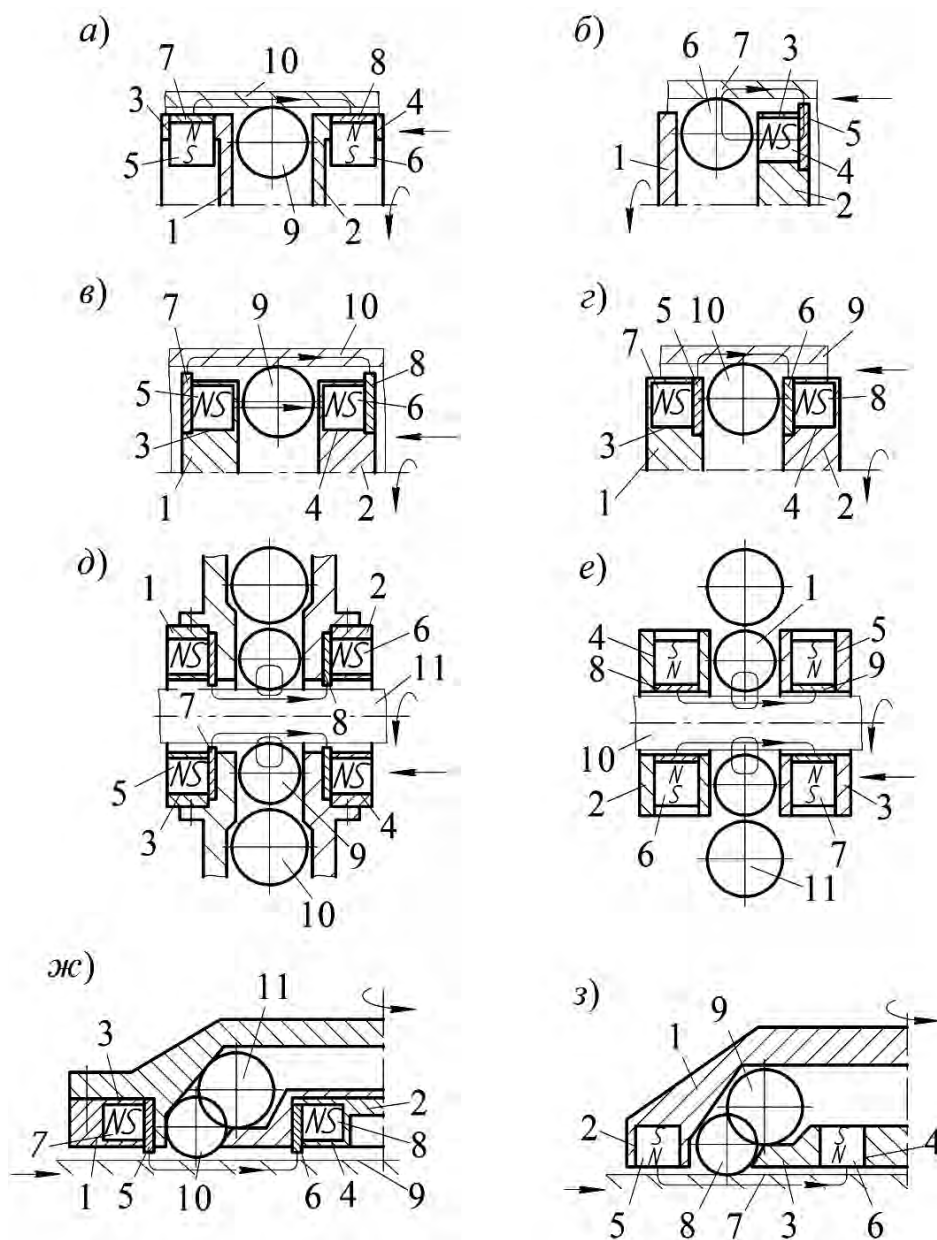


Рис. 2. Конструкции МС, обеспечивающих магнитное воздействие на: а, б, в, г – внутренние цилиндрические поверхности тел вращения; д, е – наружные цилиндрические поверхности тел вращения; ж, з – плоские поверхности ферромагнитных деталей

Особенностью рассматриваемой МС является притягивание магнитной силой деформирующих шаров 6 к поверхности втулки 7, что снижает характеристики их колебаний и эффективность процесса динамического упрочнения.

На рис. 2, в представлена МС инструмента, обеспечивающая повыше-

ние характеристик магнитного поля, действующего на поверхность ферромагнитной детали. Она содержит: немагнитопроводы 1, 2 с аксиальными отверстиями 3, 4; цилиндрические постоянные магниты 5, 6; магнитопроводы 7, 8 с цилиндрическим (для воздействия постоянным магнитным полем) или



периодическим профилем (для воздействия переменным магнитным полем); деформирующие шары 9.

Магнитопроводы 7, 8 устанавливаются с зазором к внутренней цилиндрической поверхности детали 10. Магнитный поток от цилиндрических постоянных магнитов 5, 6 замыкается через магнитопроводы 7, 8, деформирующие шары 9 и поверхность детали 10, что исключает его рассеивание.

Однако вследствие притяжения магнитной силой деформирующих шаров 9 к намагниченной поверхности детали 10 снижается их динамическая активность.

Представленная на рис. 2, *г* МС не оказывает существенного магнитного воздействия на деформирующие шары инструмента и не снижает параметры их динамического воздействия на упрочняемую поверхность детали.

МС включает немагнитопроводные шайбы 1, 2 с аксиальными отверстиями 3, 4, кольцевые магнитопроводы 5, 6, цилиндрические постоянные магниты 7, 8. Магнитный поток от цилиндрических постоянных магнитов 7, 8 через кольцевые магнитопроводы 5, 6 замыкается на поверхность ферромагнитной втулки 9. Магнитное воздействие на деформирующие шары 10 инструмента при этом незначительно.

Для намагничивания поверхности ферромагнитного вала постоянным магнитным полем предназначена МС, изображенная на рис. 2, *д*. В состав МС входят обоймы 1, 2 с аксиальными отверстиями 3, 4, цилиндрические постоянные магниты 5, 6, кольцевые магнитопроводы 7, 8. Обоймы 1, 2 изготовлены из немагнитопроводных материалов и установлены симметрично относительно деформирующих шаров 9.

Упрочняемый ферромагнитный вал 10 устанавливают с зазором относительно кольцевых магнитопроводов 7, 8. Магнитный поток от цилиндрических постоянных магнитов 5, 6 через магнитопроводы 7, 8 замыкается на поверх-

ность вала 10, придавая ему магнитные свойства. При вращении намагниченного вала 10 вращающееся магнитное поле перемещает по кольцевой камере инструмента деформирующие шары 9. При взаимодействии с шарами-отражателями 10 деформирующие шары 9 изменяют свою траекторию и наносят динамические удары по намагниченной поверхности вала 10.

На рис. 2, *е* показана МС, обеспечивающая воздействие на поверхностный слой ферромагнитного вала переменным магнитным полем. Она содержит симметрично расположенные относительно деформирующих шаров 1 обоймы 2, 3 с радиальными отверстиями 4, 5, цилиндрические постоянные магниты 6, 7, магнитопроводы 8, 9 [18].

Поверхность ферромагнитного вала 10 устанавливают с зазором относительно магнитопроводов 8, 9. При вращении намагниченного вала 10 обеспечивается воздействие на деформирующие шары 1 вращающимся переменным магнитным полем. Шары 1, перемещаясь по кольцевой камере инструмента, сталкиваются с шарами-отражателями 11, изменяют траекторию своего движения и наносят динамические удары по упрочняемой поверхности.

Для воздействия на плоскую поверхность ферромагнитных деталей вращающимся постоянным магнитным полем разработана МС, изображенная на рис. 2, *ж*. Конструкция МС содержит обоймы 1, 2 с радиальными отверстиями 3, 4, магнитопроводные втулки 5, 6, цилиндрические постоянные магниты 7, 8. Обоймы 1, 2 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

Торцовые поверхности магнитопроводных втулок 5, 6 устанавливают с необходимым зазором к плоской упрочняемой поверхности ферромагнитной детали 9. Магнитный поток от цилиндрических постоянных магнитов 7, 8 замыкается на упрочняемую поверхность, не затрагивая деформирующие и приводные шары 10, 11. При вращении инстру-



мента на деталь 9 действует вращающееся постоянное магнитное поле.

МС, изображенная на рис. 2, 3, предназначена для магнитного воздействия на плоскую поверхность ферромагнитных деталей вращающимся переменным магнитным полем. Она имеет корпус 1 с аксиальными отверстиями 2, крышку 3 с аксиальными отверстиями 4, цилиндрические постоянные магниты 5, 6. Корпус 1 и крышка 3 изготовлены из немагнитопроводных материалов. Цилиндрические постоянные магниты 5, 6 устанавливаются в аксиальных отверстиях 2, 4 с последовательным чередованием полюсов N и S .

Магнитный поток от цилиндрических постоянных магнитов 5, 6 замыкается на плоскую поверхность ферромагнитной детали 7. При этом воздействие магнитного поля на деформирующие шары 8 и приводные шары 9 несущественно. В процессе обработки МС инструмента вращают. В результате осуществляется воздействие на поверхность ферромагнитной детали 7 переменным магнитным полем с периодическим изменением направления силовых линий на 180° .

Экспериментальное определение характеристик магнитных систем, сообщающих колебательные движения деформирующим шарам инструмента. Для определения силы взаимодействия деформирующих шаров с магнитной системой комбинированного инструмента необходимо знать величину индукции действующего на них магнитного поля. Определение величины индукции магнитного поля, действующего на деформирующие шары инструмента, аналитическим способом представляется весьма сложной задачей. Для исследуемой конструкции магнитной системы наиболее целесообразно определять характеристики действующего магнитного поля экспериментальным методом.

Экспериментальное определение индукции магнитного поля осуществлялось для магнитной системы инструмента, изображенной на рис. 1, в.

В исследуемой магнитной системе инструмента в качестве источников магнитного поля использовались цилиндрические постоянные магниты осевой намагниченности из редкоземельных материалов ($Nd Fe B$) с индукцией магнитного поля в центре их торцевой поверхности $0,300...0,310$ Тл. Размеры применяемых цилиндрических постоянных магнитов ($D \times h$) составляли 15×5 мм.

Для измерения величины индукции магнитного поля в исследуемых направлениях магнитной системы инструмента применяли миллитеслометр универсальной модели МТУ-1 с погрешностью измерения не более 5 %.

На рис. 3 схематично изображена конструкция магнитной системы инструмента и указано направление измерений индукции магнитного поля. В ней цилиндрические постоянные магниты 1, 2 установлены аксиально, идентично с двух сторон зубчатого магнитопровода 3, а их геометрические центры расположены с равномерным угловым шагом по окружности диаметром 61 мм. Общее количество магнитов – 22 шт.

Результаты выполненных экспериментальных исследований индукции магнитного поля анализируемой магнитной системы инструмента изображены на рис. 4.

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что МС с зубчатым магнитопроводом позволяет получить на периферийной поверхности зубьев концентрированное магнитное поле с индукцией до $0,395$ Тл. При этом индукция магнитного поля между зубьями значительно ниже и не превышает $0,100$ Тл.

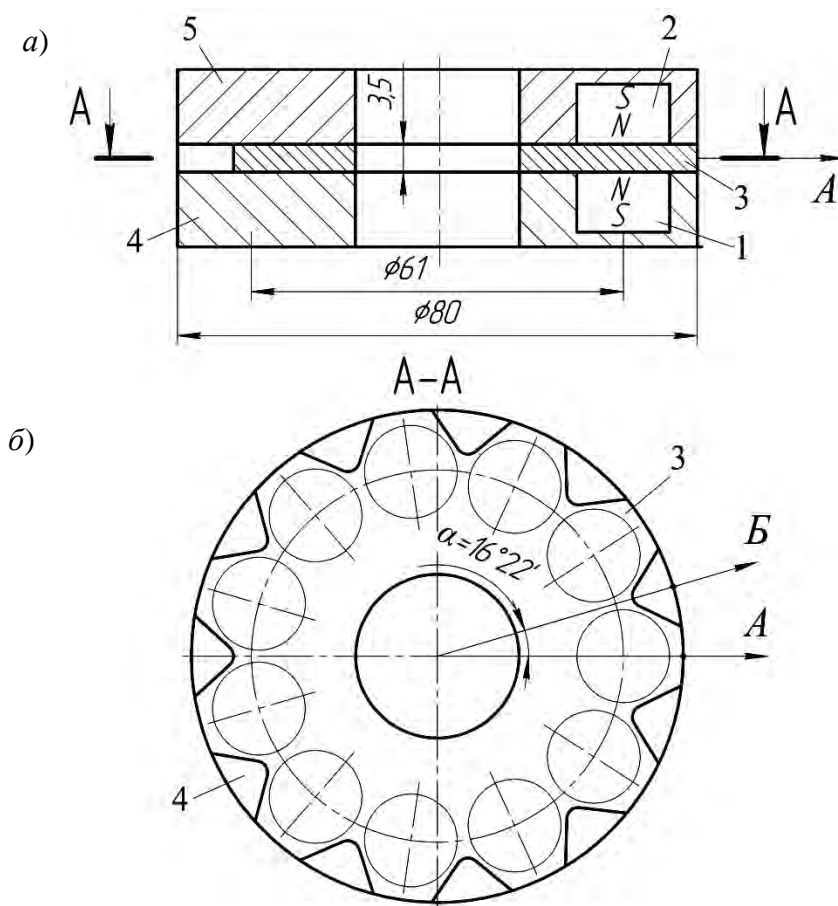


Рис. 3. Направление измерения индукции магнитного поля в магнитной системе с аксиально расположенными цилиндрическими постоянными магнитами, установленными идентично с двух сторон зубчатого магнитопровода: *a* – разрез общего вида; *б* – сечение общего вида; 1, 2 – цилиндрические постоянные магниты; 3 – зубчатый магнитопровод; 4, 5 – держатель

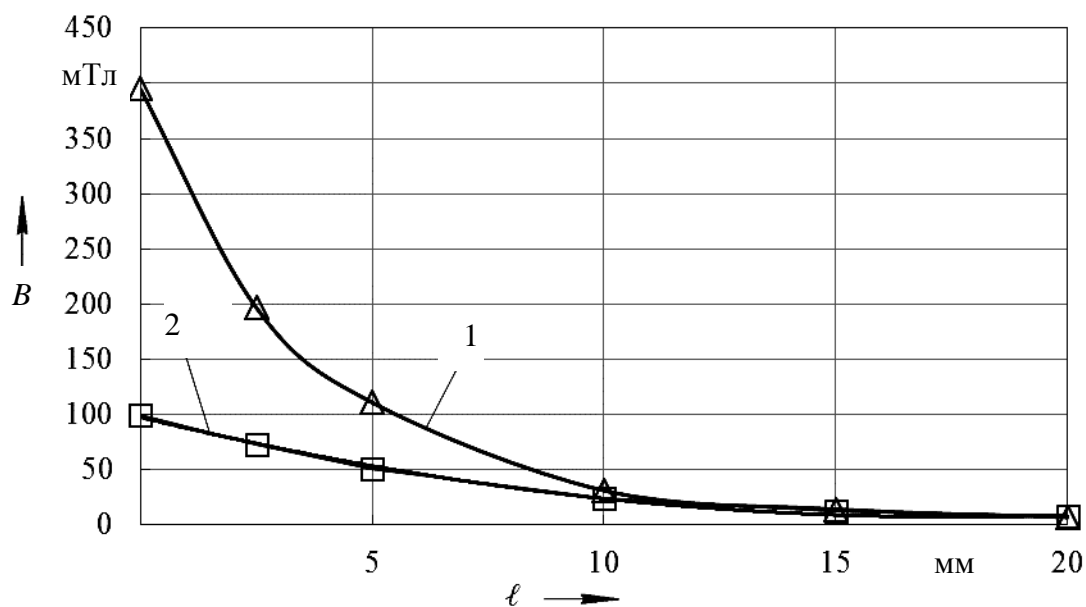


Рис. 4. Величина индукции магнитного поля в направлениях *A* и *B* на расстоянии l от периодической поверхности зубчатого магнитопровода: 1 – направление оси *A*; 2 – направление оси *B*



Экспериментальное определение характеристик магнитных систем, обеспечивающих магнитное воздействие на поверхность ферромагнитных деталей. Исследовалась магнитная система, изображенная на рис. 5. Характеристики применяемых цилиндрических постоянных магнитов соответство-

вали значениям, указанным выше. Количество постоянных магнитов – 16 шт. Геометрические центры манитов расположены с равномерным угловым шагом на окружности с диаметром 88 мм.

Зависимости индукции магнитного поля от расстояния в соответствующих направлениях представлены на рис. 6.

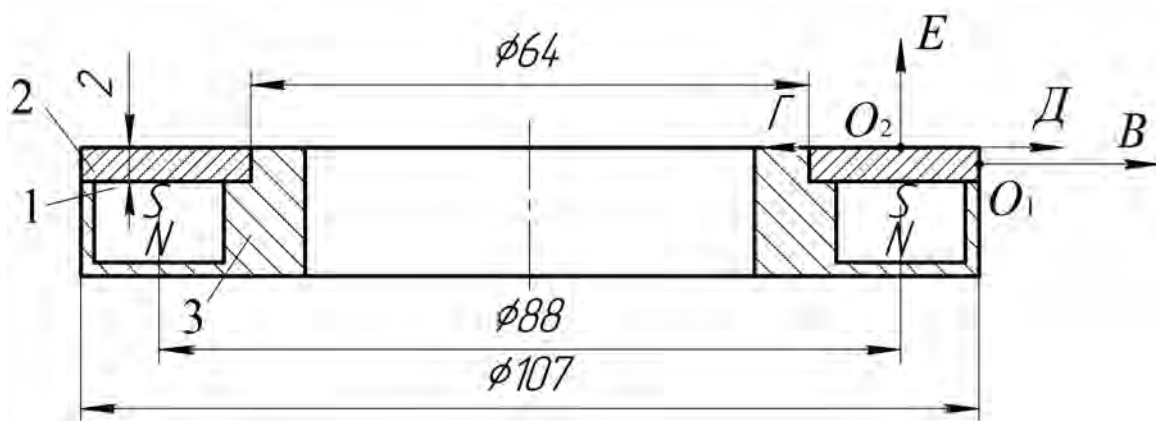


Рис. 5. Направление измерения индукции магнитного поля в МС с аксиально расположенными цилиндрическими постоянными магнитами и кольцевым магнитопроводом, расположенным с внутренней стороны кольцевой камеры инструмента: 1 – цилиндрические постоянные магниты; 2 – кольцевой магнитопровод; 3 – держатель

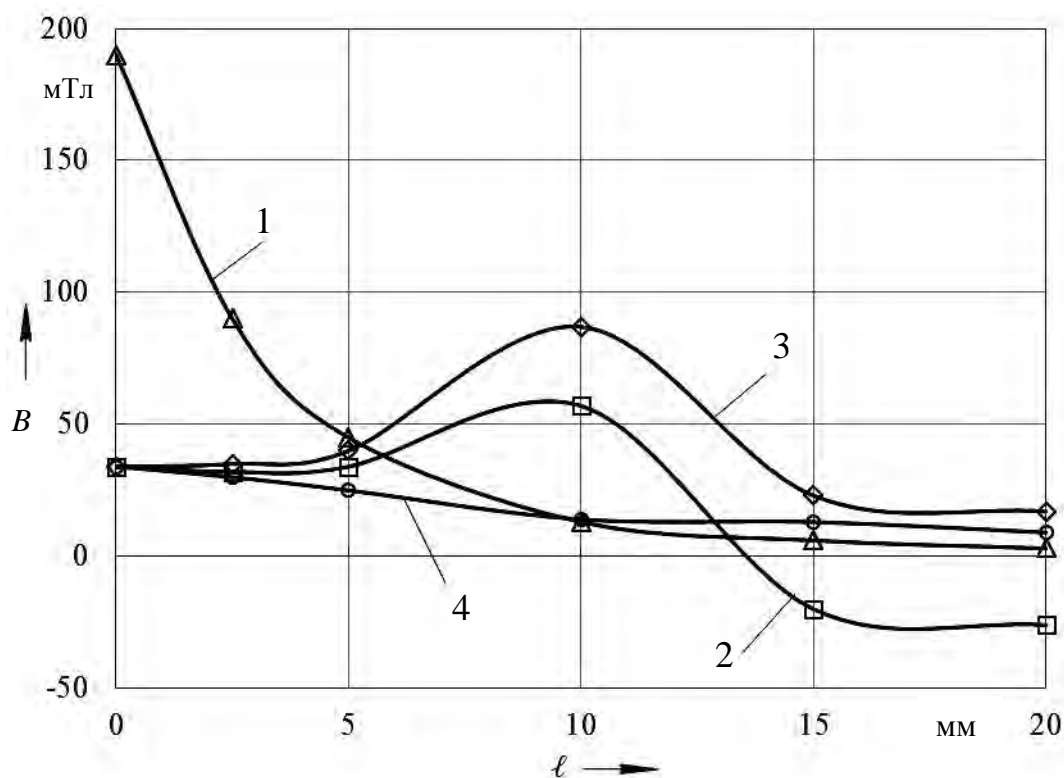


Рис. 6. Величина индукции магнитного поля в направлениях B, Γ, D, E на расстоянии ℓ от начала координат O_1 и O_2 : 1 – направление B ; 2 – направление Γ ; 3 – направление D ; 4 – направление E



Экспериментальное определение характеристик МС в сборе (с учетом их взаимного влияния друг на друга). Магнитные системы инструмента, предназначенные для воздействия магнитным полем на деформирующие шары и внутреннюю цилиндрическую поверхность ферромагнитных деталей, в сборе

изображены на рис. 7. После сборки МС вследствие их взаимного влияния друг на друга изменяется величина индукции магнитного поля в направлениях *A, B, Г, Д, E*. Результаты измерений индукции магнитного поля в указанных направлениях представлены в виде графиков на рис. 8.

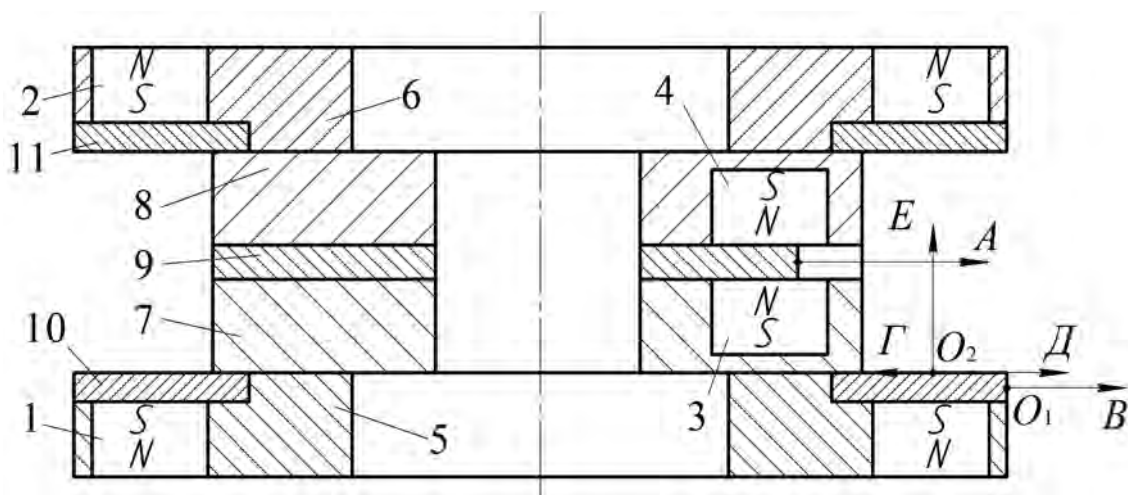


Рис. 7. Магнитная система инструмента в сборе: 1-4 – цилиндрические постоянные магниты; 5-8 – держатели; 9 – зубчатый магнитопровод; 10, 11 – кольцевой магнитопровод

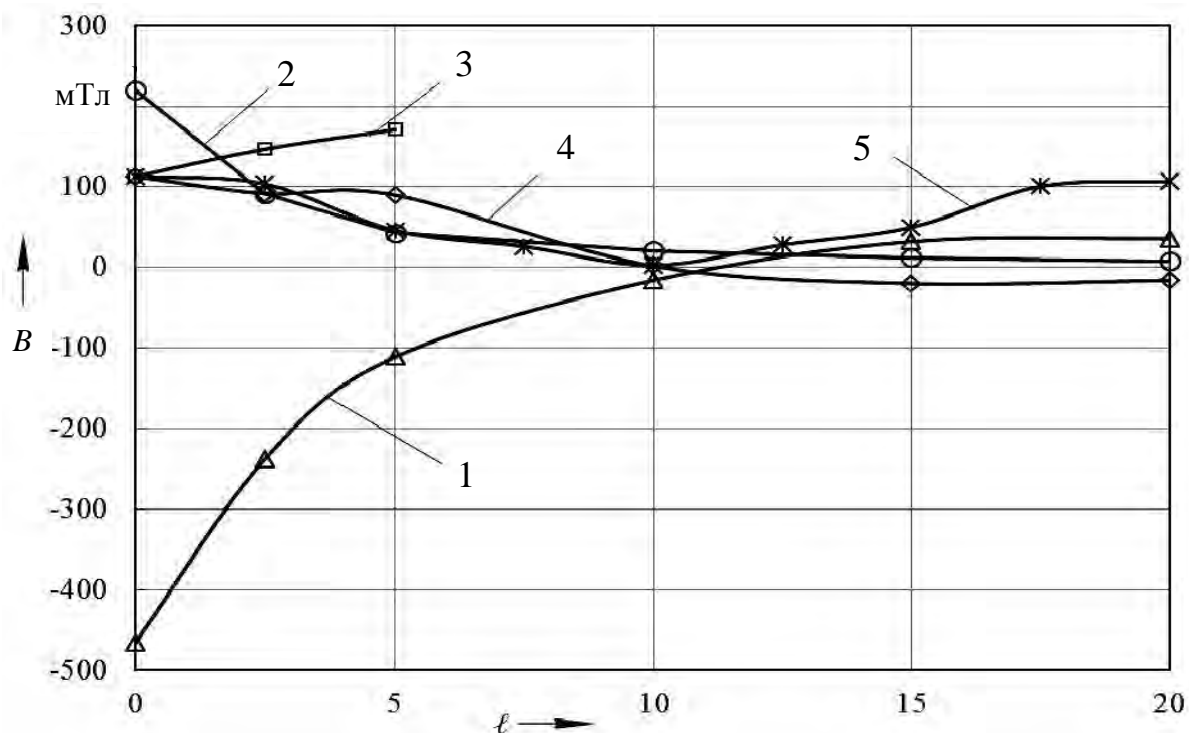


Рис. 8. Величина индукции магнитного поля в направлениях *A, B, Г, Д, E* исследуемой МС в сборе: 1 – направление *A*; 2 – направление *B*; 3 – направление *Г*; 4 – направление *Д*; 5 – направление *E*



Анализ зависимостей, имеющих на рис. 4, 6, 8, показывает, что после сборки МС (соединения в единое целое) имеет место суммирование (наложение) создаваемых ими магнитных полей. В результате увеличивается индукция магнитного поля в зоне кольцевой камеры инструмента. Соответственно, возрастает сила магнитного воздействия на деформирующие шары инструмента и увеличивается жесткость их связи с корпусом инструмента.

Заключение

Разработаны конструкции магнитных систем комбинированных инструментов, позволяющих осуществлять совмещенную упрочняющую обработку внутренних и наружных цилиндрических поверхностей тел вращения, а также плоских поверхностей ферромагнит-

ных деталей концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и динамическим поверхностным пластическим деформированием. Магнитные системы инструментов, спроектированные на основе цилиндрических постоянных магнитов, характеризуются компактностью и обеспечивают создание концентрированного магнитного поля, действующего на деформирующие шары и упрочняемую поверхность ферромагнитных деталей.

Получены зависимости индукции магнитного поля от расстояния до элементов МС в исследуемых направлениях. Это позволит в дальнейшем определить аналитическим методом силу взаимодействия деформирующих шаров с магнитной системой инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – Москва : Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Научно-технические технологии в машиностроении / Под ред. А. Г. Сулова. – Москва : Машиностроение, 2012. – 528 с.
3. **Таранов, А. С.** Упрочнение валов методом ППД в ПМП / А. С. Таранов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 2. – С. 44–45.
4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2068770 / А. М. Довгалева. – Оpubл. 10.11.1996.
5. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2089373 / А. М. Довгалева. – Оpubл. 10.09.1997.
6. **Довгалева, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей : монография / А. М. Довгалева. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
7. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. РФ 1807930 / А. М. Довгалева. – Оpubл. 07.04.1993.
8. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. РФ 2068767 / А. М. Довгалева. – Оpubл. 10.11.1996.
9. Инструмент для упрочняющей обработки : пат. РФ 2089372 / А. М. Довгалева. – Оpubл. 10.09.1997.
10. **Dovgalev, A.** Combined magnetic dynamic rolling as process module for quality assurance / A. Dovgalev // Technologia i automatyzacja montazu. – 2015. – № 3. – С. 54–60.
11. Инструмент и способ магнитно-динамического упрочнения плоской поверхности детали : пат. ВУ 17545 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 30.10.2013.
12. Способ поверхностного пластического деформирования отверстия цилиндрической детали и инструмент для его осуществления : пат. ВУ 18300 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 30.08.2013.
13. Устройство для поверхностного пластического деформирования внутренней поверхности цилиндра и способ поверхностного пластического деформирования внутренней поверхности цилиндра : пат. ВУ 18191 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 30.08.2013.



14. **Довгалеv, А. М.** Совмещенная отделочно-упрочняющая обработка деталей машин вибродинамическим накатыванием и вращающимся магнитным полем / А. М. Довгалеv // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 15–23.

15. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей : пат. ВУ 14651 / А. М. Довгалеv, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.04.2010.

16. Инструмент для упрочняющей обработки плоских поверхностей : пат. ВУ 14014 / А. М. Довгалеv, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.12.2010.

17. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали : пат. ВУ 19423 / А. М. Довгалеv, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 30.08.2015.

18. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки вала : пат. ВУ 18302 / А. М. Довгалеv, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, И. А. Тарадейко. – Оpubл. 30.08.2013.

Статья сдана в редакцию 28 декабря 2017 года

Александр Михайлович Довгалеv, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: rct@bru.by.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: rct@bru.by.

