

Довгалев А.М., Сухоцкий С.А., Свирепа Д.М., Рыжанков Д.М.

## ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Введение.** Большой научно-практический интерес представляет новый метод магнитно-динамического упрочнения (МДУ), при котором обеспечивается непрерывное взаимодействие или периодическое соударение деформирующих элементов с обрабатываемой поверхностью за счет энергии постоянного или переменного магнитного поля. При этом на деформирующие элементы, свободно установленные в кольцевой камере инструмента, непрерывно или периодически воздействуют концентрированным вращаемым магнитным полем и перемещают их вдоль упрочняемой поверхности. В результате деформирующие элементы получают вращательное, пространственное колебательное или комбинированное движение, взаимодействуют с деталью и осуществляют пластическое деформирование поверхностного слоя. Упрочненная поверхность имеет гладкий профиль при обеспечении непрерывного взаимодействия деформирующих элементов с деталью и стохастический или регулярный (в виде чередующихся лунок) при периодическом соударении деформирующих элементов с поверхностью обработки [1–18].

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что магнитно-динамическое упрочнение поверхностей деталей обеспечивает достижение следующих характеристик:

- снижение исходной шероховатости поверхности с Ra 12,5...6,3 до Ra 0,25...0,1;
- упрочнение поверхностного слоя детали на глубину 0,1–2 мм;
- изменение размера на 10–60 мкм при обработке деталей из пластичных материалов;
- упрочнение деталей с исходной твердостью поверхностного слоя до 50–55 HRC с подачами инструмента 20–800 мм/мин.

При реализации метода используют магнитно-динамические инструменты, конструкции которых зависят от типа производства, в котором они используются, вида упрочняемой поверхности детали и их технологического назначения.

В условиях единичного, мелкосерийного и среднесерийного производства для осуществления процесса МДУ инструменты проектируют под конкретный тип металлообрабатывающего оборудования.

В крупносерийном и массовом производстве МДУ целесообразно осуществлять без применения металлорежущих станков на специальной установке, содержащей инструмент, а также привод вращения и подачи инструмента.

В настоящее время разработаны конструкции магнитно-динамических инструментов для обработки отверстий, наружных поверхностей вращения и плоских поверхностей.

### Инструменты для упрочнения поверхностей деталей машин.

На рис. 1 изображен магнитно-центробежный раскатник для станков фрезерно-расточной группы, содержащий: корпус 1; деформирующие элементы 2, свободно установленные в кольцевой камере 3; магнитопроводящие диски 4, 5; источник магнитного поля 6 – электромагнит или модуль с постоянными магнитами.

Корпус 1 инструмента закрепляют в шпинделе станка. Инструмент вводят в полость отверстия детали 7, сообщают ему вращение и перемещают с подачи S вдоль обрабатываемой поверхности. В процессе обработки источник магнитного поля 6 и магнитопроводящие диски 4, 5 концентрируют магнитное поле в кольцевой камере 3 в зоне расположения деформирующих элементов 2. Вращаемое магнитное поле перемещает деформирующие элементы в окружном направлении кольцевой камеры 3. Возникающая центробежная сила прижимает деформирующие элементы 2 к обрабатываемой поверхности.

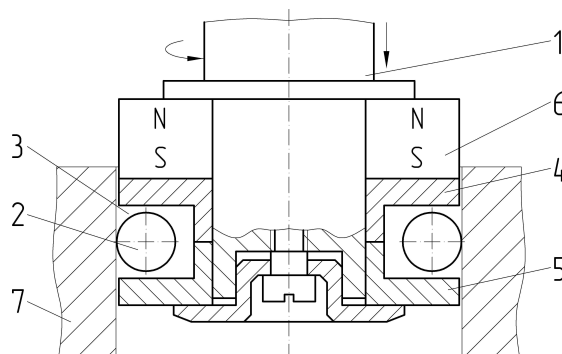


Рис. 1. Магнитно-центробежный раскатник

Одновременно на деформирующие элементы 2 действует магнитная сила, имеющая постоянную и динамическую составляющие. Наличие динамической составляющей магнитной силы обусловлено магнитным трением при перемещении деформирующих элементов в магнитном поле, а также периодическим перераспределением магнитного потока в зоне кольцевой камеры инструмента, вызываемым колебательными перемещениями деформирующих элементов. Под действием динамической магнитной силы деформирующие элементы приобретают высокочастотные колебания, интенсифицирующие процесс упрочнения.

В результате деформирование поверхности осуществляется под действием центробежной и магнитной силы. Причем магнитная динамическая сила существенно превышает центробежную.

На рис. 2 схематично изображен магнитно-динамический раскатник, предназначенный для одновременного упрочнения поверхностного слоя детали и формирования регулярного рельефа.

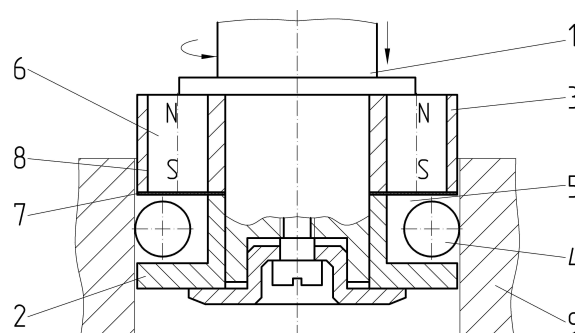


Рис. 2. Магнитно-динамический раскатник

Инструмент имеет: оправку 1; диски 2, 3; деформирующие элементы 4; кольцевую камеру 5; цилиндрические постоянные магниты 6 с осевой намагниченностью; защитную шайбу 7. Деформирующие элементы 4 расположены в кольцевой камере 5. В диске 3 с равномерным угловым шагом выполнены аксиально-расположенные отверстия 8. Цилиндрические постоянные магниты 6 установлены в отверстиях 8 диска 3 с идентичным расположением полюсов непосредственно в зоне кольцевой камеры 5.

Оправку 1 устанавливают в шпинделе станка. Инструмент вводят в отверстие упрочняемой детали 9, сообщают ему вращение и пере-

Довгалев А.М., Сухоцкий С.А., Свирепа Д.М., Рыжанков Д.М., Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Беларусь, БРУ, 212000, г. Могилев, пр. Мира, 43.

мещают с рабочей подачей. Скорость вращения магнитов 6 превышает скорость вращения деформирующих элементов 4. При этом деформирующие элементы 4 периодически входят в зону магнитного поля от магнитов 6 и выходят из нее. Под действием периодической магнитной силы деформирующие элементы 4 приобретают окружное и пространственное колебательное движение, взаимодействуют с деталью и осуществляют одновременно интенсивное упрочнение поверхностного слоя и формирование регулярного рельефа.

Для упрочняющей обработки внутренней поверхности втулок в условиях серийного производства предназначено устройство, изображенное на рис. 3, отличительной особенностью которого является простота, надежность и безопасность. В состав устройства входят: оправка 1; диск 2; втулка 3 с цилиндрической шейкой 4; корпус 5; шток 6; кольцевой источник магнитного поля 7 с осевой намагниченностью; шайба 8 из антифрикционного материала; деформирующие элементы 9; регулируемый конус 10; пружина 11; кольцевая камера 12. Диск 2 и втулка 3 выполнены из магнитопроводного материала. Шейка 4 втулки 3 установлена с зазором в отверстии кольцевого магнита 7.

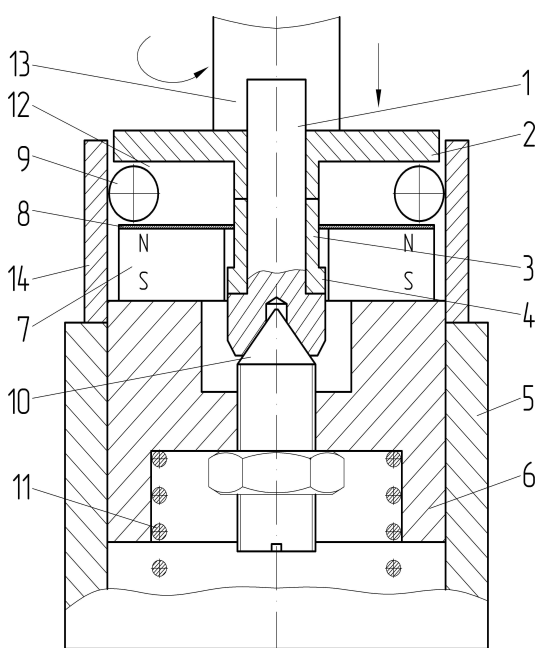


Рис. 3. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки

Оправку 1 закрепляют в шпинделе 13 станка, а упрочняемую втулку 14 базируют на штоке 6 и корпусе 5 устройства. Шпиндель 13 опускают вниз до контакта центрального отверстия оправки 1 с конусом 10. При этом шейка 4 втулки 3 входит в отверстие кольцевого магнита 7 и располагается в зоне полюса S. Магнитный поток от полюса S магнита 7 посредством втулки 3 концентрируется на диске 2. Деформирующие элементы 9 находятся в симметричном магнитном поле, полюс N которого расположен на торцевой поверхности магнита 7, а полюс S – на диске 2. Шпинделю 13 сообщают вращение и перемещают с подачей в осевом направлении. Вращение диска 2 вследствие замыкания на него концентрированного магнитного поля от магнита 7 обеспечивает окружное перемещение деформирующих элементов 9 по кольцевой камере 12. При контакте с обрабатываемой поверхностью деформирующие элементы 9 под действием магнитной и центробежной сил осуществляют ее поверхностное пластическое деформирование и формируют высокие качественные характеристики упрочняемого слоя.

Представленный на рис. 4 инструмент используется для упрочняющей обработки маложестких деталей с минимальными силами деформирования.

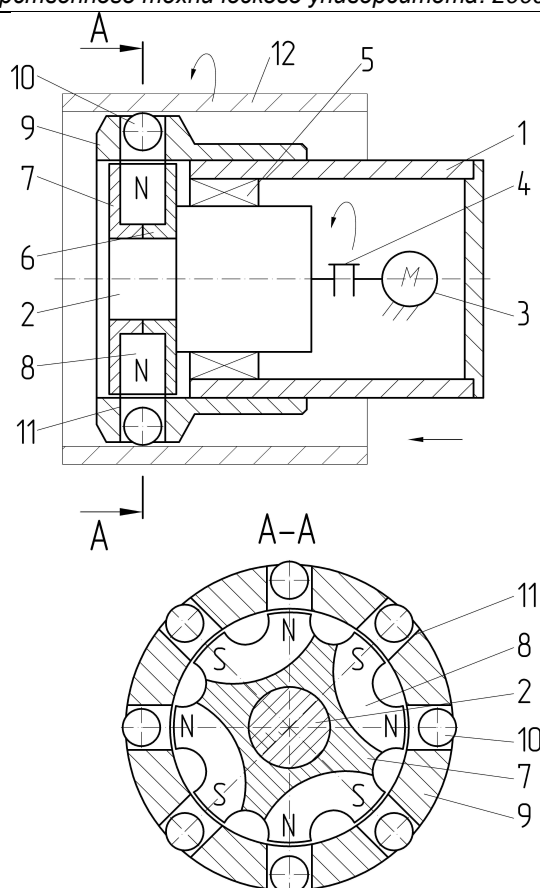


Рис. 4. Инструмент для тонкого поверхностного пластического деформирования

Инструмент содержит: корпус 1; ротор 2; привод вращения ротора в виде электродвигателя 3, муфты 4, подшипниковой опоры 5; магнитную систему, состоящую из двух обжимов 6, 7 и постоянных U-образных магнитов 8; цилиндрическую насадку 9, выполненную из немагнитного материала; деформирующие элементы 10. В цилиндрической насадке 9 имеются радиальные каналы 11, в которых размещены с возможностью перемещения вдоль оси канала деформирующие элементы 10. Полюса постоянных магнитов 8 расположены на периферии обжимов 6, 7 равномерно с последовательным чередованием знака полюсов непосредственно под радиальными каналами 11.

Инструмент вводят в отверстие обрабатываемой детали 12. Сообщают ротору 2 и детали 12 вращение, а инструменту – движение подачи. При вращении ротора 2 полюса S и N магнитов 8 периодически располагаются напротив радиальных каналов 11 и воздействуют магнитным полем на деформирующие элементы 10. При этом происходит перемагничивание поверхностного слоя деформирующих элементов 10, в результате которого они приобретают колебательное движение вдоль оси радиальных каналов 11. В процессе колебаний деформирующие элементы 10 касаются вершин микронеровностей упрочняемой поверхности и осуществляют их пластическое деформирование с минимальными силами деформирования, исключая деформацию упрочняемой детали.

На рис. 5 показан инструмент для магнитно-динамического упрочнения поверхности отверстия маложестких втулок из магнитопроводных материалов, имеющих малые диаметральные размеры.

Инструмент имеет: оправку 1; шайбы 2, 3; проставочное кольцо 4; кольцевую камеру 5; деформирующие элементы 6; магнитную систему, состоящую из держателя 7 и двух постоянных кольцевых магнитов 8, 9 с радиальной намагниченностью; изолирующее кольцо 10. Магниты 8, 9 имеют противоположное расположение полюсов S и N и размещены симметрично относительно кольцевой камеры 5.

Оправку 1 вводят в отверстие обрабатываемой втулки 11, обеспечив совмещение их продольных осей. Втулке 11 сообщают вра-

щение и перемещают инструмент с осевой подачей. Магнитный поток от магнитов 8, 9 замыкается на участок втулки 11, расположенный в зоне нахождения деформирующих элементов 6. Деформирующие элементы 6 притягиваются магнитной силой к внутренней поверхности втулки 11 и разгоняются в окружном направлении. Перемещаясь вдоль кольцевой камеры 5, деформирующие элементы 6 за счет центробежной и магнитной сил упрочняют поверхностный слой втулки 11.

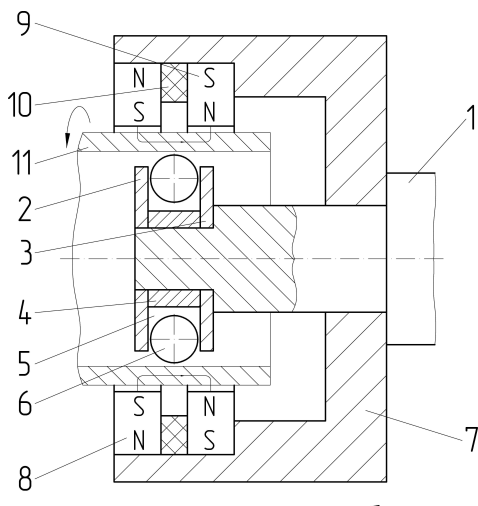


Рис. 5. Магнитно-динамический инструмент для упрочнения внутренней поверхности тонкостенных втулок

На рис. 6 изображен двухрядный магнитно-динамический инструмент для упрочнения плоских поверхностей с расположением вращающихся элементов внутри неподвижного корпуса.

Инструмент включает: корпус 1; стакан 2; диск 3; цилиндрические постоянные магниты 4 с осевой намагниченностью. Корпус 1 и стакан 2 образуют две кольцевые камеры 5 и 6, в которых расположены соответственно деформирующие элементы 7 и шары-ударники 8. В диске 3 выполнено четное количество аксиально-расположенных отверстий 9 с равномерным угловым шагом, в которых установлены цилиндрические магниты 4 с последовательным чередованием полюсов S и N. Диск 3 находится над кольцевой камерой 6, а продольная ось магнитов 4 проходит через ось симметрии кольцевой камеры 5.

Инструмент снабжен устройством замыкания полюсов смежных магнитов 4, выполненным в виде держателя 10 и магнитопроводных пластин 11. Деталь базируют на столе станка. Корпус 1 инструмента жестко соединяют с неподвижной бабкой 12 станка. Держатель 10 закрепляют в шпинделе 13 станка. Шпинделю 13 сообщают вращение, а детали – движение продольной подачи. Шпиндель 13 вращает держатель 10 с магнитопроводными пластинами 11. Пластины 11 осуществляют последовательное замыкание полюсов S и N смежных магнитов. В кольцевой камере 6 с шарами-ударниками 8 образуются периодически чередующиеся области магнитного поля с максимальной и минимальной напряженностью, смещающиеся в направлении вращения пластин 11. В результате полученное вращаемое магнитное поле перемещает шары-ударники 8 вдоль кольцевой камеры 6 инструмента. Шары-ударники 8 периодически ударяют по деформирующим элементам 7. Деформирующие элементы 7 передают энергию удара упрочняемой поверхности, осуществляя ее поверхностное пластическое деформирование.

Накопленный опыт в области проектирования инструментов для магнитно-динамического упрочнения позволяет классифицировать существующие разновидности их конструкций по ряду признаков:

- по виду упрочняемых поверхностей: для отверстий, для наружных поверхностей вращения, для плоских и торцовых поверхностей, для фасонных поверхностей;

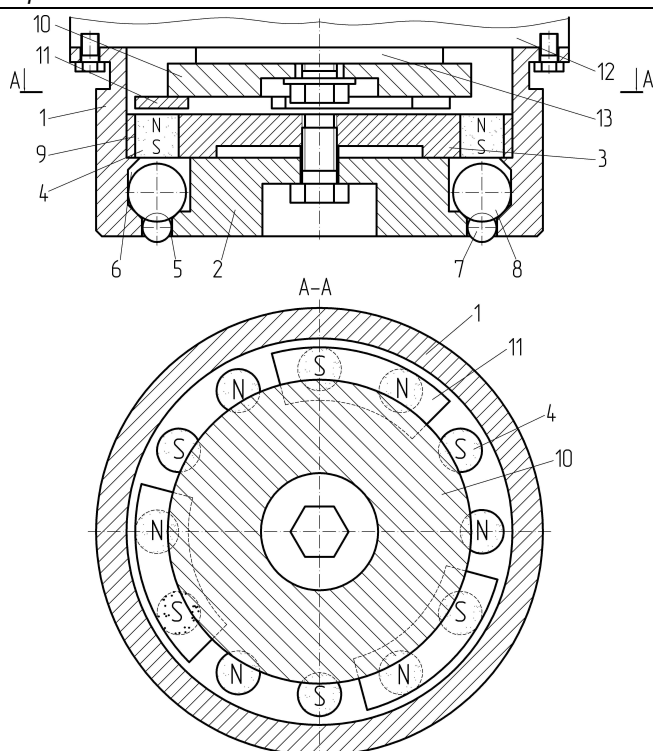


Рис. 6. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей с созданием смещающегося в окружном направлении магнитного поля

- по типу магнитной системы: с постоянными магнитами (феррит бария, редкоземельные, металлокерамические), с электромагнитами, комбинированные;
- по месту расположения магнитной системы: в зоне кольцевой камеры, за пределами кольцевой камеры, за пределами инструмента;
- по принципу создания крутящего момента для разгона деформирующих элементов: гистерезисные, реактивные, активные;
- по типу регулирования магнитного поля: бесступенчатое, ступенчатое, нерегулируемое;
- по методу разгона деформирующих элементов: вращением источника магнитного поля, вращением намагниченной детали, «бегущей волной» магнитного поля;
- по принципу взаимодействия деформирующих элементов с деталью: непрерывное (с изменением исходного размера, без изменения исходного размера), периодическое (низкочастотное, высокочастотное);
- по месту приложения магнитного поля: на деформирующие элементы, на деталь, совмещенное воздействие на деталь и деформирующие элементы;
- по виду магнитного поля: непрерывное, дискретное.
- по методу управления: без управления, с адаптивным управлением;
- по форме источников магнитного поля: в виде «звездочки», кольцевые, цилиндрические, пластинчатые;
- по числу и расположению кольцевых камер: однорядные, многорядные;
- по технологическому назначению: для упрочняющей обработки, для размерно-упрочняющей обработки, для формирования регулярного рельефа, для получения триботехнических покрытий;
- по виду достигаемого упрочняющего эффекта: за счет поверхностного пластического деформирования, за счет перемагничивания поверхностного слоя детали, за счет комбинированного упрочнения ППД в магнитном поле и перемагничивания поверхностного слоя детали.

**Заключение.** Представленные в работе прогрессивные конструкции инструментов для упрочняющей обработки отверстий, валов и плоских поверхностей, а также разработанная классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения позволяют выбрать наиболее приемлемую конструкцию инструментов для применения в условиях производства при решении технологических задач повышения долговечности выпускаемых изделий.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Довгалев, А.М. Основы классификации способов и инструментов для ППД в магнитном поле / А.М. Довгалев // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: ММИ, 1999. –113 с.
2. Довгалев, А.М. Магнитно-динамическое упрочнение плоских поверхностей / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирипа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Бел. – Рос. ун-т, 2007. – Ч.1. –93 с.
3. Пат. 2052331 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Способ поверхностного пластического деформирования поверхности вращения и инструмент для его осуществления/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4854644/08. Заявлено 27.07.90; Опубл. 20.01.96, Бюл.№2.-бс.; ил.
4. Пат. 2000918 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4855503/27. Заявлено 30.07.90; Опубл. 15.10.93, Бюл.№37-38.-4с.; ил.
5. Пат. 2068769 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4733445/08. Заявлено 28.08.89; Опубл. 10.11.96, Бюл.№31.-4с.; ил.
6. Пат. 2003455 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4941052/27. Заявлено 03.06.91; Опубл. 30.11.93, Бюл.№43-44.-4с.; ил.
7. Пат. 2047470 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4732047/08. Заявлено 22.08.89; Опубл. 10.11.95, Бюл.№31.-3с.; ил.
8. Пат. 1815190 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №473323283/27. Заявлено 28.08.89; Опубл. 15.05.93, Бюл.№18.-3с.; ил.
9. Пат. 2077416 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4871873/02. Заявлено 08.10.90; Опубл. 20.04.97, Бюл.№11.-3с.; ил.
10. Пат. 2000918 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/04. Инструмент для поверхностного пластического деформирования / А.М. Довгалёв (РБ). - № 4855503/27. Заявлено 30.07.90; Опубл. 15.10.93, Бюл. № 37-38.– 4с.; ил.
11. Пат. 2003458 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/04. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалёв (РБ). - № 4941049/27. Заявлено 03.06.91; Опубл. 30.11.93, Бюл. № 43-44. - 4с.; ил.
12. Пат. 2003459 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/04. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалёв (РБ). - № 4941987/27. Заявлено 03.06.91; Опубл. 30.11.93, Бюл. № 43-44. - 4с.; ил.
13. Пат. 2047470 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования / А.М. Довгалёв (РБ). - № 4732047/08. Заявлено 22.08.89; Опубл. 10.11.95, Бюл. №31. - 4с.; ил.
14. Пат. 2003456 РФ, МКИ<sup>6</sup> В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/А.М. Довгалёв (РБ).- №4941052/27. Заявлено 03.06.91; Опубл. 30.11.93, Бюл. №43-44.-4с.; ил.
15. Пат. 10188 РБ, МПК В 24В 39/00. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалев, Д.М. Свирипа, Д.М. Рыжанков; заявитель и патентообладатель Бел.–Рос. ун-т. - № а20050605; заявл. 16.06.2005; опубл. 28.02.2008.
16. Пат. 10065 РБ, МПК В 24В 39/02. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалев, Д.М. Свирипа, Д.М. Рыжанков; заявитель и патентообладатель Бел.–Рос. ун-т. - № а20050604; заявл. 16.06.2005; опубл. 30.12.2007.
17. Пат. 11531 РБ, МПК В 24В 39/00. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалев, Д.М. Свирипа, Д.М. Рыжанков; заявитель и патентообладатель Бел.–Рос. ун-т. - № а20060637; заявл. 27.06.2006; опубл. 28.02.2008.
18. Пат. 11536 РБ, МПК В 24В 39/00. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалев, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирипа; заявитель и патентообладатель Бел.–Рос. ун-т. - № а20060760; заявл. 20.07.2006; опубл. 28.02.2009.

Материал поступил в редакцию 11.03.09

#### DOVGALEV A.M., SUCHOCKIJ S.A., SVIREPA D.M., RYZANKOV D.M. Tools for magnetic-dynamic hardening of surfaces of details of machines

In clause the items of information on magnetic-dynamic hardening of a superficial layer of details of machines are submitted, at which plastic warping of a surface carry out warping by elements at the expense of influence on them by a rotated constant or variable magnetic field. For realization of a method the developed classification circuit of existing versions of tools is given. The original designs of tools for durability of processing of apertures, outside surfaces of rotation and flat surfaces are submitted.

УДК 539.3

**Сорко С.А., Якушевич С., Хвусевич В.М.**

### АНАЛИЗ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ПОТОКА В ТРУБАХ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

**Введение.** Ламинарные, турбулентные, пульсирующие потоки в трубах являются одними из основных потоков с периодическими изменениями во времени скорости и давления, которые привлекли существенное внимание в области механики жидкости за последние годы. Существуют многочисленные аналитические, численные и экспериментальные исследования в этом направлении. Известно, что такие потоки имеют практическое значение в различных областях: механических разработках, нанотехнологиях, биологии и т.д., которые подобны процессам течения жидкости в случае ламинарных, турбулентных и пульсирующих потоков в трубах.

Большинство работ, посвященных таким исследованиям доступно лишь для течений с приведенным давлением, то есть для ламинарного, турбулентного, пульсирующего потоков в трубах с давлением, изменяющимся во времени.

**Формулировка проблемы.** В ламинарных однонаправленных потоках несжимаемой и вязкой Ньютонской жидкости через длинные прямые трубы произвольного сечения формируется единственный, не исчезающий компонент скорости в направлении трубопровода (рис. 1).

Сорко Словомир Адам, зав. кафедрой Белостоцкого технического университета, Республика Польша.