

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО РАСКАТЫВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Введение. Анализ существующих методов поверхностного пластического деформирования (ППД) показывает, что они находят ограниченное применение в промышленности по причине введения в технологический процесс дополнительной операции упрочняющей обработки, увеличивающей себестоимость изготовления деталей [1–7]. В этой связи возрастаёт актуальность разработки высокопроизводительных методов ППД, в том числе реализуемых на основе ранее неиспользуемых видов энергии.

Инновационный способ поверхностного пластического деформирования. В Белорусско-Российском университете разработан способ магнитно-динамического упрочнения поверхности отверстия деталей машин деформирующими шарами, получающими энергию деформирования от вращающегося переменного магнитного поля инструмента (рис. 1) [8–12].

Согласно способу упрочняющий инструмент, содержащий деформирующие шары 1 и источники магнитного поля 2, вводят в отверстие 3 упрочняемой детали 4. Вектор индукции магнитного поля инструмента направляют радиально к упрочняемой поверхности. Источники магнитного поля 2 вращают вокруг продольной оси отверстия 3 и перемещают с осевой подачей. Возникающее при этом вращающееся переменное магнитное поле с индукцией 0,2–1,2 Тл воздействует на деформирующие шары с частотой 60–2000 Гц, со-

общает им вращательное и радиальные колебательные движения в плоскости их расположения 5. В результате деформирующие шары 1 осуществляют динамическое упрочнение поверхности детали 4 [9].

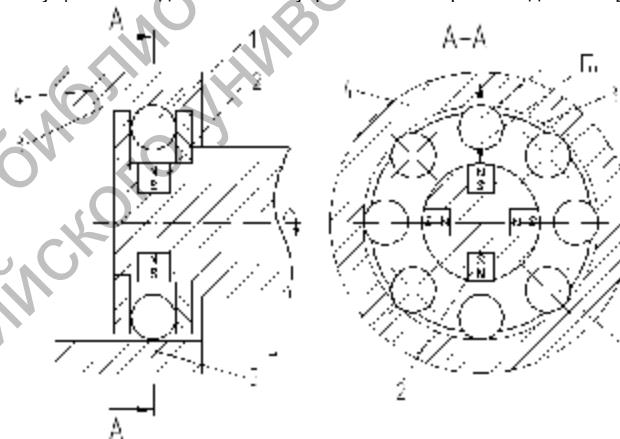


Рис. 1. Схема магнитно-динамического раскатывания поверхности отверстия

Довгалев Александр Михайлович, к.т.н., доцент, декан факультета довузовской подготовки и профориентации Белорусско-Российского университета.

Свирепа Дмитрий Михайлович, к.т.н., доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов Белорусско-Российского университета. Беларусь, БРУ, 212000, г. Могилёв, пр. Мира, 43.

Конструкция инструмента для магнитно-динамического упрочнения. Для реализации способа магнитно-динамического упрочнения поверхности отверстия деталей машин разработан специальный инструмент, представленный на рисунке 2 [13–20].

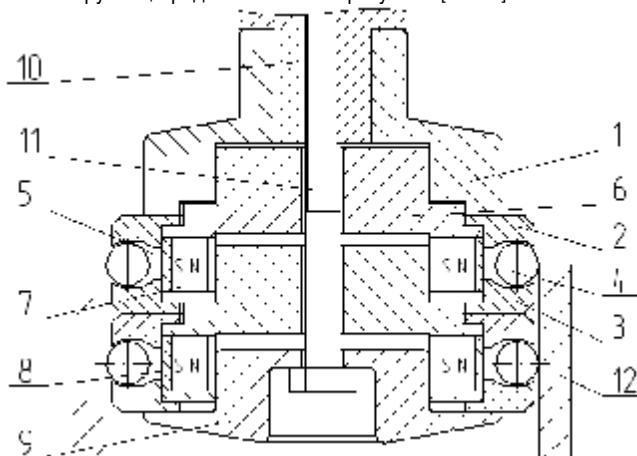


Рис. 2. Многосекционный магнитно-динамический раскатник

Многосекционный раскатник содержит следующие элементы: корпус 1; диски 2, 3; деформирующие шары 4, установленные в кольцевой камере 5; секции, содержащие магнитную систему в виде обоймы 6 с цилиндрическими постоянными магнитами 7 и магнитопроводными вставками 8. Постоянные магниты 7 расположены в радиальных отверстиях обоймы с равномерным угловым шагом и последовательным чередованием полюсов N и S. Магнитный поток от постоянных магнитов 7 посредством магнитопроводных вставок 8 направлен в кольцевую камеру 5. Диски 2, 3 фиксируются на обойме 6 крепежным элементом 9. Корпус 1 инструмента закреплен на оправке 10 винтом 11. Диски 2, 3 и обойма 6 изготовлены из немагнитопроводного материала.

Количество секций инструмента и расстояние между кольцевыми камерами 5 с деформирующими шарами 4 выбирают в зависимости от требуемой производительности упрочняющей обработки с учетом длины обрабатываемой детали, обеспечивая многократное уменьшение длины рабочего хода инструмента.

Упрочняющую обработку осуществляют следующим образом. Оправку 10 инструмента закрепляют в шпинделе, а деталь 12 – в приспособлении станка. Инструмент вводят в отверстие детали 12, сообщают ему вращательное движение и перемещают с рабочей подачей вдоль обрабатываемой поверхности. Вращающиеся совместно с обоймой 6 постоянные магниты 7 периодически воздействуют магнитным полем на деформирующие шары 4 и перемещают их в окружном направлении кольцевой камеры 5. При этом угловая скорость вращения постоянных магнитов 7 превышает угловую скорость вращения деформирующих шаров 4 (рис. 2). В результате на деформирующие шары 4 одновременно действуют центробежная F_c и периодическая магнитная силы F_m , соответственно прижимающая и отрывающая их от упрочняемой поверхности детали (рис. 1). Под действием магнитной силы деформирующие шары периодически отрываются от поверхности детали 12, осуществляют ее динамическое упрочнение, формируя модифицированный поверхностный слой с высокими эксплуатационными характеристиками.

Выполненные экспериментальные исследования показали, что разработанный способ магнитно-динамического упрочнения в отличие от существующих динамических методов ППД, имеет ряд существенных преимуществ: обеспечивает интенсивное снижение шероховатости поверхности с Ra 6,3–1,6 мкм до Ra 0,6–0,2 мкм; объединяет в один технологический переход операции упрочнения и формирования маслодержащего микрорельефа; исключает деформацию обрабатываемых нежестких заготовок (вследствие малых сил деформирования); позволяет совместить во времени магнитно-силовое воздействие и получить на деталях пар трения поверхностные структуры с новыми физико-механическими свойствами; легко

реализуется на существующем металлорежущем оборудовании и не требует вращения заготовки [9–11]. В то же время имеющиеся в литературе немногочисленные сведения о магнитно-динамическом упрочнении указывают на необходимость проведения дальнейших исследований по выявлению технологических возможностей метода.

Постановка задачи. Для более широкого использования технологии магнитно-динамического раскатывания на предприятиях металлообрабатывающей отрасли важно иметь обоснованные рекомендации по выбору рациональных режимов упрочнения. В связи с этим необходимо выполнить исследования, позволяющие оценить влияние основных технологических и конструктивных параметров процесса на качественные характеристики упрочненной поверхности. При этом важнейшей комплексной характеристикой, определяющей качество и эксплуатационные свойства детали, является шероховатость упрочненной поверхности.

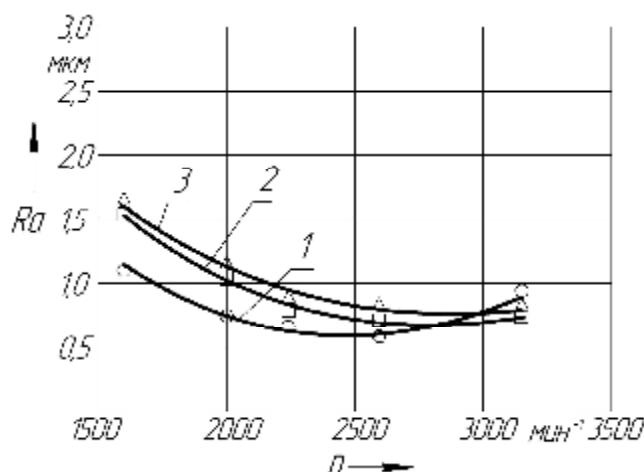
Измерение шероховатости поверхности упрочненных образцов выполняли на профилометре Surftest SJ-210 фирмы Mitutoyo (Япония). За величину шероховатости упрочненной поверхности образца принимали среднее значение пяти измерений параметра Ra шероховатости поверхности. Упрочнение образцов осуществляли на вертикально-фрезерном станке модели ВФ-130 и фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400 CNC с использованием магнитно-динамического раскатника.

Характеристики раскатываемых образцов: размеры ($D \times d \times l$) – 135 × 115 × 50 мм; материал – сталь 45 (180–200 НВ); сталь 45 (32–35 HRC); сталь 45 (42–45 HRC) ГОСТ 1050-74; отверстия заготовок предварительно растачивали в размер $\varnothing 115H8^{+0.054}$; шероховатость поверхности отверстия образцов после чистового растачивания – Ra 4,1–4,4 мкм.

Параметры магнитно-динамического раскатника: деформирующие шары $\varnothing 12$ (ШХ 15, 62–65 HRC); количество деформирующих шаров – 26; материал цилиндрических постоянных магнитов – Nd-Fe-B; размеры цилиндрических постоянных магнитов ($D \times l$) – 15 × 10 мм; количество магнитов – 12; индукция магнитного поля в зоне расположения деформирующих шаров $B = 0,2$ Тл.

Режимы магнитно-динамического раскатывания: частота вращения раскатника 1600–3150 мин⁻¹ (окружная скорость – 578–1137 м/мин); осевая подача инструмента: $S = 50$ мм/мин; количество рабочих ходов инструмента: $i = 1$; смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

Результаты экспериментальных исследований зависимости шероховатости поверхности упрочненных заготовок от частоты вращения инструмента представлены на рисунке 3.



1 – сталь 45 (180–200 НВ); 2 – сталь 45 (32–35 HRC); 3 – сталь 45 (42–45 HRC)

Рис. 3. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности от частоты вращения инструмента

Анализ экспериментальных исследований показывает, что шероховатость упрочненной поверхности существенно зависит от скорости вращения инструмента, определяющей величину ударного воздействия деформирующих шаров на поверхность детали.

Из графика (рис. 3) видно, что снижение исходной шероховатости поверхности осуществляется при частоте вращения применяемого инструмента более 1600 мин⁻¹. Это объясняется тем, что при частоте вращения менее указанной величины деформирующие шары притягиваются к источникам магнитного поля инструмента, а возникающей при вращении центробежной силы недостаточно для их отрыва от магнитной системы.

Рациональными значениями частот вращения инструмента, обеспечивающими минимальное значение шероховатости упрочненной поверхности, являются: для стали 45 (200–220 НВ) $n = 2450$ мин⁻¹ ($v = 885$ м/мин); для стали 45 (32–35 HRC) $n = 2800$ мин⁻¹ ($v = 1011$ м/мин); для стали 45 (42–45 HRC) $n = 3100$ мин⁻¹ ($v = 1120$ м/мин).

При увеличения частоты вращения инструмента деформирующие шары отрываются от поверхности магнитной системы инструмента, разгоняются вращающимся переменным магнитным полем и осуществляют динамическое воздействие на поверхность детали. По мере увеличения окружной скорости инструмента увеличивается и сила динамического воздействия деформирующих шаров на поверхность детали, что обеспечивает соответствующее снижение шероховатости упрочняемой поверхности. При этом наблюдается заполнение деформированным металлом впадин исходных микронеровностей поверхности детали. При превышении частоты вращения инструмента оптимального значения происходит некоторое увеличение шероховатости вследствие шелушения поверхности, вызванного перенаклопом поверхностного слоя детали.

На рисунке 4 показаны экспериментальные зависимости шероховатости поверхности по параметру Ra от минутной подачи инструмента, полученные при следующих условиях: материал упрочняемых заготовок – сталь 45 (180–200 НВ); частота вращения инструмента – 2240 мин⁻¹; исходная шероховатость поверхности отверстия после чистового растачивания – Ra 3,0–3,3 мкм.

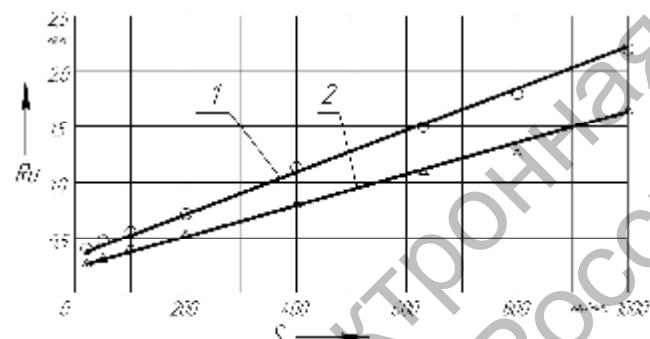


Рис. 4. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности от подачи инструмента

Анализ зависимостей показывает, что в диапазоне подач от 20 до 1000 мм/мин при обработке односекционным раскатником обеспечивается снижение шероховатости поверхности по параметру Ra от 0,4 до 2,2 мкм, а при упрочнении двухсекционным раскатником – от 0,3 до 1,6 мкм. Увеличение подачи инструмента приводит к повышению шероховатости упрочненной поверхности. Это обусловлено тем, что с увеличением подачи инструмента уменьшается число ударов деформирующих шаров по поверхности детали в единицу времени. В результате усилия динамического воздействия на поверхность детали со стороны деформирующих шаров становится недостаточно для полного смятия исходных микронеровностей.

Проведены исследования шероховатости внутренней поверхности отверстия деталей из стали 45 (180–200 НВ) и стали 45 (42–45 HRC), упрочненных магнитно-динамическим раскатыванием, от числа рабочих ходов инструмента. При этом обеспечивались следующие условия проведения эксперимента: исходная шероховатость поверхности отверстия после растачивания деталей из стали 45 (180–200 НВ) составила Ra_{исх} 4,1–4,4 мкм, из стали 45 (42–45 HRC) – Ra_{исх} 7,4–7,8 мкм; частота вращения инструмента – 3150 мин⁻¹; подача инструмента – 50 мм/мин. Экспериментальная зависимость

параметра Ra упрочненной поверхности от числа рабочих ходов инструмента представлена на рисунке 5.

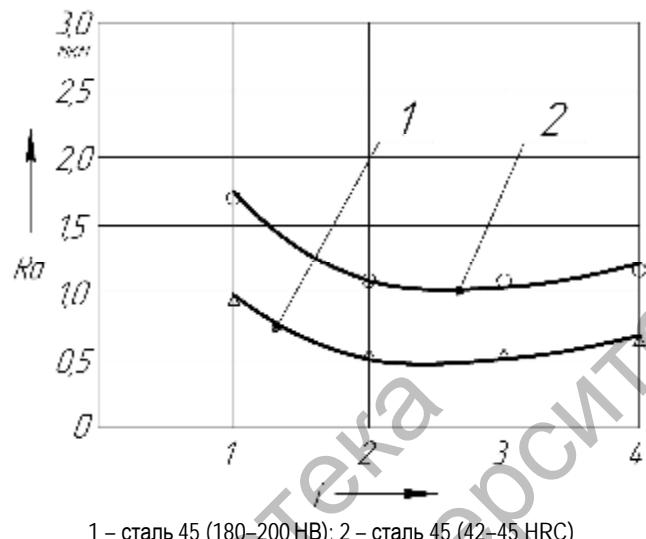


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности детали от числа рабочих ходов инструмента

Установлено, что при упрочняющей обработке поверхностей деталей из стали 45 твердостью 180–200 НВ за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость снижается в 4,5 раза, а с учетом второго рабочего хода – в 7,7 раза. При раскатывании отверстия деталей из стали 45 твердостью 42–45 HRC шероховатость поверхности за первый рабочий ход инструмента снижается в 4,4 раза, а за два рабочих хода – в 6,9 раза. Третий рабочий ход инструмента не приводит к существенному изменению полученной шероховатости, а четвертый – несколько ухудшает шероховатость поверхности, что обусловлено шелушением поверхности, вызванным перенаклопом.

На рисунке 6 приведена зависимость шероховатости упрочненной поверхности от исходной шероховатости поверхности, полученной после чистового растачивания. Раскатыванию подвергались заготовки из стали 45 твердостью 180–200 НВ и 42–45 HRC. Режимы упрочнения: частота вращения инструмента – 2240 мин⁻¹, подача инструмента – 50 мм/мин.

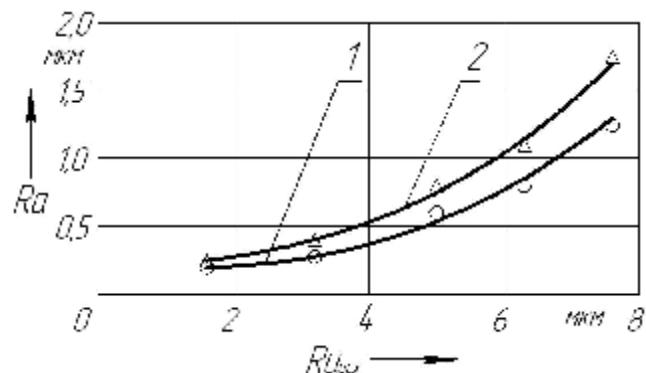


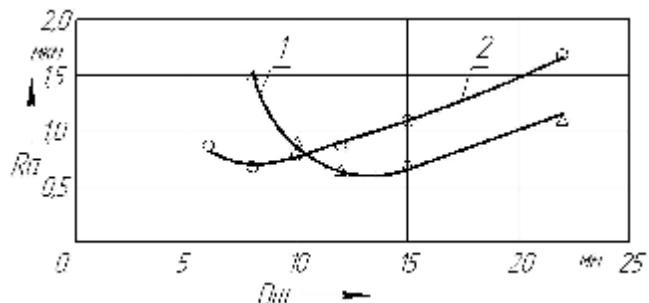
Рис. 6. Влияние исходной шероховатости поверхности заготовок на шероховатость поверхности после магнитно-динамического раскатывания

Анализ полученной зависимости позволяет сделать вывод о том, что магнитно-динамическое раскатывание позволяет снизить исходную шероховатость поверхности заготовок из стали 45 твердостью 180–200 НВ в 6 раз (с Ra 7,6 до Ra 1,25 мкм) и 8 раз (с Ra 1,6 до Ra 0,2 мкм), а твердостью 42–45 HRC в 4,4 раза (с Ra 7,6 до Ra 1,7 мкм) и 6,4 раза (с Ra 1,6 до Ra 0,25 мкм).

Результаты выполненных исследований позволяют оценить технологические возможности метода магнитно-динамического рас-

тывания по снижению исходной шероховатости поверхности, а также осуществлять прогнозирование шероховатости упрочняемой поверхности с учетом шероховатости поверхности, полученной на предшествующей операции.

На рисунке 7 представлен график влияния диаметра деформирующих шаров инструмента на значение параметра шероховатости R_a . Материал упрочняемых заготовок – сталь 45 (твердость 180–200 НВ), сталь 45 (твердость 42–45 HRC). Исходная шероховатость поверхности отверстия заготовок после чистового растачивания составляла R_a 4,1–4,3 мкм. Режимы упрочнения: частота вращения инструмента – 2240 мин⁻¹; подача инструмента – 50 мм/мин



1 – сталь 45 (180–200 НВ), $R_{a_{исх}} = 4,1$ –4,4 мкм; 2 – сталь 45 (42–45 HRC), $R_{a_{исх}} = 4,1$ –4,8 мкм

Рис. 7. Влияние диаметра деформирующих шаров на шероховатость поверхности после магнитно-динамического раскатывания

Из графиков 1, 2 (рисунок 7) следует, что для заготовок из стали 45 соответственно твердостью 180–200 НВ и 42–45 HRC (для указанных выше режимов упрочнения) оптимальными значениями диаметра деформирующих шаров инструмента, обеспечивающими минимальную шероховатость поверхности, являются соответственно 13 и 8 мм.

Также были выполнены исследования зависимости шероховатости упрочненной поверхности от твердости обрабатываемого материала заготовок. Так при упрочняющей обработке заготовок из стали 45 твердостью от 180 НВ до 55 HRC с исходной шероховатостью R_a 4,1–4,4 мкм была достигнута шероховатость поверхности R_a 0,6–1,05 мкм.

Таким образом, процесс магнитно-динамического раскатывания позволяет вести высокопроизводительную упрочняющую обработку заготовок из стали 45 твердостью от 180 НВ до 55 HRC.

Заключение. Разработан инновационный способ магнитно-динамического упрочнения, позволяющий осуществлять поверхностное пластическое деформирование за счет преобразования энергии переменного магнитного поля инструмента в колебательные движения деформирующих шаров, взаимодействующих с поверхностью заготовки.

Для реализации способа предложена конструкция инструмента, имеющего кольцевую камеру со свободно установленными деформирующими шарами, отличающаяся наличием магнитной системы на основе цилиндрических постоянных магнитов, преобразующей энергию магнитного поля в энергию деформирования.

Проведенные исследования позволили выявить рациональные режимы процесса магнитно-динамического раскатывания при которых достигается минимальная шероховатость упрочненной поверхности.

Способ магнитно-динамического раскатывания внутренней цилиндрической поверхности заготовок обеспечивает высокопроизводительную упрочняющую обработку и снижение исходных микронеровностей поверхности с R_a 6,3–1,6 до 0,6–0,2 мкм.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Шнейдер, Ю.Г. Инструменты для чистовой обработки металлов давлением / Ю.Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, 1971. – 248 с.
- Ящерицын, П.И. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П.И. Ящерицын, А.П. Минаков. – Минск: Наука и техника, 1986. – 215 с.
- Минаков, А.П. Технологические основы пневмовиброрадиономической обработки нежестких деталей / А.П. Минаков, А.А. Бунос; под общ. ред. П.И. Ящерицына. – Минск: Наука и техника, 1995. – 304 с.
- Машиностроение: энцикл. / А.М. Дальский [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2000. Т.3 – 840 с.
- Олейник, Н.В. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин / Н.В. Олейник, В.П. Кычин, А.Л. Луговской. – К.: Техника, 1984. – 151 с.
- Степанова, Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учеб. пособие / Т.Ю. Степанова – Иваново: Иванов. гос. хим.-технол. ун-т., 2009. – 64 с.
- Обработка заготовок деталей машин: учеб. пособие / А.В. Миронович [и др.]; под ред. Ж.А. Мрочека. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 172 с.: ил.
- Довгалев, А.М. Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 30–38.
- Способ магнитно-динамического упрочнения внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали: пат. 17976 Респ. Беларусь, МПК B24B39/02. / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа; заявитель Бел.-Рос. ун-т. – №а20120052; заявл. 16.01.2012; опубл. 30.06.2013 // Афіцыны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – 4 с.
- Свирепа, Д.М. Магнитно-динамическое раскатывание / Д.М. Свирепа, А.М. Довгалев // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.] – Минск, 2012. – С. 155–156.
- Метод магнитно-динамического раскатывания деталей технических систем / Д.М. Свирепа, А.М. Довгалев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. мол. ученых, Могилев, 17–18 нояб. 2011 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 3–7.
- Рыжанков, Д.М. Эффект магнитно-динамического упрочнения / Д.М. Рыжанков, А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2007 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 93.
- Свирепа, Д.М. Модульный принцип конструирования инструментов с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 26 янв. 2006 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – С. 73.
- Свирепа, Д.М. Интенсификация процесса упрочнения магнитно-динамическими инструментами / Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, С.А. Сухоцкий // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2007 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 96.
- Довгалев, А.М. Магнитно-динамические инструменты для упрочнения наружных поверхностей вращения / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2009. – № 4. – С. 56–62.
- Свирепа, Д.М. Инструменты для магнитно-динамического упрочнения / Д.М. Свирепа // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. мол. ученых, 17–18 нояб. 2011 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 43.
- Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 10188 Респ. Беларусь, МПК B 24 B 39/00 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20050605; заявл. 16.06.05; опубл. 28.02.08 // Афіцыны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1. – 4 с.
- Раскатник с магнитоуправляемыми деформирующими элементами: пат. 11531 Респ. Беларусь, МПК B 24 B 39/00 / А.М. Довга-

Вестник Брестского государственного технического университета. №4. 2014

-
- лев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20060637; заявл. 27.06.06; опубл. 28.02.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1. – 4 с.
19. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 11536 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/00 / А.М. Довгалев, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20091852; заявл. 23.12.09; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – 4 с.
20. Упрочняющий инструмент: пат. 15364 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/02 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, С.А. Сухоцкий; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20091852; заявл. 23.12.09; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – 4 с.

Материал поступил в редакцию 03.11.14

DOVGALEV A.M., SVIREPA D.M. Influence of technological and structural parameters of the process of magnetic dynamic rolling on surface roughness

The article deals with an innovative method of dynamic magnetic strengthening, which allows performing surface plastic deformation by balls through the use of magnetic field energy of a tool.

The article describes the design of a tool for expanding holes of machine component billets, which differs from the known ones by presence of a magnetic system with cylindrical permanent magnets.

The paper gives recommendations on the choice of rational modes of the strengthening process, which minimize surface roughness of machine component billet.