

---

УДК 621.787

*А. М. Довгалев*

---

**КОМБИНИРОВАННОЕ МАГНИТНО-ВИБРОДИНАМИЧЕСКОЕ  
НАКАТЫВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕРСТИЙ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ  
МАШИН**

---

UDC 621.787

*A. M. Dovgalev*

---

**COMBINED MAGNETIC-VIBRODYNAMIC ROLL FORMING OF THE SURFACE  
OF OPENINGS IN NON-RIGID MACHINE COMPONENTS**

---

**Аннотация**

Представлен новый способ комбинированной отделочно-упрочняющей обработки, при котором осуществляют комплексное воздействие на поверхностный слой нежестких деталей машин вращающимся магнитным полем инструмента и вибродинамическим упрочнением деформирующими шарами. Разработаны конструкции инструментов, содержащих магнитную систему на основе постоянных магнитов, обеспечивающую перемагничивание поверхностного слоя ферромагнитной детали и сообщение деформирующим шарам колебательных движений.

**Ключевые слова:**

нежесткая заготовка; деформирующие шары; магнитная система; накатывание; постоянный магнит; перемагничивание; вибродинамическое упрочнение.

**Abstract**

The paper deals with a new method for the combined finishing-hardening treatment, under which a complex action on the surface layer of non-rigid machine parts is performed both by a rotating magnetic field of the tool and vibrodynamic hardening by deforming balls. Tools have been designed which have a magnetic system based on permanent magnets, which provides magnetization reversal of the surface layer of a ferromagnetic part and imparts vibratory motions to deforming balls.

**Key words:**

non-rigid workpiece, deforming balls, magnetic system, roll forming, permanent magnet, magnetization reversal, vibrodynamic hardening.

---

**Введение**

Повышение требований по снижению массогабаритных характеристик технических систем приводит к применению в конструкциях достаточно большого количества нежестких деталей машин различной конфигурации, в числе которых кольца, втулки, гильзы, цилиндры, трубы, полые штоки и т. д.

В связи с этим возрастает актуальность разработки новых технологических методов обеспечения качества

нежестких деталей машин, осуществляемых с малыми усилиями обработки и реализуемых на финишных операциях технологического процесса [1].

Высокие качественные характеристики поверхности нежестких деталей машин обеспечивают методы поверхностного пластического деформирования. Как показывает анализ литературных источников, наиболее универсальным методом поверхностного пластического деформирования поверхностей нежест-

ких деталей машин является алмазное выглаживание, при котором усилие деформирования не превышает 200 Н [2].

Однако метод алмазного выглаживания осуществляется с малыми подачами инструмента и, соответственно, характеризуется низкой производительностью упрочняющей обработки.

Высокую производительность и качество обеспечивает метод пневмовибродинамической обработки поверхностей нежестких деталей машин, разработанный профессором А. П. Минаковым. Согласно методу процесс поверхностного пластического деформирования осуществляют деформирующими шарами, взаимодействующими с поверхностью заготовки, рабочие колебательные движения которым сообщают энергией сжатого воздуха, выходящего из специальных сопел инструмента [1].

К некоторым недостаткам пневмовибродинамического метода упрочнения следует отнести необходимость получения сжатого воздуха и его подвода к зоне обработки. Это несколько снижает технологические возможности метода пневмовибродинамической упрочняющей обработки.

### **Постановка задачи**

Важным направлением усовершенствования вибродинамической отделочно-упрочняющей обработки является использование энергии магнитного поля инструмента для сообщения колебаний деформирующим шарам с целью обеспечения их периодического силового взаимодействия с упрочняемой поверхностью нежесткой детали. Перспективным также является разработка инструментов, отличающихся от известных наличием магнитной системы, предназначенной для реализации процесса вибродинамического упрочнения и одновременного намагничивания поверхностного слоя упрочняемой детали.

### **Основная часть**

В соответствии с поставленной задачей разработан высокоэффективный метод комбинированного магнитно-вибродинамического накатывания, при котором на деформирующие шары и упрочняемую поверхность ферромагнитной детали воздействуют переменным магнитным полем с индукцией 0,1...0,2 Тл. При этом переменное магнитное поле создают вращением источников магнитного поля, расположенных в инструменте с последовательным чередованием полюсов N и S [3, 4].

Для повышения интенсивности процесса комбинированного упрочнения инструмент вращают со скоростью, обеспечивающей совмещение частоты воздействия переменного магнитного поля с собственной частотой колебаний деформирующих шаров.

Предложенный комбинированный метод магнитно-вибродинамического упрочнения поверхностей нежестких деталей машин реализуется с малыми усилиями деформирования и гарантирует высокую интенсивность процесса поверхностного пластического деформирования.

### **Конструкции инструментов для реализации комбинированного метода упрочнения**

На рис. 1 представлена одна из первых конструкций инструментов для реализации комбинированного магнитно-вибродинамического накатывания поверхностей деталей машин.

Инструмент содержит: оправку 1; диски 2, 3; кольцевой постоянный магнит 4 осевой намагниченности; кольцевую камеру 5; деформирующие шары 6; вставки 7 (рис. 1, а, б). Деформирующие шары 6 установлены в кольцевой камере 5 с возможностью вращения вокруг продольной оси 8 инструмента и осуществления радиальных колебаний.

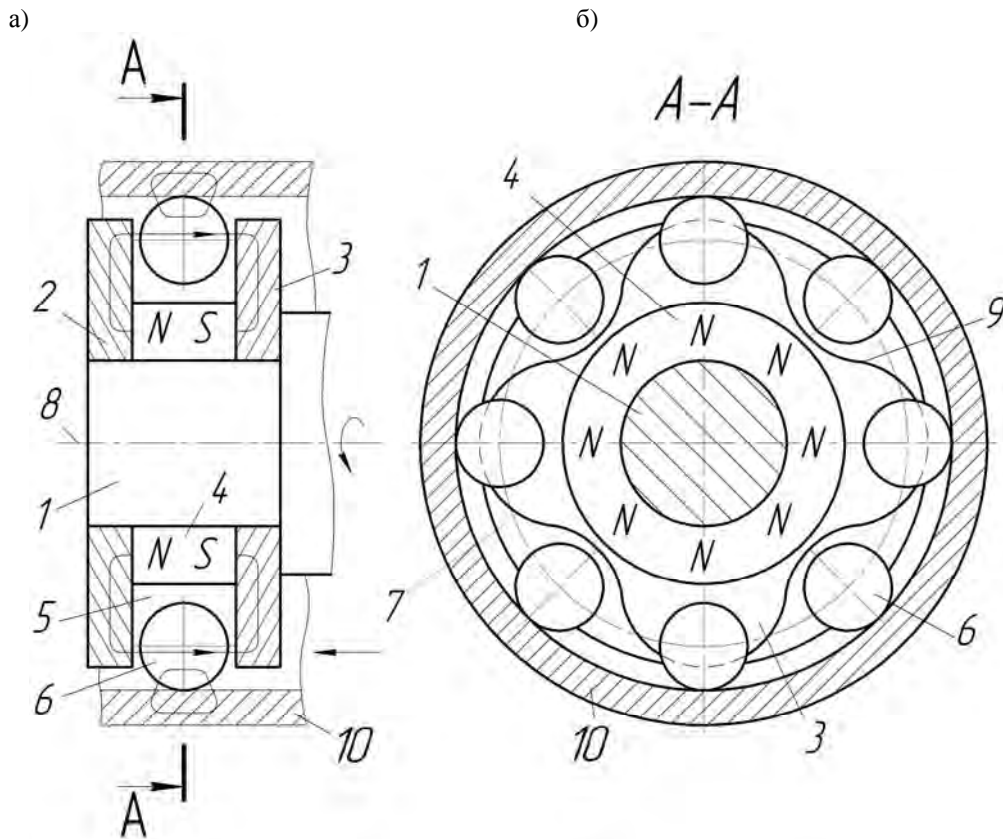


Рис. 1. Конструкция инструмента для комбинированного магнитно-вибродинамического накатывания с магнитной системой на основе кольцевого постоянного магнита: а – общий вид; б – поперечное сечение инструмента

Оправка 1, кольцевой постоянный магнит 4, диски 2, 3 размещены соосно. Периферийная поверхность дисков 2, 3 имеет периодический профиль 9 с амплитудой, превышающей диаметр деформирующих шаров 6. Во впадинах периодического профиля 9 дисков 2, 3 установлены вставки 7 (см. рис. 1, б). Оправка 1 и вставки 7 изготовлены из магнитопроводного материала. Диски 2, 3 и деформирующие шары 6 выполнены из ферромагнитных материалов.

Инструмент вводят в полость упрочняемой нежесткой заготовки 10 и совмещают его продольную ось 8 с осью отверстия. Инструмент вращают и перемещают с подачей вдоль упрочняемой поверхности. Силовые линии магнитного поля от кольцевого постоянного магнита 4 замыкаются на ферромагнитные диски 2, 3, имеющие периоди-

ческий профиль 9 и деформирующие шары 6 (на рис. 1, а силовые линии магнитного поля показаны тонкой линией). В результате под действием вращающегося переменного магнитного поля деформирующие шары 6 перемещаются по кольцевой камере 5 инструмента, прижимаются центробежной силой к поверхности отверстия заготовки 10 и осуществляют ее поверхностное пластическое деформирование. При этом угловая скорость вращения дисков 2, 3 инструмента превышает угловую скорость вращения деформирующих шаров 6. Так как диски 2, 3 имеют периодический профиль 9, амплитуда которого превышает диаметр деформирующих шаров 6, то на последние, наряду с центробежной силой, действует противоположно направленной радиальной магнитной силой. При расположении деформирующих

шаров 6 напротив впадины периодического профиля 9 дисков 2, 3 радиально направленная магнитная сила превышает центробежную. В связи с этим деформирующий шар 6 отрывается от упрочняемой поверхности заготовки 10.

Таким образом, периодический профиль 9 дисков 2, 3 обеспечивает вибродинамическое воздействие деформирующих шаров 6 на упрочняемую поверхность детали 10. Одновременно осуществляется намагничивание поверхностного слоя детали 10, что и вызывает комбинированное вибродина-

мическое и магнитное упрочнение с минимальными силами деформирования [5].

Однако указанный инструмент не обеспечивает периодическое изменение направления силовых линий магнитного поля, действующего на деформирующие шары и локальный участок поверхности упрочняемой детали. Это несколько снижает эффективность процесса комбинированного магнитно-вибродинамического накатывания.

На рис. 2 представлен инструмент, не имеющий вышеописанного недостатка.

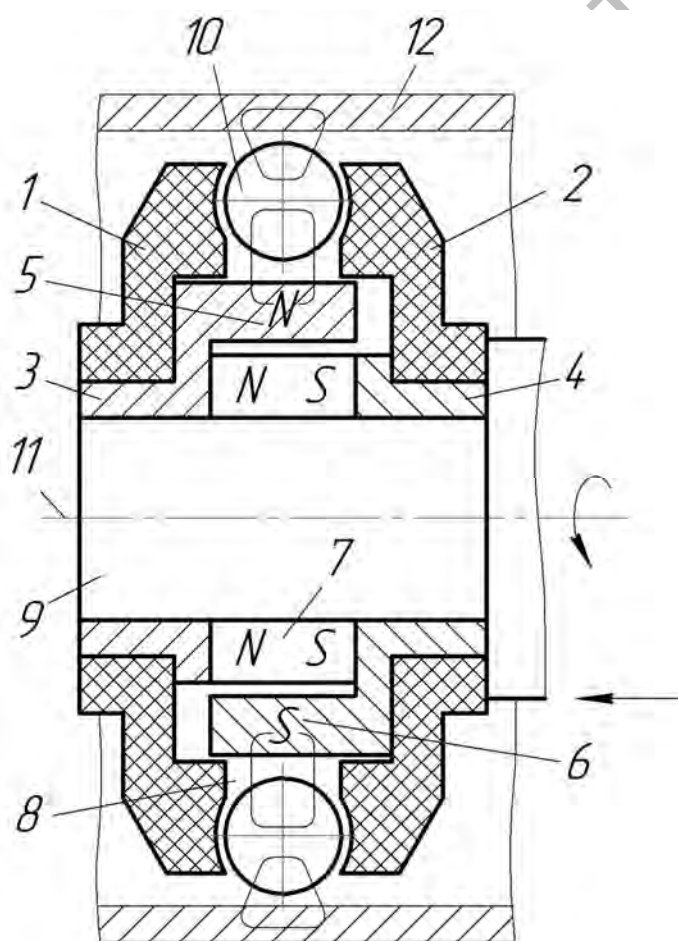


Рис. 2. Конструкция инструмента с магнитной системой на основе кольцевого постоянного магнита, обеспечивающей перемагничивание деформирующих шаров и упрочняемой поверхности заготовки

В его состав входят: диски 1, 2; кольцевые магнитопроводы 3, 4 с торцовыми зубьями 5, 6; постоянный кольцевой магнит 7 осевой намагниченно-

сти; кольцевая камера 8; оправка 9; деформирующие шары 10, установленные в кольцевой камере 8 с возможностью вращения вокруг продольной оси 11 ин-

струмента и колебаний в плоскости их вращения. Кольцевые магнитопроводы 3, 4 взаимодействуют с соответствующими торцами кольцевого постоянного магнита 7. Торцевые зубья 5, 6 направлены навстречу друг другу, смещены по углу и расположены с зазором во впадинах сопрягаемых зубьев кольцевых магнитопроводов 3, 4. В результате внизу кольцевой камеры 8 равномерно распределены по окружности зубья 5, 6, намагниченные с последовательным чередованием полюсов N и S (это обеспечивает в процессе обработки периодическое воздействие магнитного поля на деформирующие шары 10 и изменение направления силовых линий, т. е. перемагничивание). Кольцевые магнитопроводы 3, 4 и диски 1, 2 закреплены на оправке 9 инструмента. Диски 1, 2 и оправка 9 изготовлены из немагнитного материала.

Продольную ось 11 инструмента совмещают с осью отверстия заготовки 12. Инструмент вращают и перемещают с осевой подачей. Вращающиеся

намагниченные торцевые зубья, имеющие чередование полюсов N и S, периодически воздействуют на деформирующие шары 10 и упрочняемую поверхность заготовки 12 (силовые линии магнитного поля показаны на рис. 2 тонкой линией). В результате колеблющиеся деформирующие шары 10 осуществляют вибродинамическую упрочняющую обработку намагниченной, а следовательно, находящейся в напряженном состоянии поверхности заготовки 12. Это интенсифицирует процесс поверхностного пластического деформирования.

Недостатком представленного на рис. 2 инструмента является сложность его переналаживания на другой диаметральный размер упрочняемой заготовки, т. к. требуется замена источника магнитного поля.

Широкое применение получил инструмент с магнитной системой на основе цилиндрических постоянных магнитов, легко переналаживаемый на другой размер отверстия упрочняемой детали (рис. 3).

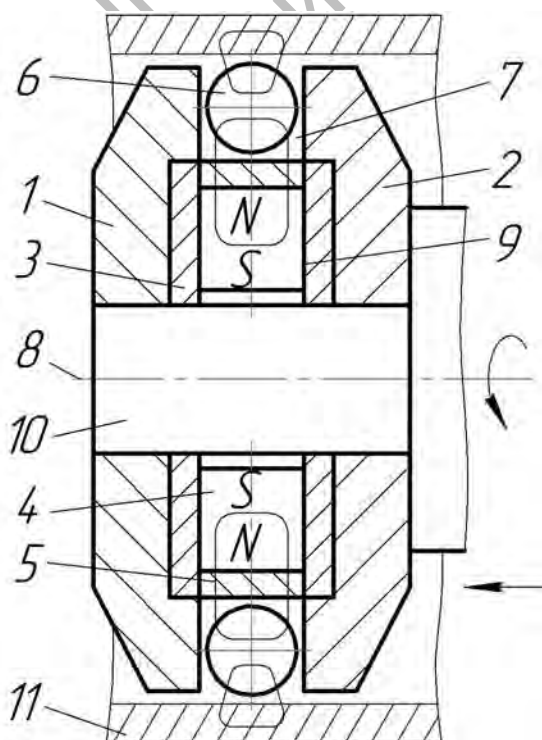


Рис. 3. Конструкция инструмента с магнитной системой на основе цилиндрических постоянных магнитов

В состав инструмента входят следующие основные элементы: диски 1, 2; магнитная система, состоящая из обоймы 3, цилиндрических постоянных магнитов 4 и цилиндрических магнитопроводов 5; деформирующие шары 6. Диски 1, 2 образуют кольцевую камеру 7. Деформирующие шары 6 свободно установлены в кольцевой камере 7 с возможностью вращения вокруг продольной оси 8 инструмента. Цилиндрические постоянные магниты 4 размещены в радиальных отверстиях 9, выполненных в обойме 3 с равномерным угловым шагом. Количество цилиндрических постоянных магнитов 4 четное, и они расположены с последовательным чередованием полюсов S и N. Цилиндрические магнитопроводы 5, запрессованные в радиальных отверстиях 9 обоймы 3, взаимодействуют с торцами цилиндрических постоянных магнитов 4 и выходят в кольцевую камеру 7. Диски 1, 2 и обойма 3 установлены соосно на оправке 10 инструмента. Оправка 10, диски 1, 2 и обойма 3 выполнены из немагнитного материала.

Отделочно-упрочняющую обработку поверхности отверстия осуществляют следующим образом. Нежесткую деталь 11 закрепляют в технологическом приспособлении, а оправку 10 – в шпинделе металлорежущего станка. Вводят деформирующие шары 6 в полость отверстия детали 11. Оправку 10 вращают и перемещают инструмент вдоль упрочняемой поверхности. Дискретное расположение цилиндрических постоянных магнитов 4 вдоль кольцевой камеры 7 обеспечивает периодическое воздействие вращающегося магнитного поля чередующейся полярности S и N на деформирующие шары 6 и упрочняемую поверхность детали 11. В результате колеблющиеся деформирующие шары 6 осуществляют вибродинамическое упрочнение намагниченной поверхности детали 11.

Количество кольцевых камер инструмента с расположенными в них деформирующими шарами выбирают в зависимости от типа производства и требуемой производительности упрочняющей обработки [6, 7].

Комплексное магнитное и вибродинамическое воздействие на деталь интенсифицирует процесс модификации ее поверхностного слоя.

Для усиления магнитного воздействия на поверхность ферромагнитной упрочняемой детали предназначен инструмент, изображенный на рис. 4 [8].

Инструмент включает: оправку 1; диски 2, 3 со ступицами 4, 5; обойму 6; деформирующие шары 7; цилиндрические постоянные магниты 8; цилиндрические магнитопроводы 9. Диски 2, 3 одеты ступицами 4, 5 соосно на оправку 1 и образуют кольцевую камеру 10. Деформирующие шары 7 расположены свободно в кольцевой камере 10 инструмента. Цилиндрические постоянные магниты 8 установлены с равномерным угловым шагом и чередованием полюсов N и S в радиальных отверстиях 11 обоймы 6.

Инструмент снабжен дополнительной магнитной системой для перемагничивания поверхностного слоя ферромагнитной детали, выполненной в виде цилиндрических постоянных магнитов 12, 13 и магнитопроводов 14, 15. Цилиндрические постоянные магниты 12, 13 размещены в наклонно выполненных радиальных отверстиях 16, 17 с чередованием полюсов N и S и их угловое положение в дисках 2, 3 идентично. При этом смежные цилиндрические постоянные магниты 12, 13 имеют различное расположение полюсов N и S.

Продольную ось инструмента совмещают с осью отверстия упрочняемой детали 18. Оправку 1 вращают от шпинделя станка и перемещают инструмент вдоль упрочняемой поверхности детали 17, неподвижно закрепленной в технологическом приспособлении.

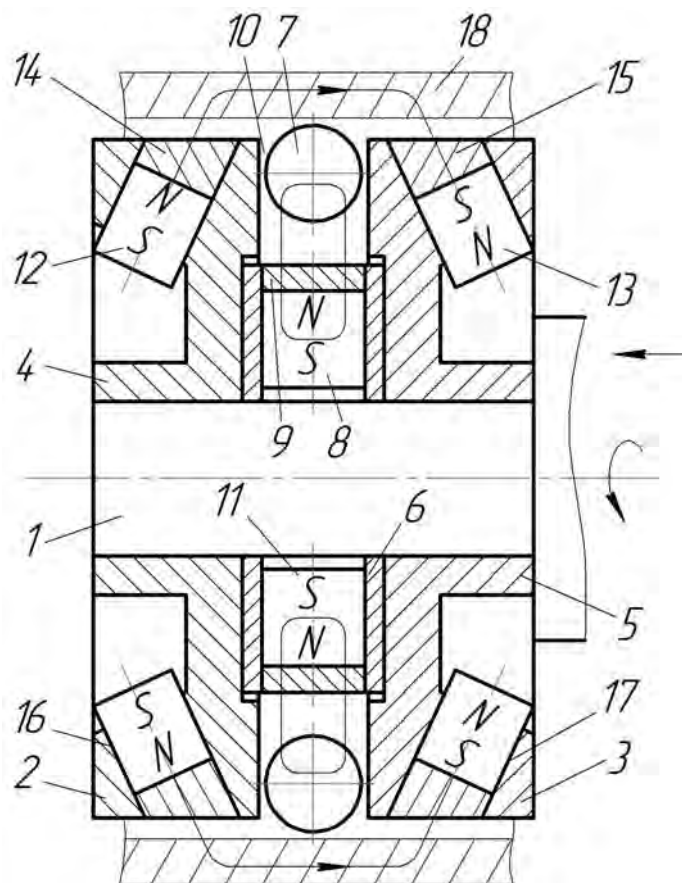


Рис. 4. Конструкция инструмента с дополнительной магнитной системой для перемагничивания поверхностного слоя детали

Поверхностный слой ферромагнитной детали 18 воспринимает воздействие вращающегося магнитного поля, периодически изменяющего направление силовых магнитных линий, создаваемого цилиндрическими постоянными магнитами 12, 13 инструмента. В результате имеющего место перемагничивания поверхностный слой детали разогревается, что приводит к изменению характеристик пластичности и прочности материала. Одновременно деформирующие шары 7, колеблющиеся под действием переменного магнитного поля от вращающихся цилиндрических постоянных магнитов 8, осуществляют вибродинамическое упрочнение намагниченной поверхности детали 18. Комплексное магнитно-силовое воздействие позволяет интенсифицировать процесс

поверхностного пластического деформирования и получить в поверхностном слое наноразмерную субзеренную структуру, повышающую физико-механические и эксплуатационные свойства детали.

### Заключение

Представлен комбинированный метод магнитно-вибродинамического накатывания поверхности нежестких деталей машин, использующий для своей реализации энергию переменного магнитного поля инструмента и осуществляемый с незначительными силами деформирования. Для повышения эффективности процесса комбинированного упрочнения предложено воздействовать на деформирующие шары, свободно расположенные в кольцевой ка-

мере и имеющие упругую связь с магнитной системой инструмента, переменным магнитным полем с частотой, равной собственной частоте колебаний деформирующих шаров. При этом комплексное магнитное и вибродинамическое воздействия позволяют сформировать в поверхностном слое наноразмерную субзеренную структуру, повы-

шающую физико-механические и эксплуатационные свойства детали.

Описаны прогрессивные конструкции инструментов для осуществления процесса комбинированного упрочнения, содержащие магнитную систему на основе постоянных магнитов различной конфигурации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под общ. ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Наука и техника, 1995. – 304 с.
2. **Торбило, В. М.** Алмазное выглаживание / В. М. Торбило. – М. : Машиностроение, 1977. – 104 с.
3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. 2089373 РФ, МКИ6 В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4924841/02 ; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97, Бюл. № 25. – 7 с.
4. Способ магнитно-динамического упрочнения внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали : пат. 17976 РБ, МПК В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа ; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20120052 ; заявл. 16.01.12; опубл. 30.06.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – 4 с.
5. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. 2068767 РФ, МКИ6 В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4730821/08 ; заявл. 22.08.89 ; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 4 с.
6. Инструмент для упрочняющей обработки : пат. 2068768 РФ, МКИ6 В 24 В 9/02 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4732048/08 ; заявл. 22.08.89 ; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 4 с.
7. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. 2068769 РФ, МКИ6 В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4733445/08 ; заявл. 28.08.89; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 4 с.
8. Моделирование процесса совмещенной обработки деталей магнитно-динамическим раскатыванием и вращающимся магнитным полем / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, А. А. Жолобов, Н. А. Леванович // Вестн. Житомир. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 86–95.

*Статья сдана в редакцию 1 сентября 2015 года*

**Александр Михайлович Довгалев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: ret@bru.by.

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