

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-3-83-91

УДК 621.787

**В. К. ШЕЛЕГ**<sup>1</sup>, чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.

**А. М. ДОВГАЛЕВ**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.

**Д. М. СВИРЕПА**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.

**И. А. ТАРАДЕЙКО**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ВАЛОВ

### Аннотация

Предложены новые методы комбинированной магнитно-динамической обработки поверхности валов в условиях серийного производства. Разработаны прогрессивные конструкции инструментов для их реализации, содержащие магнитные системы на основе постоянных цилиндрических магнитов из редкоземельных материалов, проектируемые по модульному принципу.

### Ключевые слова:

инструмент, деформирующие шары, магнитная система, цилиндрические постоянные магниты, отделочно-упрочняющая обработка, комбинированное энергетическое воздействие.

### Для цитирования:

Инструменты для комбинированной магнитно-динамической обработки поверхности валов / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, Д. М. Свирипа, И. А. Тарадейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 3 (88). – С. 83–91.

### Введение

Характеристики качества и эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин во многом определяются финишными технологиями отделочно-упрочняющей обработки, основанными на статистических и динамических методах поверхностного пластического деформирования. Однако известные методы поверхностного пластического деформирования в большинстве случаев исчерпали свои технологические возможности по повышению характеристик качества и эксплуатационных свойств упрочняемых поверхностей [1–3].

В связи с этим перспективным направлением является разработка новых методов отделочно-упрочняющей обработки, предусматривающих комбинированное энергетическое воздействие на поверхностный слой упрочняемых деталей. Большой научный и практиче-

ский интерес представляет метод магнитно-динамической обработки, при котором на поверхность упрочняемой детали из ферромагнитного материала одновременно воздействуют низкоэнергетическим магнитным полем (постоянным или переменным) с индукцией 0,05...1,2 Тл и ударным деформированием, осуществляемым свободно расположенными в кольцевой камере инструмента колеблющимися деформирующими шарами, перемещаемыми с осевой подачей [4–6].

В настоящее время проведены теоретические и экспериментальные исследования магнитно-динамической обработки внутренних и плоских поверхностей деталей машин из ферромагнитных материалов, позволившие установить снижение исходной шероховатости упрочняемых поверхностей по параметру  $R_a$  с 6,3...0,40 до 0,6...0,08 мкм, повышение геометрической точности и

удельной маслостойкости поверхности, увеличение глубины модифицированного поверхностного слоя в 1,6–3,1 раза, формирование наноструктурированного поверхностного слоя толщиной до 4,5 мкм с мелкозернистой субзернистой структурой наноразмерного диапазона (до 100 нм), характеризующегося увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия, обеспечивающих кратное повышение износостойкости упрочненных поверхностей [7, 8].

### **Постановка задачи**

Анализ литературных источников показывает, что существуют конструкции комбинированных инструментов охватывающего типа, предназначенные для магнитно-динамической обработки поверхности валов в условиях крупносерийного и массового типа производства, не предусматривающие переналадку на другой типоразмер упрочняемых деталей [9–11]. Вместе с тем на предприятиях машиностроения Республики Беларусь изготавливается широкая номенклатура валов различного технологического назначения, в основном в условиях мелко- и среднесерийного производства, к поверхности которых предъявляются высокие требования по износостойкости и усталостной прочности, обеспечение которых невозможно без применения инновационных технологий отделочно-упрочняющей обработки.

В связи с этим актуальной является разработка методов магнитно-динамического упрочнения наружных цилиндрических поверхностей и универсальных инструментов для их реализации не требующих переналадки, приемлемых для условий мелко- и среднесерийного производства.

### **Основная часть**

В соответствии с поставленной задачей, разработаны методы комбинированной магнитно-динамической обработки, предназначенные для упрочнения поверхности валов с различными размерами в условиях мелко- и среднесерийного производства.

Общей особенностью разработанных методов магнитно-динамической обработки является одностороннее расположение инструмента по отношению к упрочняемому валу. При этом продольные оси вала и инструмента располагают параллельно, на определенном расстоянии друг от друга. Указанное отличие позволяет осуществлять упрочняющую обработку поверхностей широкой номенклатуры валов с различными диаметральными размерами без переналадки инструмента. При этом в соответствии с режимами процесса магнитно-динамического упрочнения и конструктивными параметрами инструмента может быть реализована отделочная, отделочно-упрочняющая или упрочняющая обработки поверхности валов. Разработанные методы магнитно-динамической обработки валов в условиях серийного производства, в зависимости от разновидности и количества энергетических воздействий на упрочняемый поверхностный слой детали, условно могут быть разделены на четыре вида.

**1. Упрочнение поверхности валов ударным (динамическим) деформированием, осуществляемым деформирующими шарами, получающими кинетическую энергию для деформирования от вращающегося магнитного поля инструмента.** Указанный метод магнитно-динамической обработки приемлем для упрочнения поверхности валов из ферромагнитных и неферромагнитных материалов [12].

Для реализации рассматриваемого метода магнитно-динамической обра-

ботки разработан инструмент, изображенный на рис. 1.

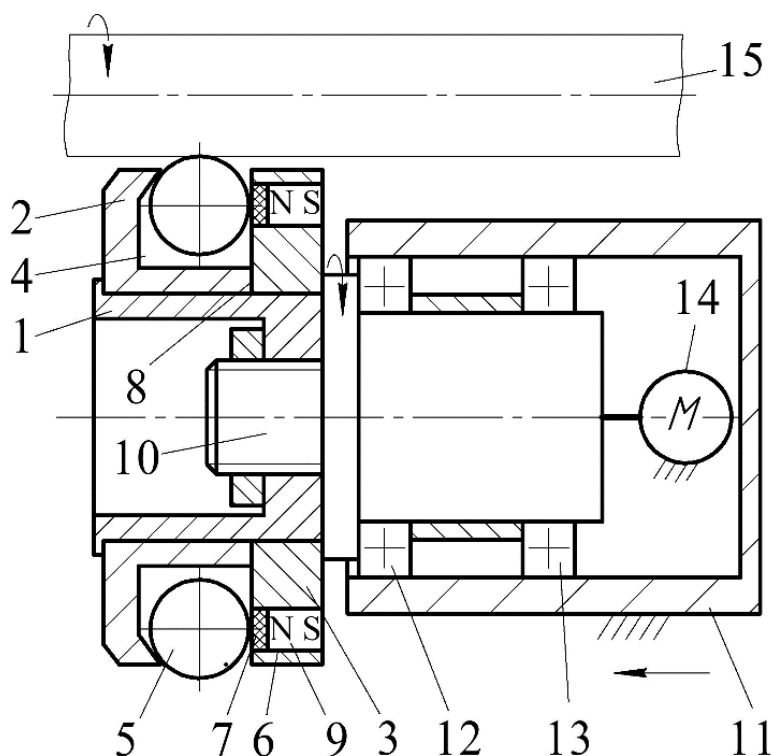


Рис. 1. Магнитно-динамический накатник для упрочнения поверхности валов

Инструмент содержит оправку 1, стакан 2, диск 3. Стакан 2 и диск 3 образуют кольцевую камеру 4, в которой свободно (с возможностью окружного вращения) установлены ферромагнитные деформирующие шары 5. В диске 3 выполнены с равномерным угловым шагом аксиальные отверстия 6, выходящие в кольцевую камеру 4. В аксиальных отверстиях 6 установлены с натягом магнитопроводы 7, торцы которых выполнены заподлицо с торцом 8 диска 3. Постоянные цилиндрические магниты 9 из редкоземельных материалов (NdFeB) установлены цилиндрической поверхностью с зазором в аксиальных отверстиях 6 диска 3, что обеспечивает возможность их извлечения и замены в случае необходимости перенастройки инструмента. Торцовая поверхность постоянных цилиндрических магнитов 9 контактирует с торцом магни-

топроводов 7. Стакан 2 и диск 3 изготовлены из немагнитопроводных материалов. Оправка 1 закреплена на шпинделе 10 приводного устройства, содержащего корпус 11, подшипники 12, 13, регулируемый электродвигатель 14.

Инструмент работает следующим образом. Упрочняемый вал 15 закрепляют в центрах, а корпус 11 приводного устройства – на суппорте токарного станка. Валу 15 и оправке 1 сообщают вращение и перемещают инструмент с осевой подачей вдоль обрабатываемой поверхности. Магнитный поток от постоянных цилиндрических магнитов 9 посредством магнитопроводов 7 распределяется в кольцевой камере 4 инструмента и воздействует на ферромагнитные деформирующие шары 5. В результате деформирующие шары 5 увлекаются магнитным полем и получают окружное вращение вдоль кольцевой

камеры 4. Вращаясь, деформирующие шары 5 периодически взаимодействуют с упрочняемой поверхностью вала, осуществляя ее ударное поверхностное пластическое деформирование.

К недостаткам метода следует отнести отсутствие магнитного упрочняющего воздействия на поверхность детали, что несколько снижает характеристики качества и эксплуатационные свойства упрочненных поверхностей.

**2. Упрочнение поверхности валов ударным деформированием с опережающей обработкой вращающимся магнитным полем.** Согласно

методу, на упрочняемую поверхность вращающегося вала из ферромагнитного материала вначале воздействуют вращающимся магнитным полем, а затем модифицированный и разогретый магнитным полем поверхностный слой дополнительно упрочняют ударным деформированием, осуществляемым вращающимися деформирующими элементами перемещаемого с осевой подачей инструмента [13].

Инструменты для реализации метода магнитно-динамической обработки изображены на рис. 2.

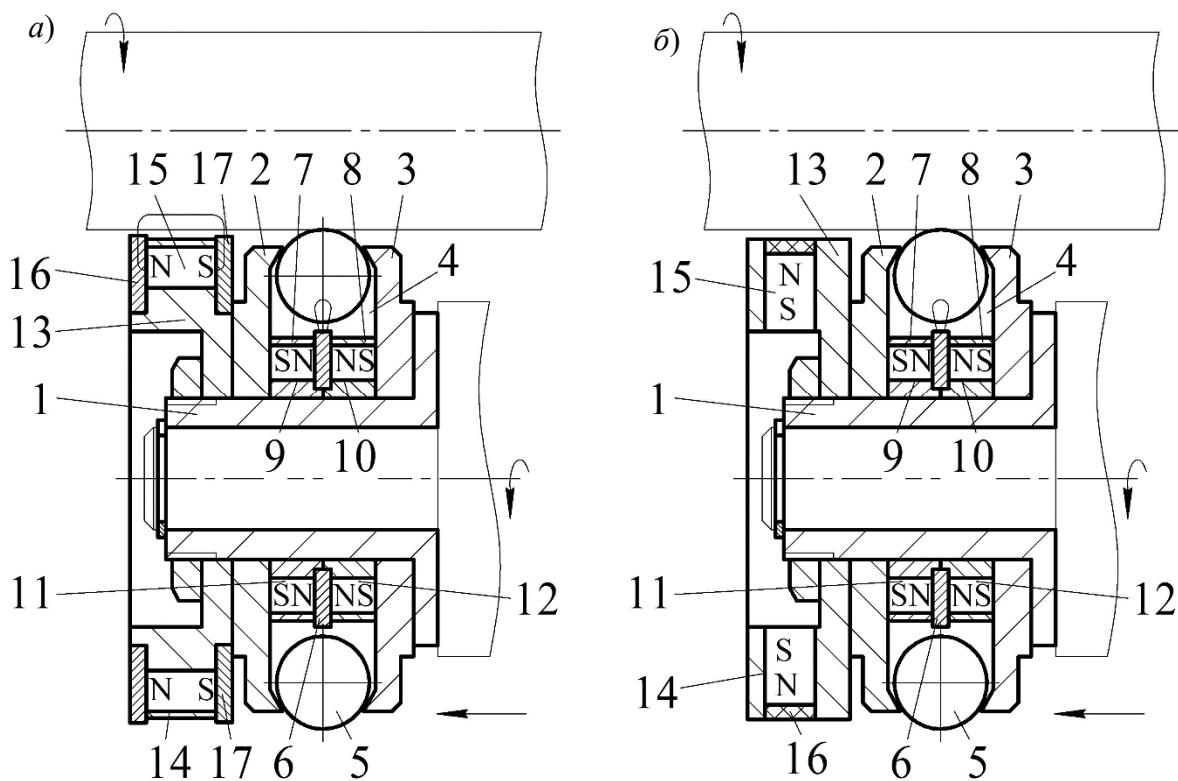


Рис. 2. Инструменты для упрочнения поверхности валов ударным деформированием с опережающей обработкой вращающимся постоянным (а) и переменным (б) магнитным полем

Инструменты включают ступицу 1; диски 2 и 3, образующие кольцевую камеру 4; ферромагнитные деформирующие шары 5; магнитную систему, предназначенную для вращения деформирующих шаров 5, состоящую из кольцевого магнитопровода 6, втулок 7 и 8

с равномерно расположенными по окружности аксиальными отверстиями 9 и 10, цилиндрическими постоянными магнитами 11 и 12 из редкоземельных материалов (NdFeB), установленных в упомянутых аксиальных отверстиях и взаимодействующих одинаковыми по-

люсами с торцем кольцевого магнитопровода 6. Кроме того, инструменты снабжены устройством для упрочняющей опережающей магнитной обработки поверхности вала из ферромагнитного материала, в состав которого входят диск 13 с аксиальными отверстиями 14, расположенными с равномерным угловым шагом, цилиндрические постоянные магниты 15 осевой намагниченности, магнитопроводы 16 и 17, выполненные в виде шайб, торцовые поверхности которых взаимодействуют с торцами цилиндрических постоянных магнитов 15. Диски 2 и 3, втулки 7 и 8, диск 15 изготовлены из немагнитопроводных материалов и установлены соосно на ступице 1 инструмента (см. рис. 2, а).

В инструменте для осуществления упрочняющей опережающей обработки переменным магнитным полем в диске 13 выполнены радиальные, равномерно расположенные отверстия 14, в которых установлены цилиндрические постоянные магниты 15 осевой намагниченности и цилиндрические магнитопроводы 16 (см. рис. 2, б).

Комбинированную магнитно-динамическую обработку осуществляют следующим образом. Установленному в центрах станка валу сообщают вращение. Ступицу 1 инструмента закрепляют на шпинделе специального привода. Инструмент вращают и перемещают с осевой подачей. В результате на поверхность вала первоначально воздействует постоянное (см. рис. 2, а) или переменное (см. рис. 2, б) магнитное поле, осуществляя магнитное упрочняющее воздействие, характеризующееся увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия в упрочненном поверхностном слое [14, с. 162–180]. Затем модифицированный поверхностный слой детали окончательно упрочняется ударным деформированием, обеспечивая высокие физико-механические характеристики упрочненной поверхности.

Однако метод, вследствие последовательного упрочнения поверхности вала магнитным полем и ударным деформированием, не позволяет в полной мере добиться синергетического эффекта от используемых видов энергетического воздействия на упрочняемую поверхность с целью повышения ее характеристик качества и эксплуатационных свойств.

Представленный ниже метод упрочняющей обработки позволяет повысить эффективность комбинированного упрочняющего воздействия магнитным полем и ударным деформированием вследствие совмещения во времени указанных процессов.

**3. Упрочнение поверхности валов совмещенной обработкой вращающимся магнитным полем и ударным деформированием.** При этом на поверхность вращающегося вала из ферромагнитного материала воздействуют вращающимся постоянным магнитным полем с индукцией 0,05...1,2 Тл и одновременно упрочняют ее ударным деформированием посредством вращающихся деформирующих шаров специального инструмента [15].

Инструмент для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности валов представлен на рис. 3.

В состав инструмента входят: корпус 1; щетки 2 и 3; кольцевая камера 4; ферромагнитные деформирующие шары 5; магнитопроводная шайба 6; втулки 7 и 8 с аксиальными и равномерно расположенными по окружности отверстиями 9 и 10; цилиндрические постоянные магниты 11 и 12; устройство для намагничивания зоны деформирования постоянным магнитным полем, состоящее из цилиндрических держателей 13 и 14, цилиндрических постоянных магнитов 15 и 16 осевой намагниченности, установленных в аксиальных отверстиях 17 и 18, магнитопроводов 19 и 20, выполненных в виде шайб. Цилиндрические держатели 13 и 14, магнитопроводы 19 и 20 расположены симметрично

относительно кольцевой камеры 4. Щетки 2 и 3, втулки 7 и 8, цилиндрические держатели 13 и 14 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

В процессе совмещенной магнитно-динамической обработки упрочняемый вал 21 закрепляют в центрах, а корпус 1 инструмента – в шпинделе 22 специального привода, расположенного на

суппорте токарного станка. Упрочняемому валу 21 сообщают вращение и перемещают с осевой подачей. При совмещенной во времени магнитной и ударной обработок на поверхности вала 21 формируется наноструктурированный поверхностный слой с высокими физико-механическими свойствами [15, с. 162–180].

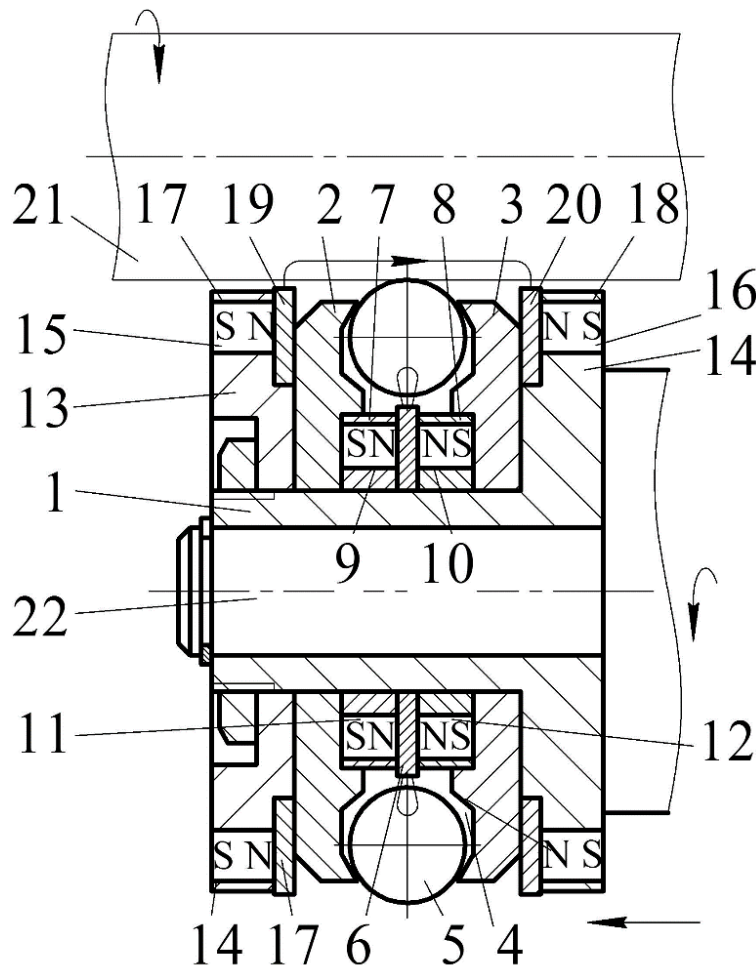


Рис. 3. Инструмент для совмещения во времени процессов магнитной обработки и ударного деформирования

Однако рассматриваемый метод совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности валов из ферромагнитных материалов в условиях серийного производства не использует в качестве энергетического воздействия на упрочняемую поверхность импульсное магнитное поле в сочетании с удар-

ной (динамической обработкой), что снижает синергетический эффект от комбинированной упрочняющей обработки.

**4. Упрочнение поверхности валов комбинированной магнитно-динамической обработкой.** В соответствии с разработанным методом комби-

нированную магнитно-динамическую обработку поверхности вращающегося вала из ферромагнитного материала осуществляют последовательно, вначале – импульсным магнитным полем, затем – совмещенной обработкой импульсным магнитным полем и ударным деформированием и окончательно – пере-

менным магнитным полем (с изменением величины индукции и направления силовых линий магнитного поля) [16].

Инструмент для осуществления метода комбинированной магнитно-динамической обработки изображен на рис. 4 [17].

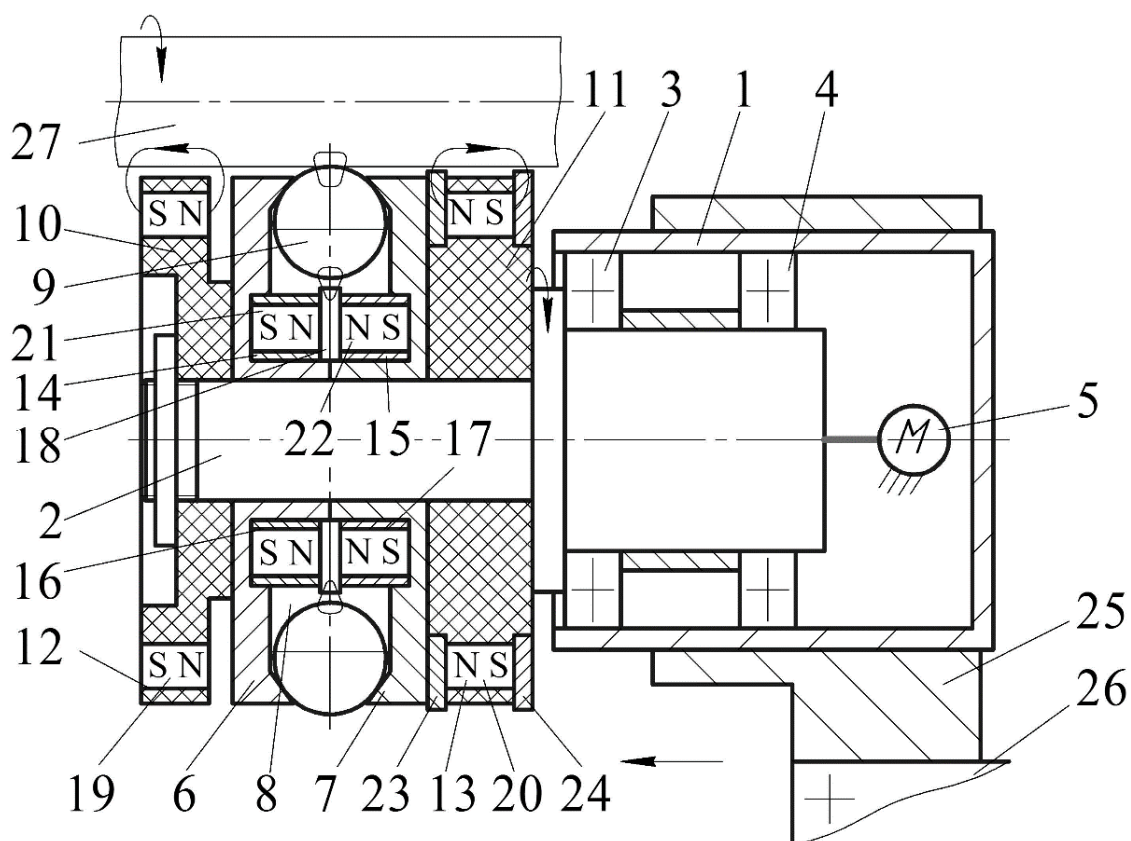


Рис. 4. Инструмент для комбинированной магнитно-динамической обработки поверхности валов

Инструмент содержит: корпус 1; шпиндель 2; подшипники качения 3 и 4; регулируемый электродвигатель 5; диски 6 и 7; кольцевую камеру 8; ферромагнитные деформирующие шары 9; кольца 10 и 11 с аксиально расположенными отверстиями 12 и 13; обоймы 14 и 15 с цилиндрическими отверстиями 16 и 17; кольцевой магнитопровод 18; цилиндрические постоянные магниты 19–22, установленные с равномерным угловым шагом в соответствующих аксиальных отверстиях 12, 13 и 16, 17, зубчатые магнитопроводы 23 и 24,

установленные симметрично на кольце 11 и взаимодействующие с торцами цилиндрических постоянных магнитов 20. Для обеспечения воздействия на упрочняемую поверхность вала переменным магнитным полем цилиндрические постоянные магниты 20 расположены в аксиальных отверстиях 13 с чередованием полюсов N и S, имеют различные диаметральные размеры и индукцию магнитного поля. Диски 6 и 7, кольца 10 и 11, обоймы 14 и 15 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

Корпус 1 инструмента закрепляют посредством оправки 25 в резцедержателе 26, а упрочняемый вал 27 – в центрах станка. В процессе комбинированной обработки вал 27 и шпиндель 2 вращают, а инструмент перемещают с осевой подачей.

Инструмент позволяет объединить в одной технологической операции три упомянутых вида энергетического воздействия на поверхностный слой упрочняемого вала, что позволяет обеспечить получение упрочненного поверхностного слоя с высокими характеристиками качества и эксплуатационными свойствами.

### Заключение

В работе представлены разработанные методы магнитно-динамической обработки поверхности валов в усло-

виях серийного производства, сформулированы их отличительные признаки, определены преимущества и особенности технологического применения. Рассмотрены конструкции инструментов для реализации существующих разновидностей методов магнитно-динамической обработки наружных цилиндрических поверхностей. Даны описания магнитных систем инструментов для комбинированной магнитно-динамической обработки наружных цилиндрических поверхностей на основе применения цилиндрических постоянных магнитов из редкоземельных материалов. Имеющиеся в работе сведения позволяют технологам выбрать требуемый метод комбинированной магнитно-динамической обработки с учетом функционального назначения упрочняемых валов и заданных характеристик их качества и эксплуатационных свойств.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. **Суслов, А. Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
3. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под ред. С. А. Зайдеса. – Иркутск: ИРНТУ, 2015. – 394 с.
4. Магнитно-динамическое, совмещенное и комбинированное накатывание плоских поверхностей / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 3. – С. 35–42.
5. **Шелег, В. К.** Исследование основных характеристик процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 3. – С. 81–83.
6. **Шелег, В. К.** Оптимизация параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4. – С. 48–56.
7. **Шелег, В. К.** Наноструктурирование поверхностного слоя деталей машин совмещенной магнитно-динамической обработкой / В. К. Шелег, А. М. Довгалева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апр. 2024 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 28–31.
8. **Довгалева, А. М.** Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.
9. Патент ВУ 18302. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки вала : опубл. 30.08.2013 / Довгалева А. М., Сухоцкий С. А., Свирепа Д. М., Тарадейко И. А.
10. Патент ВУ 18303. Инструмент для отделочно-упрочняющей наружной поверхности втулки : опубл. 30.08.2013 / Довгалева А. М., Сухоцкий С. А., Свирепа Д. М., Тарадейко И. А.
11. Магнитно-динамические инструменты для упрочнения наружных поверхностей вращения / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – № 4. – С. 174–178.



12. Патент BY 18083. Инструмент для поверхностного пластического деформирования отверстия детали : опубл. 30.04.2014 / Довгалева А. М., Сухоцкий С. А., Рыжанков Д. М., Свирепа Д. М.
13. Патент BY 15364. Упрочняющий инструмент: опубл. 28.02.2012 / Довгалева А. М., Свирепа Д. М., Рыжанков Д. М., Сухоцкий С. А.
14. **Довгалева, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалева. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
15. **Довгалева, А. М.** Совмещенное магнитно-динамическое накатывание цилиндрических поверхностей деталей на станках токарной группы / А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 4. – С. 29–40.
16. Патент BY 23295. Способ комбинированной отделочно-упрочняющей обработки наружной цилиндрической поверхности: опубл. 30.08.2020 / Довгалева А. М., Тарадейко И. А.
17. Патент BY 23127. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки наружной поверхности вращения: опубл. 30.08.2020 / Довгалева А. М., Тарадейко И. А.

*Статья сдана в редакцию 27 июня 2025 года*

Контакты:

sheleh\_v@tut.by (Шелег Валерий Константинович);  
rct.bru@tut.by (Довгалева Александр Михайлович);  
svirepa.dmitry@gmail.com (Свирепа Дмитрий Михайлович);  
ivantaradeiko@yandex.ru (Тарадейко Иван Анатольевич).

**V. K. SHELEG, A. M. DOVGAEV, D. M. SVIREPA, I. A. TARADEIKO**

## **TOOLS FOR COMBINED MAGNETODYNAMIC TREATMENT OF SHAFT SURFACES**

### **Abstract**

The paper presents new methods of combined magnetodynamic treatment of shaft surfaces in mass-production. Progressive tool designs have been developed to implement it, which contain magnetic systems based on permanent cylindrical magnets made of rare-earth materials and are designed according to the modular principle.

### **Keywords:**

tool, deforming balls, magnetic system, cylindrical permanent magnets, finishing and strengthening treatment, combined energy impact.

### **For citation:**

Tools for combined magnetodynamic treatment of shaft surfaces / V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, D. M. Svirepa, I. A. Taradeiko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 3 (88). – P. 83–91.