

УДК 621.787

ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ
МАГНИТНОЙ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИА. М. ДОВГАЛЕВ
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Для машиностроения Республики Беларусь обеспечение конкурентоспособности выпускаемых изделий на основе повышения износостойкости поверхностей входящих в них ответственных деталей является первостепенной комплексной задачей. Ее решение невозможно без применения инновационных методов, технологий и инструментов для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин.

В Белорусско-Российском университете формируется новое научное направление, связанное с разработкой и исследованием технологий отделочно-упрочняющей обработки с использованием низкоэнергетических магнитных полей с индукцией 0,05...1,9 Тл в сочетании со статическими и динамическими методами поверхностного пластического деформирования [1]. Для реализации инновационных технологий разработан новый класс инструментов, деформирующие элементы которых свободно установлены в кольцевой камере и взаимодействуют с магнитной системой, содержащей постоянные магниты различной конфигурации из редкоземельных материалов.

В настоящее время разработаны, исследованы и внедрены в условиях мелкосерийного производства следующие технологии комбинированной магнитной и деформационной обработки внутренних цилиндрических поверхностей ответственных деталей машин, каждая из которых имеет свои особенности и соответствующую область технологического применения.

1. Магнитно-центробежное раскатывание.

При реализации технологии магнитно-центробежного раскатывания энергия магнитного поля инструмента используется для создания силового взаимодействия деформирующих шаров с поверхностью цилиндрического отверстия упрочняемой детали. На рис. 1 изображена конструкция инструмента для осуществления предложенной технологии упрочнения [2].

В процессе отделочно-упрочняющей обработки ферромагнитные деформирующие шары 7 под действием вращающегося магнитного поля, создаваемого источниками 3, 4, вращаются относительно продольной оси инструмента, прижимаются центробежной силой к обрабатываемой поверхности детали и осуществляют ее поверхностное пластическое деформирование.

Сегодня ведутся исследования по определению влияния режимов процесса магнитно-центробежного раскатывания на качественные и эксплуатационные характеристики упрочняемых деталей, изготовленных из различных материалов.

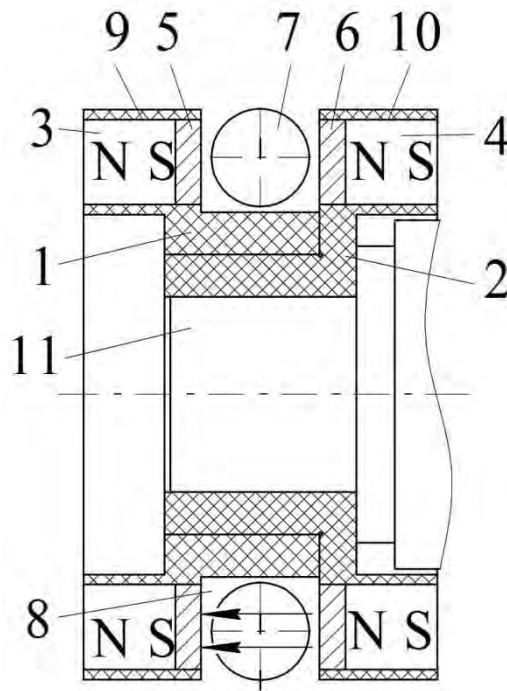


Рис. 1. Конструкция инструмента для магнитно-центробежного раскатывания: 1, 2 – стаканы; 3, 4 – постоянные магниты; 5, 6 – магнитопроводы; 7 – ферромагнитные деформирующие шары; 8 – кольцевая камера; 9, 10 – аксиальные отверстия; 11 – ротор

2. Магнитно-динамическое раскатывание.

В соответствии с технологией магнитно-динамического раскатывания, схема реализации которой представлена на рис. 2, ферромагнитные деформирующие шары 1 и цилиндрические постоянные магниты 2, установленные с равномерным угловым шагом на скалке 3, вводят в цилиндрическое отверстие 4 гильзы 5, вращают и перемещают с осевой подачей. Цилиндрические постоянные магниты 2, вращаясь вместе со скалкой 3, создают переменное магнитное поле с индукцией $0,2 \dots 1,2$ Тл и частотой $60 \dots 2000$ Гц. Под действием переменного магнитного поля ферромагнитные деформирующие шары 1 вращаются в плоскости 6, колеблются в радиальном направлении и осуществляют динамическое поверхностное пластическое деформирование, формируя на поверхности новый микрорельеф в виде сетки пересекающихся микролунок и обеспечивая высокие эксплуатационные свойства упрочняемой гильзы 5 [3].

Технология магнитно-динамического раскатывания обеспечивает: упрочнение поверхностного слоя деталей из стали 45 на глубину до $0,6$ мкм; увеличение микротвердости упрочненных поверхностей на $18 \% \dots 31 \%$; снижение исходной шероховатости поверхности до 8 раз; повышение износостойкости упрочненного поверхностного слоя в $2,1 \dots 2,3$ раза [4].

В технологиях магнитно-центробежного и магнитно-динамического раскатывания магнитное поле инструмента выполняет только транспортную функцию, сообщая деформирующим шарам кинетическую энергию, необходимую для осуществления процесса поверхностного пластического деформирования.

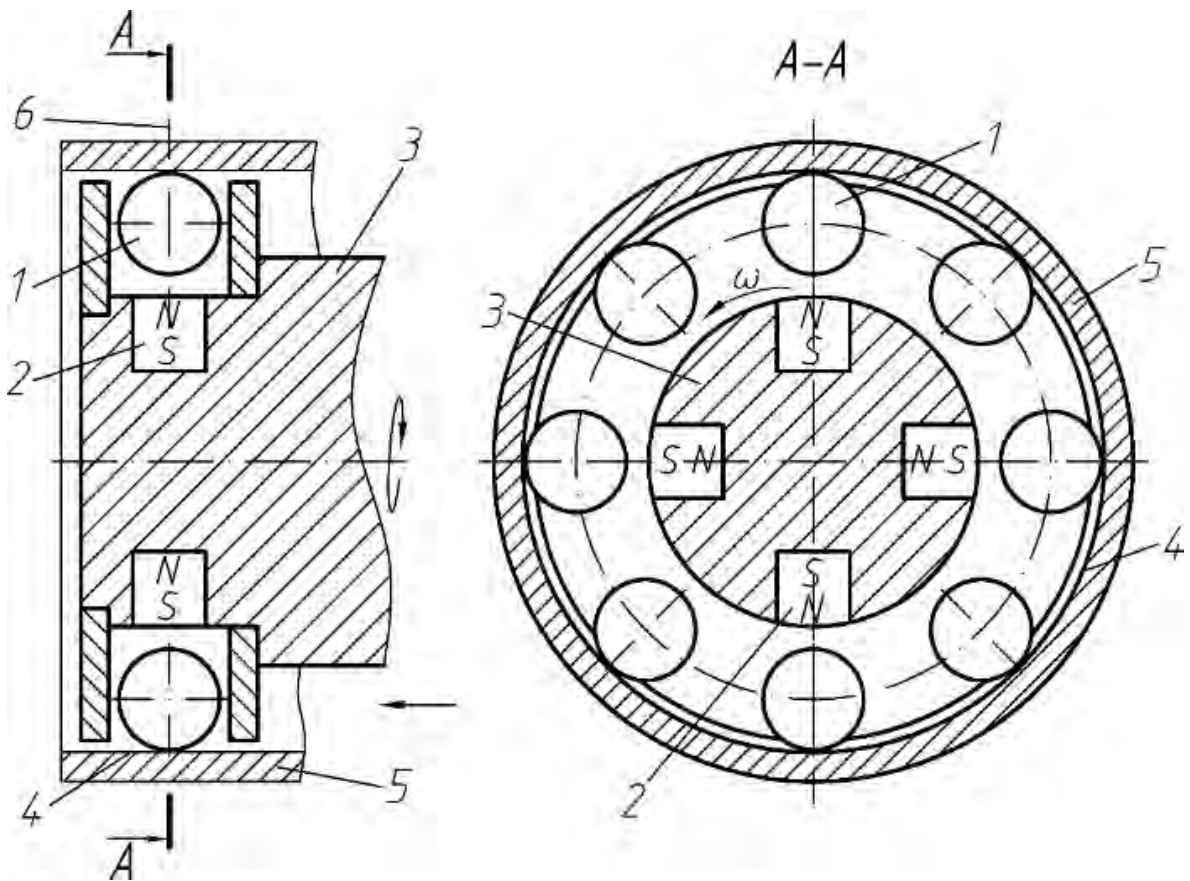


Рис. 2. Схема реализации технологии магнитно-динамического раскатывания: 1 – ферромагнитные деформирующие шары; 2 – цилиндрические постоянные магниты; 3 – скалка; 4 – цилиндрическое отверстие; 5 – гильза; 6 – плоскость вращения ферромагнитных деформирующих шаров

3. Совмещенная магнитно-динамическая обработка.

Согласно технологии совмещенной магнитно-динамической обработки, на поверхностный слой детали из ферромагнитного материала (далее – ферромагнитной детали) осуществляют комбинированное энергетическое воздействие вращающимся постоянным или переменным магнитным полем с индукцией 0,05...1,9 Тл и колеблющимися с частотой 230...850 Гц деформирующими шарами, свободно расположенными в кольцевой камере инструмента, осуществляющими ударно-деформационную обработку [5, 6].

Для реализации технологии разработан комбинированный инструмент (рис. 3), снабженный независимыми магнитными системами, предназначенными соответственно для магнитного упрочняющего воздействия на поверхностный слой ферромагнитной детали и сообщения кругового вращения и радиальных колебательных движений деформирующим шарам. Магнитопроводы инструмента имеют периодический (зубчатый) профиль, обеспечивающий фокусирование магнитного поля, а в качестве источников магнитного поля используют постоянные цилиндрические магниты из редкоземельных материалов (Nd Fe B).

Установлено, что технология совмещенной магнитно-динамической обработки позволяет обеспечить: снижение исходной шероховатости поверхности

ферромагнитных деталей по параметру Ra с 6,3...0,4 до 0,60...0,08 мкм; повышение геометрической точности обработки на 10 %...27 % и удельной маслоемкости поверхности в 1,4–2,8 раза; увеличение глубины модифицированного поверхностного слоя в 1,6–3,1 раза; формирование наноструктурированного поверхностного слоя толщиной до 4,5 мкм с мелкодисперсной субзеренной структурой наноразмерного диапазона (15...100 нм), характеризующегося увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия (до минус 1162 МПа), обеспечивающих в совокупности повышение износостойкости упрочненных поверхностей (как жестких, так и нежестких ферромагнитных деталей) в 3,8–4,9 раза [7].

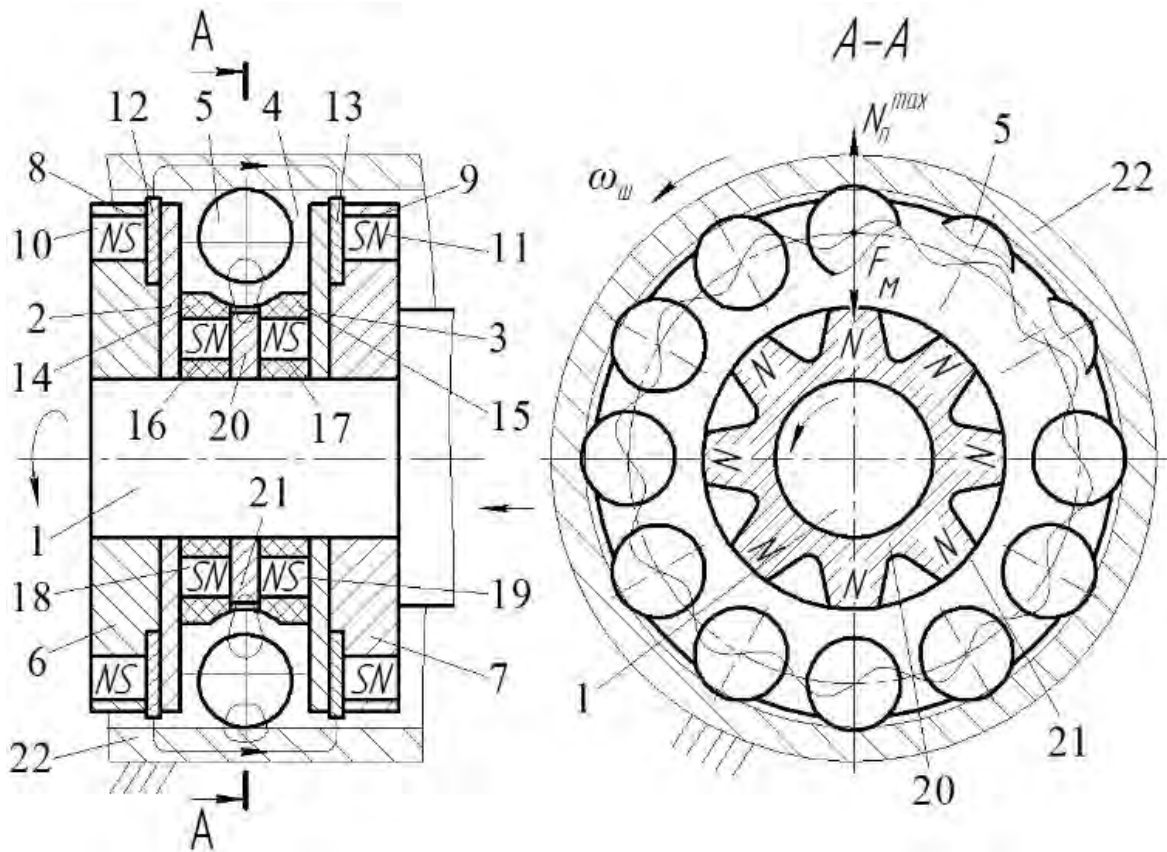


Рис. 3. Комбинированный инструмент для совмещенной магнитно-динамической обработки: 1 – оправка; 2, 3 – шайбы; 4 – кольцевая камера; 5 – ферромагнитные деформирующие шары; 6, 7 – диски; 8, 9 – аксиальные отверстия; 10, 11, 16, 17 – магнитопроводы; 14, 15 – обоймы; 20 – магнитопроводный диск; 21 – периодическая поверхность; 22 – ферромагнитный цилиндр

Осуществление процесса совмещенной магнитно-динамической обработки в специальной технологической среде, состоящей из соединений мягких металлов (окислы, соли и т. д.) или ультра- и мелкодисперсных порошков мягких металлов, а также веществ, восстанавливающих металлы из имеющихся соединений и активизирующих процесс растворения химически стойких окислов, обеспечивает (помимо получения на деталях поверхностных наноструктур)

формирование на поверхности упрочненных ферромагнитных деталей антифрикционных металлических покрытий толщиной 1,7...3,6 мкм с высокими эксплуатационными свойствами [8].

Основными направлениями усовершенствования вышепредставленных технологий отделочно-упрочняющей обработки являются: дальнейшее снижение исходной шероховатости поверхности упрочняемых деталей; увеличение глубины упрочненного поверхностного слоя; приращение толщины наноструктурированного поверхностного слоя; увеличение производительности процесса упрочнения и получения антифрикционных металлических покрытий; повышение характеристик качества и эксплуатационных свойств упрочненных поверхностей.

Для достижения поставленных целей разработаны, исследуются и проходят лабораторные испытания следующие инновационные технологии.

4. Комбинированная магнитная, ударно-деформационная и центробежно-деформационная обработка.

Согласно разработанной технологии, поверхность ферромагнитной детали последовательно упрочняют импульсным магнитным полем (в момент взаимодействия деформирующих шаров с упрочняемой поверхностью) и ударно-деформационной обработкой, формируя основные характеристики качества упрочненного слоя (глубину упрочнения, толщину наноструктурированного слоя, остаточные напряжения сжатия и др.), а затем осуществляют магнитно-центробежную обработку, обеспечивая тонкое поверхностное пластическое деформирование и окончательное формирование микрорельефа поверхности.

Для реализации технологии разработан инструмент, изображенный на рис. 4, позволяющий совместить в одной операции (в одном технологическом переходе) три вида энергетического воздействия на поверхность упрочняемой ферромагнитной детали.

В процессе обработки инструменту сообщают вращение и движение осевой подачи. Ферромагнитные деформирующие шары 8 намагничиваются от цилиндрических постоянных магнитов 16 и 17, воздействуют на поверхность ферромагнитной детали 20 импульсным магнитным полем и осуществляют одновременно ударно-деформационную обработку, а деформирующие шары 9 под действием возникающей центробежной силы выполняют сглаживание имеющихся микронеровностей и окончательно формируют микрорельеф упрочняемой поверхности.

5. Комбинированная импульсно-ударная, магнитная и центробежно-деформационная обработка.

Технология предусматривает последовательное упрочнение поверхности импульсно-ударной, затем центробежно-деформационной обработкой в магнитном поле. Инструмент для реализации технологии изображен на рис. 5.

В процессе комбинированной отделочно-упрочняющей обработки деформирующие шары 8 осуществляют импульсно-ударное деформирование (получая импульс от вращающихся под действием магнитного поля шаров-ударников 10), увеличивая глубину упрочненного слоя, а деформирующие шары 9 осуществляют тонкое поверхностное пластическое деформирование во вращающемся магнитном поле, создаваемом цилиндрическими постоянными магнитами 12 и 13, эффективно сглаживая имеющиеся микронеровности.

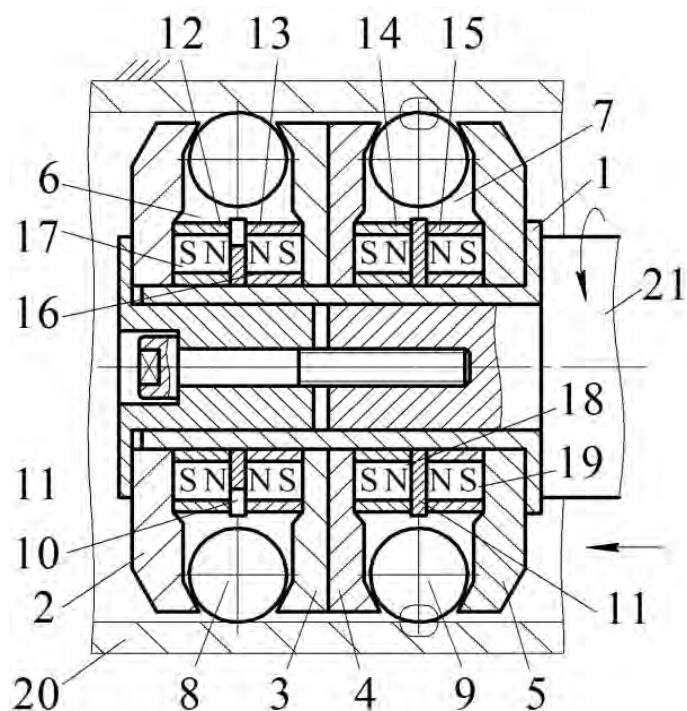


Рис. 4. Инструмент для комбинированной магнитной, ударно-деформационной и центробежно-деформационной обработки: 1 – корпус; 2–5 – диски; 6, 7 – кольцевые камеры; 8, 9 – ферромагнитные деформирующие шары; 10 – зубчатый магнитопровод; 11 – кольцевой магнитопровод; 12–15 – цилиндрические держатели; 16–19 – цилиндрические постоянные магниты; 20 – ферромагнитная деталь; 21 – шпиндель станка

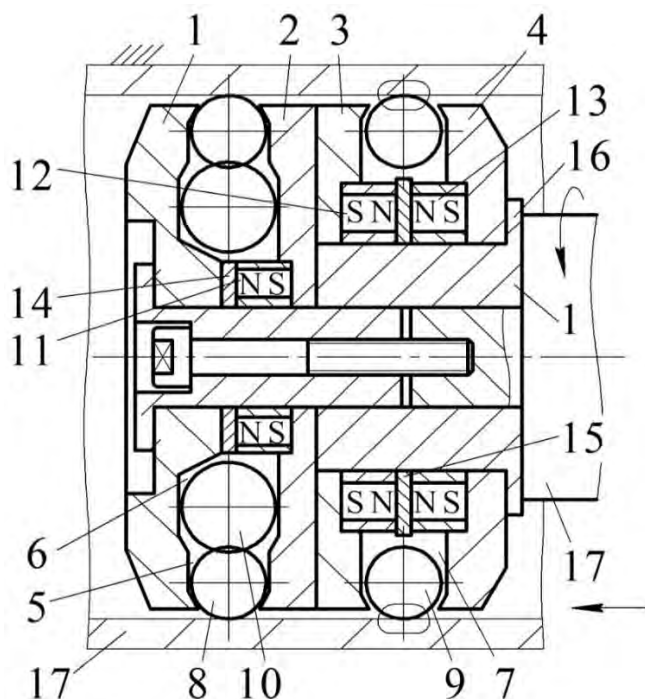


Рис. 5. Инструмент для комбинированной импульсно-ударной, магнитной и центробежно-деформационной обработки: 1–4 диски; 5–7 – кольцевые камеры; 8, 9 – деформирующие шары; 10 – шары-ударники; 11–13 – цилиндрические постоянные магниты; 14, 15 – кольцевые магнитопроводы; 16 – корпус; 17 – оправка; 18 – упрочняемая деталь

6. Комбинированная ударно-деформационная, совмещенная магнитная и центробежно-деформационная обработка.

Технология также предусматривает последовательное упрочнение поверхности детали ударно-деформационной обработкой и последующей магнитно-центробежной обработкой, совмещенной с дополнительным магнитным упрочняющим воздействием, создаваемым специальной магнитной системой инструмента (рис. 6).

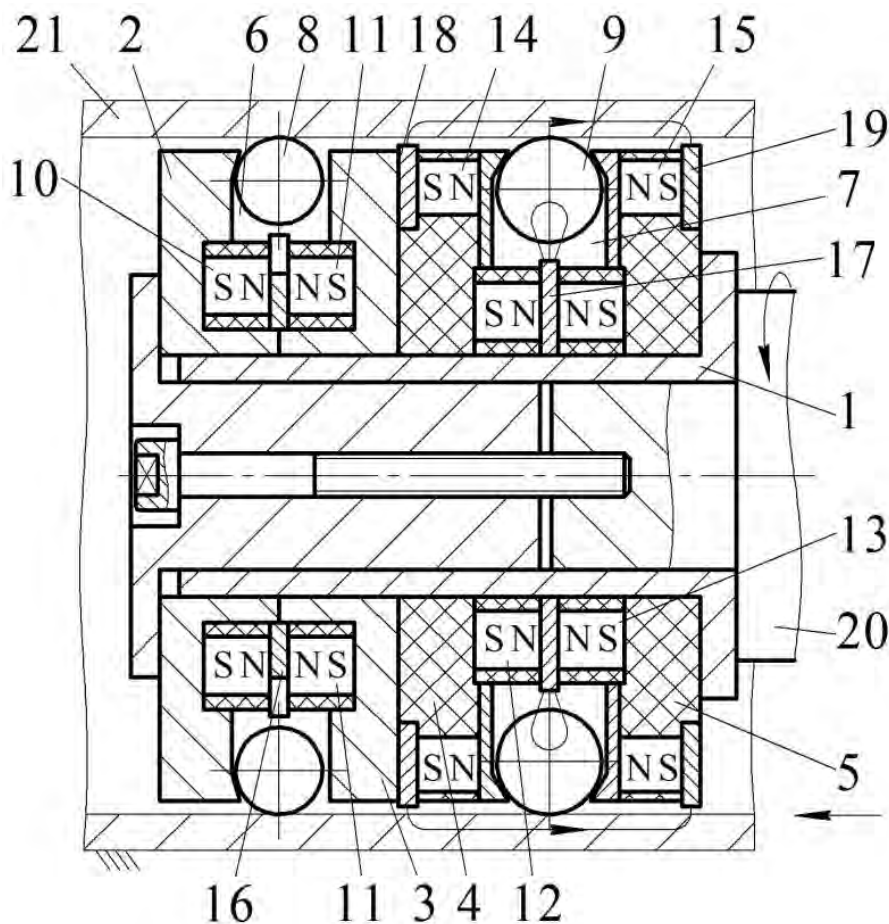


Рис. 6. Инструмент для комбинированной ударно-деформационной, совмещенной магнитной и центробежно-деформационной обработки: 1 – центрирующая втулка; 2–5 – ступицы; 6, 7 – кольцевые камеры; 8, 9 – деформирующие шары; 10–15 – цилиндрические постоянные магниты; 16 – зубчатый магнитопровод; 17–19 – кольцевые магнитопроводы; 20 – оправка; 21 – ферромагнитный цилиндр

В процессе комбинированного упрочнения деформирующие шары 8 осуществляют предварительное ударно-деформационное упрочнение. Затем на предварительно упрочненную поверхность ферромагнитного цилиндра одновременно воздействуют вращающееся магнитное поле от цилиндрических постоянных магнитов 14, 15 и деформирующие шары 9, осуществляющие тонкое поверхностное пластическое деформирование и окончательно формируя высокие характеристики качества и эксплуатационные свойства упрочняемой детали 21.

7. Комбинированная термомагнитная, совмещенная магнитная и ударно-деформационная, центробежно-деформационная обработка.

Технология предусматривает предварительный разогрев поверхностного слоя ферромагнитной детали переменным магнитным полем от цилиндрических постоянных магнитов с чередующимся расположением полюсов N и S, последующую ударно-деформационную обработку, совмещенную с магнитной обработкой, и окончательную центробежно-деформационную обработку. Для реализации технологии комбинированного упрочнения разработан специальный инструмент (рис. 7), магнитная система которого содержит постоянные цилиндрические магниты на основе алюминия, никеля и кобальта (AlNiCo) с высокой магнитной индукцией и термостойкостью более 550 °С.

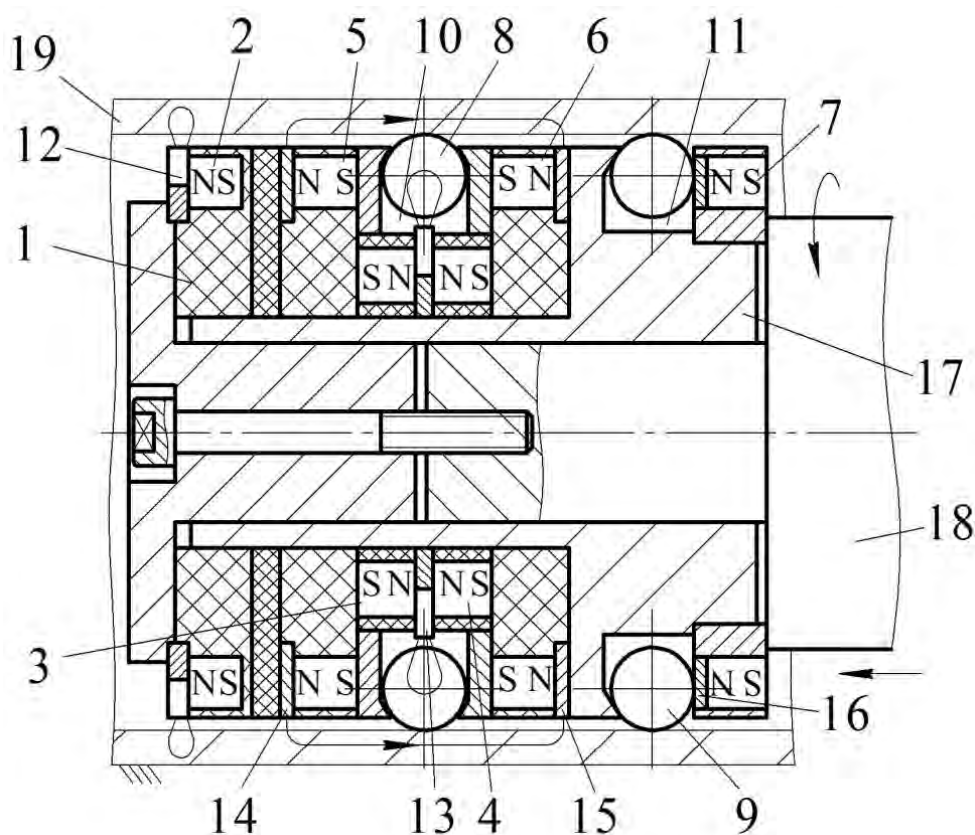


Рис. 7. Инструмент для комбинированной термомагнитной, совмещенной магнитной и ударно-деформационной, центробежно-деформационной обработки: 1 – диск; 2–7 – цилиндрические постоянные магниты; 8, 9 – ферромагнитные деформирующие шары; 10, 11 – кольцевые камеры; 12, 13 – зубчатые магнитопроводы; 14, 15 – кольцевые магнитопроводы; 16 – магнитопроводы; 17 – корпус; 18 – штанга; 19 – ферромагнитная деталь

При работе инструмента вначале поверхность ферромагнитной детали 19 разогревается переменным магнитным полем, создаваемым источниками магнитного поля 2, расположенными с чередованием полюсов N и S. При этом обеспечивается активация движения атомов кристаллической решетки материала упрочняемой детали. Затем на разогретый поверхностный слой воздействуют вращающимся

магнитным полем, создаваемым источниками магнитного поля 5, 6 и ферромагнитными деформирующими шарами 8, осуществляющими ударно-деформационное упрочнение. Ферромагнитные деформирующие шары 9 инструмента осуществляют окончательное центробежно-деформационное упрочнение.

Как показали экспериментальные исследования, разработанные инновационные технологии комбинированной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей ферромагнитных деталей позволяют получить более значимый синергетический упрочняющий эффект от используемых видов энергетического воздействия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Довгалев, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалев. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
2. Патент ВУ 18153, МПК В24В 39/02 (2006.01). Способ и инструмент для магнитно-центробежного раскатывания внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали : № а 2011513 : заявлено 11.11.2011 : опубл. 30.04.2014 / Довгалев А. М., Рыжанков Д. М. ; заявитель Бел.-Рос. ун-т. – 6 с.
3. Патент ВУ 17976, МПК В24В 39/02 (2006.01). Способ магнитно-динамического упрочнения внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали : № а 20120052 : заявлено 16.01.2012 : опубл. 28.02.2014 / Довгалев А. М., Свирепа Д. М. ; заявитель Бел.-Рос. ун-т. – 6 с.
4. **Свирепа, Д. М.** Технологическое обеспечение качества внутренней цилиндрической поверхности деталей магнитно-динамическим раскатыванием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Свирепа Дмитрий Михайлович ; Бел.-Рос. ун-т. – Могилев, 2013. – 26 с.
5. Патент RU 2068770, МПК В24В 39/02 (2006.01). Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : № 4922542/27 : заявлено 29.03.1991 : опубл. 10.11.1997 / Довгалев А. М. ; заявитель Довгалев А. М. – 7 с.
6. Патент RU 2089373, МПК В24В 39/0 (2006.01). Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : № 4924841/02 : заявлено 05.04.1991 : опубл. 10.09.1997 / Довгалев А. М. ; заявитель Довгалев А. М. – 7 с.
7. **Довгалев, А. М.** Теоретические и технологические основы отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов : дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Довгалев Александр Михайлович ; Бел.-Рос. ун-т. – Могилев, 2024. – 303 л.
8. Патент ВУ 22193, МПК В24В 39/02 (2006.01). Способ и устройство для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности отверстия ферромагнитной детали : № а 20140015 : заявлено 03.01.2014 : опубл. 30.10.2018 / Шелег В. К., Довгалев А. М., Жолобов А. А., Свирепа Д. М., Сухоцкий С. А., Мовчан М. В. ; заявитель Бел.-Рос. ун-т. – 8 с.