

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.793.044(045)(476)

**МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ, СОВМЕЩЕННОЕ  
И КОМБИНИРОВАННОЕ НАКАТЫВАНИЕ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Шелег В.К. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Довгалев А.М., Сухоцкий С.А., Свирепа Д.М. (ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь)

*В статье выполнен анализ существующих методов поверхностной упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей, в том числе методов поверхностного пластического деформирования. Содержатся сведения о разработанных инновационных методах магнитно-динамического, совмещенного магнитно-динамического и комбинированного магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей ферромагнитных деталей горно-шахтного оборудования. Представлены конструкции инструментов для реализации указанных методов, даны рекомендации по их применению в промышленности.*

**Ключевые слова:** магнитно-динамическое накатывание, поверхностное пластическое деформирование, магнитная система, совмещенная обработка, деформирующие шары, импульсно-ударное деформирование, магнитное поле, наноразмерная субзеренная структура.

**Введение**

В горном машиностроении существует достаточно широкая номенклатура деталей, имеющих плоские рабочие поверхности, к качественным характеристикам и эксплуатационным свойствам которых предъявляются высокие требования. К числу таких деталей относятся: направляющие буровых установок, плиты, корпуса, клинья, сухари, ножи дробильных машин, пластины, скребки и др.

Для повышения износостойкости плоских поверхностей указанных деталей разработано большое количество методов поверхностного упрочнения: концентрированным потоком энергии (электронно-лучевая обработка, вакуумное ионно-плазменное упрочнение), лазерная обработка, плазменное и детонационное напыление, термическая и химико-термическая обработки, магнитная обработка (постоянным переменным и импульсным полем) и др. [1].

Однако многие из указанных методов поверхностного упрочнения сложны в реализации, осуществляются на специальном дорогостоящем оборудовании, имеют высокую трудоемкость и себестоимость или до настоящего времени не нашли широкого применения в машиностроении.

Особое место в отделочно-упрочняющей обработке плоских поверхностей отводится методам поверхностного пластического деформирования (ППД), которые являются универсальными, реализуются на обычном металлорежущем оборудовании, позволяют обеспечить упрочнение поверхностного слоя деталей и повысить их эксплуатационные свойства [2]. Среди методов ППД плоских поверхностей наибольший эффект упрочнения деталей обеспечивают динамические методы: обработка дробью, виб-

ронакатывание, вибровыглаживание, ультразвуковая, центробежно-ударная, пневмо-вибродинамическая обработки и др. [3, 4]. В тоже время и динамическим методам ППД характерны свои недостатки: для сообщения колебаний деформирующим элементам используются достаточно сложные технологические системы; имеет место относительно невысокая интенсивность деформирования исходных микронеровностей поверхности; не всегда обеспечиваются требуемые характеристики упрочнения поверхностного слоя и эксплуатационные свойства поверхностей деталей.

В связи с этим актуальной технологической задачей является разработка инновационных методов ППД плоских поверхностей деталей горно-шахтного оборудования, не имеющих указанных выше недостатков.

В соответствии с поставленной задачей разработаны следующие эффективные методы отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей: магнитно-динамическое накатывание, совмещенное магнитно-динамическое накатывание, комбинированное магнитно-динамическое накатывание.

### Магнитно-динамическое накатывание

Магнитно-динамическое накатывание (МДН) осуществляется деформирующими шарами, взаимодействующими с упрочняемой плоской поверхностью, получающими энергию импульсно-ударного деформирования от приводных шаров посредством вращающегося магнитного поля инструмента [5].

МДН, в отличие от известных динамических методов ППД, обеспечивает интенсивное деформирование шероховатости упрочняемой поверхности, увеличение характеристик упрочненного поверхностного слоя (в том числе глубины), имеет высокую производительность, реализуется на существующих типах фрезерных и продольно-строгальных станков, оснащенных фрезерными (шпиндельными) бабками для закрепления инструмента.

Схема реализации МДН плоских поверхностей с применением двухрядного инструмента изображена на рисунке 1 [6].

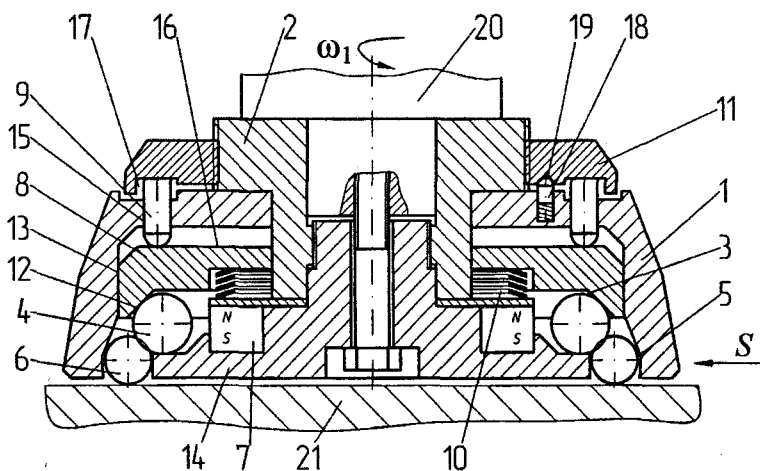


Рисунок 1. – Инструмент для МДН плоских поверхностей с устройством регулирования натяга между деформирующими и приводными шарами

Инструмент содержит: корпус 1 из немагнитопроводного материала; оправку 2; кольцевую камеру 3 с приводными шарами 4; кольцевую камеру 5 с деформирующими

шарами 6; кольцевой постоянный магнит 7 осевой намагниченности для разгона приводных шаров 4. В состав инструмента входит устройство регулирования натяга (величина перекрытия положения вершин деформирующих и приводных шаров, расположенная на отрезке, соединяющем их геометрические центры) между деформирующими 6 и приводными шарами 4, выполненное в виде направляющей втулки 8, толкателей 9, тарельчатых пружин 10 и лимба 11. На торце направляющей втулки 8 изготовлена внутренняя коническая поверхность 12 соосно оси инструмента. Направляющая втулка 8 установлена в отверстии 13 корпуса 1. Кольцевой постоянный магнит 7 закреплен на оправке 2 посредством стакана 14. Тарельчатые пружины 10 расположены между кольцевым постоянным магнитом 7 и торцом направляющей втулки 8. Толкатели 9, размещенные в аксиальных отверстиях 15 корпуса 1, одной стороной контактируют с торцом 16 направляющей втулки 8, а другой – входят в кольцевой паз 17 лимба 11. Лимб 11 установлен на оправке 2 и имеет возможность осевого перемещения посредством резьбового соединения. Для предотвращения произвольного поворота лимба 11 предусмотрен фиксатор 18, который закреплен в корпусе 1 и входит в одно из конусных отверстий 19 упомянутого лимба.

Инструмент работает следующим образом. Оправку 2 закрепляют в шпинделе 20, а обрабатываемую плоскую деталь 21 – на столе фрезерного станка. Оправке 2 сообщают вращение, а детали 21 – движение продольной подачи. Механическая энергия вращения оправки 2 передается приводным шарам 4 посредством магнитного поля, создаваемого кольцевым постоянным магнитом 7. В результате приводные шары 4 перемещаются в окружном направлении кольцевой камеры 3 с угловой скоростью  $\omega_1$  и периодически сталкиваются с деформирующими шарами 6. При этом последние под действием динамической силы от приводных шаров 4 внедряются в поверхность детали 21 и осуществляют ее многократное импульсно-ударное деформирование.

При переналадке инструмента на другой тип обрабатываемых деталей (или режим обработки) шпиндель 20 станка останавливают. Лимб 11 поворачивают относительно продольной оси инструмента на определенный угол. При повороте лимба 11 по часовой стрелке его торцовая поверхность давит на толкатели 9 и смещает на требуемую величину направляющую втулку 8. Внутренняя коническая поверхность 12 направляющей втулки 8 при этом изменяет радиальное положение приводных шаров 4, уменьшая величину их натяга с деформирующими шарами 6. Соответственно, при работе инструмента уменьшается и сила динамического воздействия деформирующих шаров 6 на обрабатываемую поверхность детали 21. Фиксатор 18 входит в конусное отверстие 19 и предотвращает вращение лимба 11 в процессе обработки. При повороте лимба 11 против часовой стрелки величина радиального расхождения приводных шаров 4 увеличивается, что приводит к увеличению натяга между шарами 4, 6 инструмента и силы динамического воздействия деформирующих шаров 6 на обрабатываемую поверхность детали 21.

Разработанный инструмент обеспечивает повышение производительности процесса упрочняющей обработки за счет уменьшения вспомогательного времени на его переналадку на другой динамический режим обработки. Инструмент позволяет регулировать силовые характеристики процесса упрочнения и тем самым управлять качеством обработки.

Однако метод МДН и инструмент для его осуществления не предусматривают комплексного энергетического воздействия на обрабатываемую плоскую поверхность ферромагнитной детали, что не в полной мере реализует эффект упрочняющей обработки.

### Совмещенное магнитно-динамическое накатывание

Высокую эффективность отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей обеспечивает разработанный метод совмещенного магнитно-динамического накатывания (СМДН). Согласно методу СМДН на поверхность ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся постоянным (переменным) магнитным полем и многократным импульсно-ударным деформированием [7-9]. Совмещение во времени процессов магнитной упрочняющей обработки и многократного импульсно-ударного деформирования обеспечивает положительное влияние процессов друг на друга и получение в поверхностном слое деталей наноразмерной субзеренной структуры, определяющей повышение их антифрикционных характеристик и эксплуатационных свойств.

Реализация метода СМДН на примере упрочнения плоских поверхностей ферромагнитных деталей с помощью комбинированного инструмента изображена на рисунке 2.

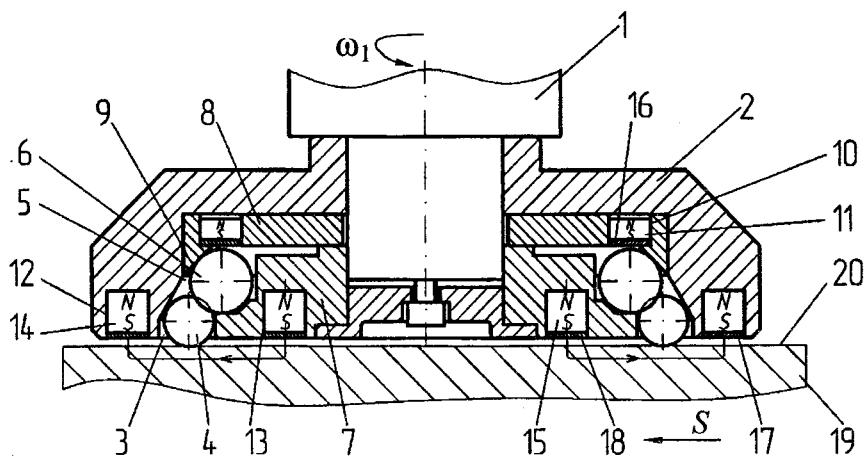


Рисунок 2. – СМДН плоских поверхностей ферромагнитных деталей комбинированным инструментом

Комбинированный инструмент для осуществления СМДН плоских поверхностей содержит: оправку 1, корпус 2, кольцевую камеру 3 с деформирующими шарами 4, кольцевую камеру 5 с приводными шарами 6, стакан 7 и две магнитные системы. Первая магнитная система предназначена для разгона приводных шаров 6 и включает диск 8 с конической поверхностью 9 и аксиальными отверстиями 10, цилиндрические постоянные магниты 11, установленные в упомянутых аксиальных отверстиях. Другая магнитная система предназначена для воздействия вращающимся магнитным полем на плоскую поверхность ферромагнитной детали и состоит из установленных с равномерным угловым шагом в отверстиях 12, 13 цилиндрических постоянных магнитов 14, 15. С целью повышения долговечности цилиндрических постоянных магнитов 11, 14, 15 на их торцы нанесено тонкое пластмассовое покрытие 16, 17, 18. Все элементы инструмента (за исключением деформирующих 4 и приводных 6 шаров) выполнены из немагнитопроводных материалов.

Оправку 1 комбинированного инструмента устанавливают в шпинделе, а упрочняемую ферромагнитную деталь 19 с плоской поверхностью 20 закрепляют на столе фрезерного станка. Вертикальным перемещением стола станка деформирующие шары 4 вводят в контакт с упрочняемой поверхностью 20. Шпинделю сообщают вращение, а

столу станка – движение подачи. При вращении инструмента механическая энергия вращения оправки 1 передается приводным шарам 6 (посредством магнитного поля, создаваемого цилиндрическими постоянными магнитами 11). В результате приводные шары 6 разгоняются в окружном направлении кольцевой камеры 5 и периодически сталкиваются с деформирующими шарами 4. Под действием динамической силы от приводных шаров 6 деформирующие шары 4 внедряются в поверхность 20 детали 19 и осуществляют ее многократное импульсно-ударное деформирование. Одновременно с импульсно-ударным деформированием на поверхностный слой обрабатываемой ферромагнитной детали 19 действует вращающееся магнитное поле, создаваемое цилиндрическими постоянными магнитами 14, 15 (на рисунке 2 линии индукции магнитного поля показаны тонкими линиями). При установке в отверстиях 12, 13 цилиндрических постоянных магнитов 14, 15 с идентичным расположением полюсов N и S на элементарный участок обрабатываемой поверхности 20 детали 19 действует вращающееся постоянное магнитное поле. При установке цилиндрических постоянных магнитов 14 и 15 в отверстиях 12, 13 с чередованием полюсов N и S на элементарный участок поверхности 20 действует вращающееся переменное магнитное поле (с периодическим изменением направления линий индукции магнитного поля на  $180^\circ$ ), что вызывает перемагничивание поверхностного слоя.

Комплексное магнитно-силовое воздействие на деформируемый слой металла способствует дроблению зерен до наноразмерной величины, увеличению числа дислокаций в структуре металла, способствует протеканию процессов диффузии и вызываемых ею фазовых и структурных преобразований в модифицируемом поверхностном слое упрочняемой детали 19. Таким образом, в результате СМДН в ферромагнитной детали 19 формируется модифицированный поверхностный слой с высокими качественными характеристиками и эксплуатационными свойствами.

Однако СМДН не предусматривает окончательную (финишную) упрочняющую обработку плоской поверхности ферромагнитной детали вращающимся магнитным полем, что несколько снижает глубину модифицированного поверхностного слоя.

### **Комбинированное магнитно-динамическое накатывание**

Комбинированное магнитно-динамическое накатывание (КМДН) предусматривает последовательную упрочняющую обработку плоских поверхностей ферромагнитных деталей вращающимся постоянным (переменным) магнитным полем (опережающая магнитная обработка), многократным импульсно-ударным деформирующим и, в заключение, вращающимся постоянным магнитным полем (окончательная магнитная обработка) [9]. При комбинированном магнитно-динамическом накатывании имеет место особая модификация поверхностного слоя, при которой основная роль отводится магнитной упрочняющей обработке, а импульсно-ударному деформированию – вспомогательная функция, связанная с деформированием поверхностного слоя, уже измененного опережающей магнитной обработкой. При этом сказывается положительное влияние упомянутых процессов друг на друга, что приводит к увеличению диффузионных процессов в упрочняемом металле, активному протеканию фазовых и структурных преобразований в модифицируемом слое.

Для совмещения перечисленных процессов упрочняющей обработки в один переход технологической операции разработан инструмент, изображенный на рисунке 3.

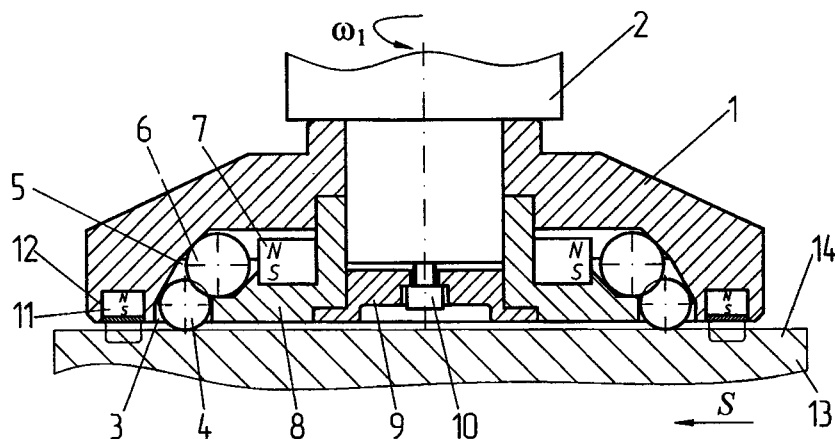


Рисунок 3. – Инструмент для КМДН плоских поверхностей ферромагнитных деталей

В состав инструмента входят: корпус 1, оправка 2, кольцевая камера 3 с деформирующими шарами 4, кольцевая камера 5 с приводными шарами 6, кольцевой постоянный магнит 7 (для воздействия на приводные шары 6), держатель 8, шайба 9, винт 10, цилиндрические постоянные магниты 11, установленные с равномерным угловым шагом в аксиальных отверстиях 12, выполненных в корпусе 1. Радиус расположения геометрических центров цилиндрических постоянных магнитов 11 превышает радиус расположения вершин деформирующих шаров 4. Все детали инструмента (за исключением деформирующих 4 и приводных 6 шаров) изготовлены из немагнитопроводных материалов.

Оправку 2 инструмента устанавливают в шпинделе, а деталь 13 закрепляют на столе фрезерного станка. Вертикальным перемещением стола станка вводят плоскую поверхность 14 детали 13 в контакт с вершинами деформирующих шаров 4, а затем устанавливают требуемую величину натяга между деформирующими 4 и приводными 6 шарами. Деталь 13 отводят в исходное положение. Инструмент вращают, а деталь 13 перемещают с подачей  $S$ . Первым на упрочняемую плоскую поверхность 14 воздействует вращающееся магнитное поле, создаваемое цилиндрическими постоянными магнитами 11, осуществляя первичную модификацию поверхностного слоя. Затем на упрочненную вращающимся магнитным полем поверхность воздействуют деформирующими шарами 4, осуществляющими импульсно-ударное деформирование. При этом деформирующие шары 4 получают энергию деформирования от приводных шаров 6 посредством вращающегося магнитного поля, создаваемого кольцевым постоянным магнитом 7. В процессе импульсно-ударного деформирования поверхностный слой детали 13 получает еще большую модификацию. Одновременно на плоской поверхности 14 формируется благоприятный маслоудерживающий микрорельеф в виде сетки пересекающихся микролунок от деформирующих шаров 4. При перемещении детали относительно инструмента на величину диаметра, определяющего расстояние между геометрическими центрами цилиндрических постоянных магнитов 11, окончательное воздействие на уже упрочненную плоскую поверхность 14 в очередной раз оказывает вращающееся постоянное или переменное магнитное поле, создаваемое цилиндрическими постоянными магнитами 11, тем самым осуществляя финишную упрочняющую обработку и окончательно модифицируя поверхностный слой детали 13.

Последовательно реализуемые упрочняющие воздействия позволяют получить на детали 13 модифицированный поверхностный слой на значительную глубину, обладающий высокими качественными и эксплуатационными свойствами.

Магнитно-динамическое накатывание рекомендуется для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей из цветных металлов и сплавов, а также из ферромагнитных деталей, к которым предъявляются средние требования к качественным характеристикам и эксплуатационным свойствам [9].

Совмещенное магнитно-динамическое накатывание приемлемо для упрочняющей обработки плоских поверхностей ферромагнитных деталей, к которым предъявляются высокие требования по износостойкости в связи с получением в поверхностном слое наноразмерной субзеренной структуры, определяющей высокие антифрикционные и эксплуатационные свойства поверхности [9].

Комбинированное магнитно-динамическое накатывание рекомендуется для упрочнения плоских поверхностей ферромагнитных деталей, работающих при циклических нагрузках и требующих существенной глубины упрочнения поверхностного слоя.

### Заключение

Представлены инновационные методы отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей машин, при которых импульсно-ударное деформирование осуществляется за счет взаимодействия деформирующих и приводных шаров во вращающемся магнитном поле.

Разработаны конструкции инструментов, содержащие магнитные системы, предназначенные для осуществления магнитно-динамического, совмещенного магнитно-динамического и комбинированного магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей. Магнитные системы инструментов спроектированы по модульному принципу на основе применения цилиндрических постоянных магнитов из редкоземельных материалов.

Даны рекомендации по применению созданных методов отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей в производстве.

### Список использованных источников

1. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – Киев: Наукова думка, 1984. – 272 с.
2. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
3. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. / М.С. Поляк. – М.: Л.В.М. – Скринт, Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 832 с.
4. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. / М.С. Поляк. – М.: Л.В.М. – Скринт, Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 688 с.
5. Инструмент и способ магнитно-динамического упрочнения плоской поверхности детали: пат. 17545 Респ. Беларусь, МПК В24В39/06 / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский ун-т». – № а20111278; заявл. 03.10.11; опубл. 30.10.13 // Афицыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013.
6. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей: пат. 15262 Респ. Беларусь, МПК В24В39/06 / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский ун-т». – № а20091368; заявл. 25.09.09; опубл. 30.12.11 // Афицыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6. – С. 87-88.

7. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 РФ, МПК В24В39/02 / А.М. Довгалев; заявитель А.М. Довгалев. – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96 // Бюллетень. – 1996. – № 31.

8. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2089373 РФ, МПК В24В39/00 / А.М. Довгалев; заявитель А.М. Довгалев. – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97 // Бюллетень. – 1997. – № 25.

9. Довгалев, А.М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А.М. Довгалев. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.

---

**Sheleg V.K., Dovgalev A.M., Sukhotskiy S.A., Svirepa D.M.**

**Magnetic-dynamic, concurrent and combined rolling of flat surfaces**

*The article analyzes the existing methods of surface hardening of flat parts surfaces, including methods of surface plastic deformation. Information is provided on the developed innovative methods of magnetic-dynamic, concurrent magnetic-dynamic and combined magnetic-dynamic rolling of flat surfaces of ferro-magnetic parts of mining equipment. The design of tools for the implementation of these methods is presented, and recommendations for their use in industry are given.*

**Keywords:** *magnetodynamic rolling, surface plastic deformation, magnetic system, combined treatment, deforming balls, pulse-impact deformation, magnetic field.*

Поступила в редакцию 04.06.2018 г.