

УДК 621.787

*А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛОСКИХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ  
УПРОЧНЕНИЕМ**

UDC 621.787

*A. M. Dovgalev, S. A. Sukhotsky*

**IMPROVEMENT OF PERFORMANCE OF FLAT WORKPIECE SURFACES BY  
USING MAGNETO-DYNAMIC HARDENING**

**Аннотация**

В работе исследованы микротвердость и глубина упрочнения поверхностного слоя плоских деталей. Представлены результаты рентгеноструктурных исследований стальных образцов, упрочненных магнитно-динамическим накатыванием. Приведены сведения о триботехнических испытаниях, указывающих на снижение коэффициента трения и повышение износостойкости упрочненных плоских поверхностей.

**Ключевые слова:**

упрочнение, микротвердость, накатывание, инструмент, магнитная система, вращающееся магнитное поле, трение, износостойкость.

**Abstract**

The paper presents adaptive control systems to monitor the quality of machining of the surface layer of machine parts during the process of combined magneto-vibrodynamic strengthening. The smart adaptive control system is described which monitors the accuracy of dynamic size of a machine part aperture during combined machining by means of cutting (abrasive machining) and magneto-vibrodynamic rolling. The data on designs of controlled tools for the combined strengthening treatment by rotating magnetic field and magneto-vibrodynamic.

**Key words:**

adaptive system, accuracy control, quality of machining, magneto-dynamic roll forming, magnetic field, combined machining, controlled tool.

**Введение**

Повышение долговечности технических систем является важной задачей, выполняемой как на стадии их конструирования, так и при технологическом изготовлении входящих в них деталей.

Эксплуатационные свойства деталей машин, в том числе износостойкость, определяются качественными характеристиками их поверхностей, обеспечиваемыми на финишных отделочно-упрочняющих операциях технологического процесса.

Существенное повышение эксплуатационных свойств деталей обеспечивают статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако известные методы ПДД в той или мере исчерпали свои технологические возможности. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых методов отделочно-упрочняющей обработки, реализующих силовое взаимодействие деформирующих элементов с упрочняемой поверхностью детали на основе

применения нетрадиционных видов энергии, например, магнитного поля.

Определенный интерес представляет разработанный авторами статьи способ магнитно-динамического накачивания, при котором упрочнение плоских поверхностей заготовок осуществляют двухрядным инструментом, содержащим приводные и деформирующие шары, взаимодействующие между собой посредством вращающегося магнитного поля [1].

В то же время в источниках литературы отсутствуют сведения о технологических возможностях разработанного способа, касающихся характеристик упрочнения поверхностного слоя заготовок и его эксплуатационных свойств.

В связи с этим выполнены исследования основных характеристик поверхностного слоя и проведены триботехнические испытания плоских поверхностей заготовок, упрочненных магнитно-динамическим накачиванием.

#### **Исследование микротвердости упрочненного поверхностного слоя заготовок**

В соответствии с поставленной задачей выполнены исследования микротвердости образцов, полученных из заготовок, плоские поверхности которых были обработаны по различным технологиям.

Исследовали три партии заготовок из стали 45 (200...220 НВ) по 10 шт. в каждой. Рабочие поверхности всех заготовок предварительно обрабатывали методом торцового фрезерования. Затем поверхности заготовок первой партии шлифовали ( $Ra$  0,40...0,35 мкм), а второй и третьей упрочняли магнитно-динамическим накачиванием инструментом с диаметром деформирующих шаров 12 и 15 мм соответственно и получали шероховатость  $Ra$  0,50...0,40 мкм.

Для упрочняющей обработки использовали инструмент, содержащий

корпус, кольцевые камеры и расположенные в них с возможностью взаимодействия между собой приводные и деформирующие шары, магнитную систему, включающую источник магнитного поля и магнитопроводы [2].

Магнитно-динамическое накачивание плоских поверхностей заготовок осуществляли на вертикально-фрезерном станке модели FSS-400 CNC на следующих режимах: частота вращения инструмента  $n = 940 \text{ мин}^{-1}$  ( $V = 375 \text{ м/мин}$ ); подача инструмента  $S = 125 \text{ мм/мин}$ ; натяг между деформирующими и приводными шарами инструмента  $h = 0,7 \text{ мм}$ ; количество рабочих ходов инструмента – один.

Из полученных заготовок вырезали образцы размером  $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$ , торцовые поверхности которых шлифовали, а затем полировали по стандартной методике [3].

Измерение микротвердости по глубине исследуемых образцов производили при помощи твердомера Indentec ZHV (Великобритания).

Определение микротвердости проводили по методике, в соответствии с которой на торцовую поверхность образца наносили отпечаток под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику прибора в течение определенного времени. К алмазному наконечнику прикладывали нагрузку 0,981 Н в течение 10 с. После удаления нагрузки измеряли диагонали полученного отпечатка [2, 4]. За величину микротвердости поверхности на исследуемой глубине образца принимали среднее значение пяти измерений параметра.

Результаты исследований микротвердости заготовок по глубине представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, в поверхностном слое микротвердость заготовок первой партии изменяется в пределах 2300...2400, а заготовок второй и третьей – в диапазоне 2550...2950 МПа. При этом глубина упрочнения поверхностного слоя заготовок, обработанных маг-

нитно-динамическим накатыванием, составляет 650 мкм.

На рис. 2 представлена зависимость степени упрочнения заготовок по глубине (отношение микротвердости

поверхностного слоя на соответствующей глубине заготовок, упрочненных магнитно-динамическим накатыванием, к микротвердости поверхности неупрочненных заготовок).

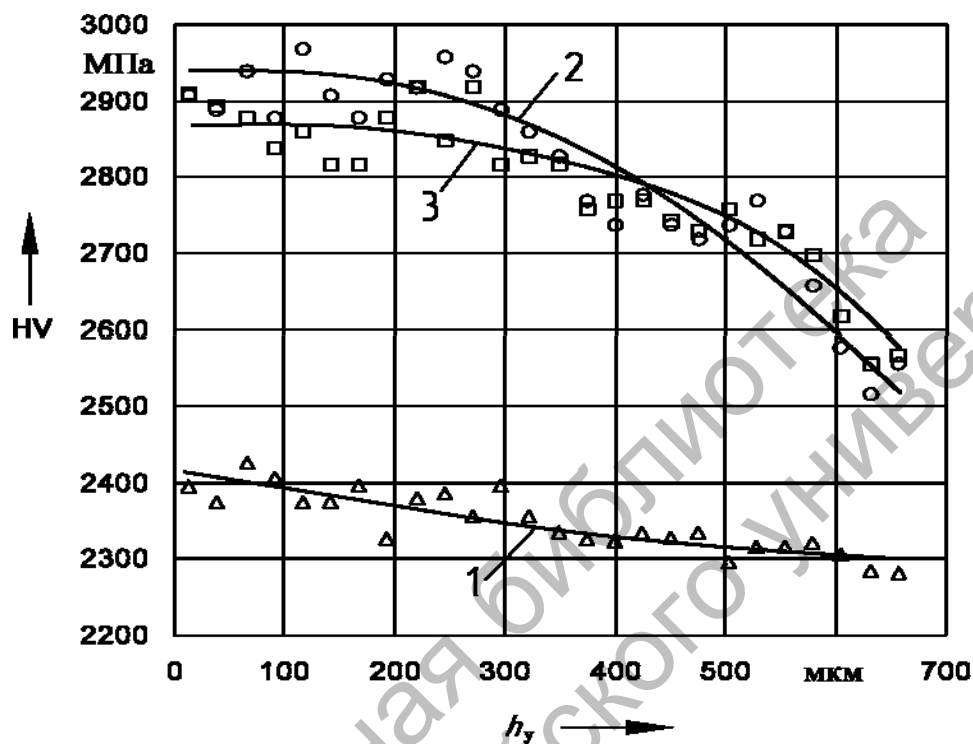


Рис. 1. Изменение микротвердости в поверхностном слое заготовок по глубине: 1, 2, 3 – заготовки первой, второй и третьей партий соответственно

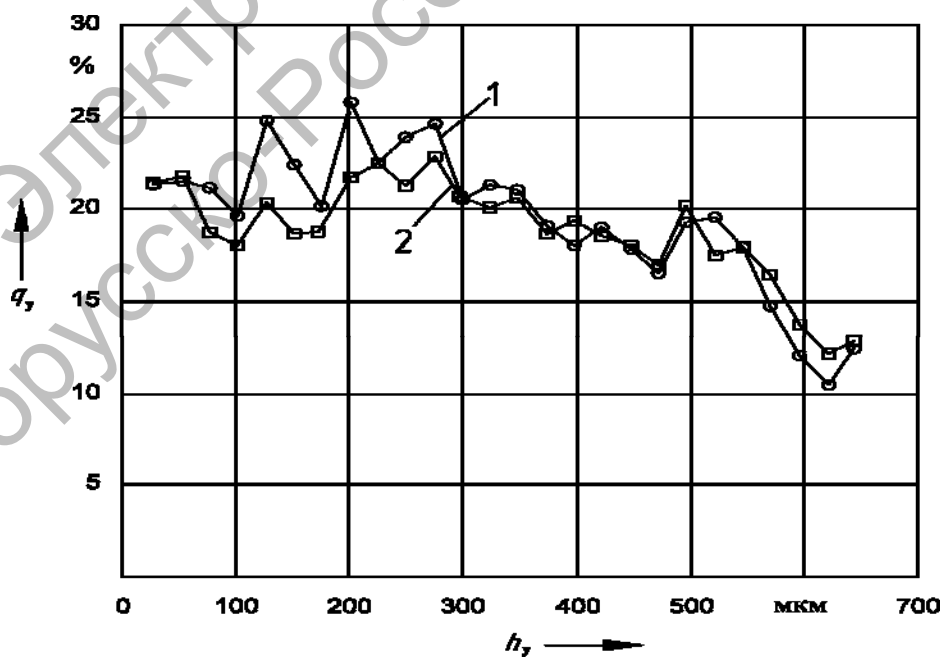


Рис. 2. Степень упрочнения поверхности заготовок по глубине: 1, 2 – упрочнение магнитно-динамическим накатыванием инструментом с диаметром деформирующих шаров 12 и 15 мм соответственно

Анализ результатов изменения микротвердости в поверхностном слое показал, что на глубине заготовок до 350 мкм упрочнение составляет 18...26 %, а на глубине 350...650 мкм – 11...20 %.

### **Рентгеноструктурные исследования поверхностного слоя упрочненных заготовок**

Для оценки характеристик упрочненного поверхностного слоя заготовок (плотности дислокаций, остаточных напряжений сжатия, текстуры) образцов были выполнены рентгеноструктурные исследования.

Обрабатывали заготовки размером ( $L \times B \times H$ ) 200 × 200 × 15 мм.

Группа I заготовок: материал – сталь 45 (200...220 НВ):

а) вид механической обработки поверхности – шлифование ( $Ra$  1,2...1,1 мкм);

б) вид механической обработки поверхности – шлифование и последующее магнитно-динамическое накатывание ( $Ra$  0,28...0,22 мкм).

Группа II заготовок: материал – сталь 45 (41...44 HRC):

а) вид механической обработки поверхности – шлифование ( $Ra$  1,10...1,05 мкм);

б) вид механической обработки поверхности – шлифование и последующее магнитно-динамическое накатывание ( $Ra$  0,35...0,30 мкм).

Магнитно-динамическое накатывание осуществляли на следующих режимах:  $n = 800 \text{ мин}^{-1}$  ( $V = 320 \text{ м/мин}$ );  $S = 125 \text{ мм/мин}$ ; число рабочих ходов инструмента – 1; охлаждение – масло индустриальное И-20; величина натяга между деформирующими и приводными шарами инструмента – 0,7 мм.

Из обработанных заготовок вырезали образцы размером 10 × 10 × 12 мм.

Исследования образцов проводили на автоматизированном рентгеновском комплексе на базе дифрактометра

ДРОН-3М в  $CoK\alpha$ -излучении с применением монохроматизации дифрагированного пучка. В качестве кристалла-монохроматора использовали пластину пиролитического графита. Для получения информации о структуре поверхностных слоев исследуемых образцов проводили запись дифракционных линий (110), (200), (211), (220) матричной  $\alpha$ -Fe-фазы, расположенных в интервале углов рассеяния  $2\theta$ , равных 48...56, 74...80, 96...104, 120...128 град соответственно. Рентгеновская съемка выполнялась в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1 град при продолжительности набора импульсов в 15 и 20 с при записи линий (110), (200) и (211), (220) соответственно. Период кристаллической решетки материала образцов, а также напряженное состояние их поверхностных слоев оценивали по результатам записи дифракционной линии (220).

Физическое уширение  $\beta$  исследуемых дифракционных отражений определяли методом аппроксимации [5]. При этом вводили поправки на геометрию съемки и неоднородность излучения.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и 2.

Как видно из табл. 1, в образцах группы I после шлифования дифракционные линии матричной  $\alpha$ -Fe-фазы  $\beta_{110}$ ,  $\beta_{220}$  заметно уширены (по сравнению с эталонным образцом) и равны  $6,25 \cdot 10^{-3}$  и  $12,04 \cdot 10^{-3}$  рад соответственно. Последнее свидетельствует о достаточно высокой плотности дефектов кристаллической решетки. Период решетки  $\alpha$ -фазы составляет  $a = 0,28662 \text{ нм}$ . Вместе с тем, величина отношения  $\beta_{220}/\beta_{110}$  близка к величине отношения  $\sec\theta_{220}/\sec\theta_{110}$ , что свидетельствует о формировании в поверхностных слоях шлифованных образцов из стали 45 фрагментированных структур, которые характеризуются скоррелированным расположением дислокаций в виде стенок, образующих границы субзерен [6].

Табл. 1. Значения физического уширения дифракционных линий и периода решетки матричной  $\alpha$ -фазы поверхностных слоев образцов

Группа образцов	Вид механической обработки поверхности	$\beta_{110}$ , $10^{-3}$ рад	$\beta_{220}$ , $10^{-3}$ рад	$\frac{\beta_{220}}{\beta_{110}}$	$a$ , нм
I	а	6,25	12,04	1,93	0,28662
	б	6,92	14,33	2,07	0,28676
II	а	9,52	26,03	2,73	0,28661
	б	14,61	31,55	2,16	0,28674

Примечание –  $\text{tg}\theta_{220}/\text{tg}\theta_{110} = 3,82$ ;  $\text{sec}\theta_{220}/\text{sec}\theta_{110} = 1,91$

Табл. 2. Распределение интенсивности в дифракционных линиях

Группа образцов		Дифракционная линия			
		110	200	211	220
I	а	1,00	0,15	0,37	0,19
	б	1,00	0,11	0,70	0,20
II	а	1,00	0,15	0,45	0,17
	б	1,00	0,10	0,65	0,20

Магнитно-динамическая упрочняющая обработка поверхности шлифованных образцов группы I сопровождается повышением плотности дефектов кристаллической решетки в поверхностном слое, что следует из регистрируемого уширения дифракционных линий матричного  $\alpha$ -твердого раствора. Согласно значениям соотношения  $\beta_{220}/\beta_{110}$  для упрочненных образцов из стали 45 (200...220 НВ), магнитно-динамическое накатывание существенно не изменяет структуру их поверхностных слоев. Период кристаллической решетки матричной  $\alpha$ -фазы в упрочненной магнитно-динамическим накатыванием поверхности заметно возрастает и составляет  $a = 0,28676$  нм (для эталонного образца из стали  $a = 0,28664$  [7]).

Анализ образцов группы II показывает, что после их закалки и последующего шлифования дифракционные линии матричной  $\alpha$ -фазы заметно уширены ( $\beta_{110}$ ,  $\beta_{220}$  соответственно равны  $9,52 \cdot 10^{-3}$  и  $26,03 \cdot 10^{-3}$  рад). Это указывает на от-

носительно высокую плотность дефектов кристаллической решетки. Последующее упрочнение шлифованных образцов из стали 45 (41...44 HRC) магнитно-динамическим накатыванием приводит к увеличению плотности дефектов кристаллической решетки, о чем свидетельствует возрастание  $\beta$  до  $14,61 \cdot 10^{-3}$  рад для линии (110) и  $31,55 \cdot 10^{-3}$  рад для линии (220).

Из сравнительного анализа полученных данных (см. табл. 2) следует, что магнитно-динамическое накатывание поверхности образцов из стали 45 приводит к формированию текстуры, на что указывает повышение интенсивности дифракционной линии (211).

После магнитно-динамического накатывания в поверхностном слое образцов первой и второй партий присутствовали остаточные напряжения сжатия величиной 190 и 185 МПа соответственно, определенные по [7].

### Триботехнические исследования упрочненных плоских поверхностей заготовок

В ходе сравнительных испытаний определяли износостойкость плоских поверхностей заготовок, обработанных по различным технологиям.

Материал исследуемых заготовок:

- первая и вторая партии – сталь 45 (200...220 НВ) ГОСТ 1050-88;
- третья и четвертая партии – сталь 45 (41...44 HRC) ГОСТ 1050-88.

Технология получения рабочей поверхности исследуемых заготовок:

- первая партия: торцовое фрезерование с последующим шлифованием ( $Ra$  0,82...0,80 мкм);

- вторая партия: торцовое фрезерование с последующим магнитно-динамическим накатыванием ( $n = 800 \text{ мин}^{-1}$  ( $V = 320 \text{ м/мин}$ ),  $S = 125 \text{ мм/мин}$ ,  $h = 0,7 \text{ мм}$ ),  $Ra$  0,46...0,42 мкм;

- третья партия: торцовое фрезерование, термическая обработка, шлифование ( $Ra$  0,75...0,72 мкм);

- четвертая партия: торцовое фрезерование, термическая обработка, магнитно-динамическое накатывание ( $n = 800 \text{ мин}^{-1}$  ( $V = 320 \text{ м/мин}$ ),  $S = 125 \text{ мм/мин}$ ,  $h = 0,7 \text{ мм}$ ),  $Ra$  0,52...0,5 мкм.

Из полученных заготовок подготавливали призматические образцы с размерами  $6 \times 10 \times 7 \text{ мм}$  в количестве 10 шт. для каждой партии.

Триботехнические испытания исследуемых образцов проводили на трибометре АТВЦ, оснащенный устройством для измерения коэффициента трения, обеспечивающим возвратно-поступательное движение контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения 0,1 м/с. Сравнительные испытания триботехнических свойств образцов проводили в режиме трения при давлении 10 МПа с использованием масла индустриального И-20.

В качестве контртела использовали пластину из закаленной стали У8 (800 HV10) с размерами  $5 \times 40 \times 90 \text{ мм}$ .

Измерение величины массового износа призматических образцов осуществляли весовым методом с использованием аналитических весов АДВ-200М. Погрешность измерения массы образца составляла 0,05 мг. С поверхности образцов перед взвешиванием тщательно удалялись продукты изнашивания, затем образцы промывались, протирались спиртом и просушивались. После просушивания взвешивание каждого образца осуществляли 5 раз. Образцы взвешивали до начала испытаний и после достижения 20000 циклов возвратно-поступательного движения. Общий путь трения составлял 1200 м.

Величину линейного износа образцов при трении в среде смазочного материала определяли методом искусственных баз, основанным на сравнении глубин отпечатков алмазной пирамидки в образцах до и после изнашивания. Отпечатки на поверхности образцов изделия получали путем вдавливания индентора (нагрузка  $P = 98 \text{ Н}$ ) в виде пирамидки с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями  $\alpha = 136^\circ$ . Нижняя точка положения отпечатка от индентора в исследуемом образце являлась искусственной базой, от которой измеряли расстояние до поверхности трения. Глубину расположения отпечатка от вдавливания индентора в исследуемый образец вычисляли по [8].

Отпечатки на поверхность исследуемых образцов наносили вдавливанием индентора с помощью прибора DuraScan 20, предназначенного для определения твердости деталей по Виккерсу.

Результаты триботехнических исследований представлены в табл. 3 и на рис. 3...6.

Табл. 3. Значения коэффициента трения и интенсивности массового  $I_q$  и линейного  $I_h$  изнашивания образцов, обработанных по различным технологиям

Материал и способ получения поверхности образца	Коэффициент трения $f$	Интенсивность массового изнашивания $I_q$ , $10^{-3}$ мг/м	Интенсивность линейного изнашивания $I_h$ , $10^{-3}$ мкм/м
Сталь 45 (200...220 НВ), фрезерование + шлифование	0,116	0,47	23,0
Сталь 45 (200...220 НВ), фрезерование + МДН	0,104	0,20	11,7
Сталь 45 (41...44 HRC), фрезерование + ТО + шлифование	0,131	0,45	21,0
Сталь 45 (41...44 HRC), фрезерование + ТО + МДН	0,109	0,12	6,8

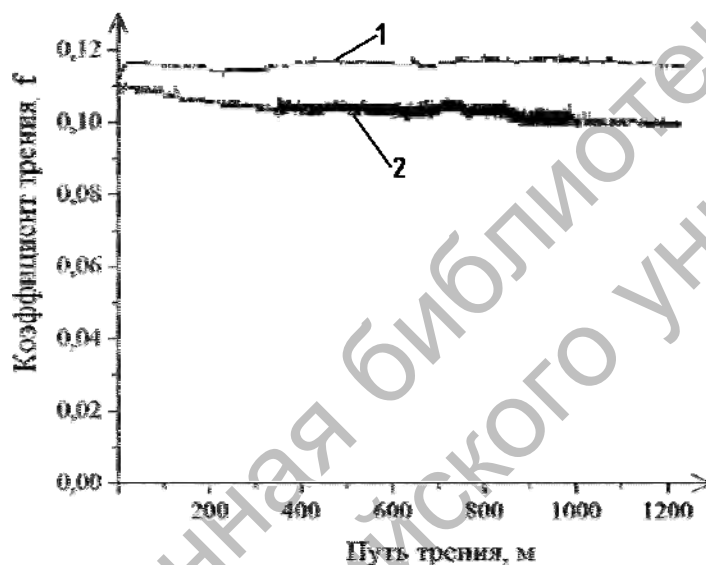


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения рабочей поверхности образцов из стали 45 (200...220 НВ) от пути трения: 1 – фрезерование + шлифование; 2 – фрезерование + МДН

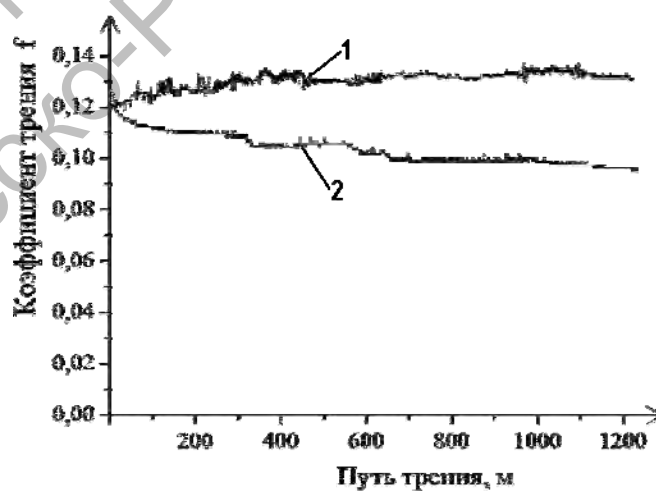


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения рабочей поверхности образцов из стали 45 (41...44 HRC) от пути трения: 1 – фрезерование + ТО + шлифование; 2 – фрезерование + ТО + МДН

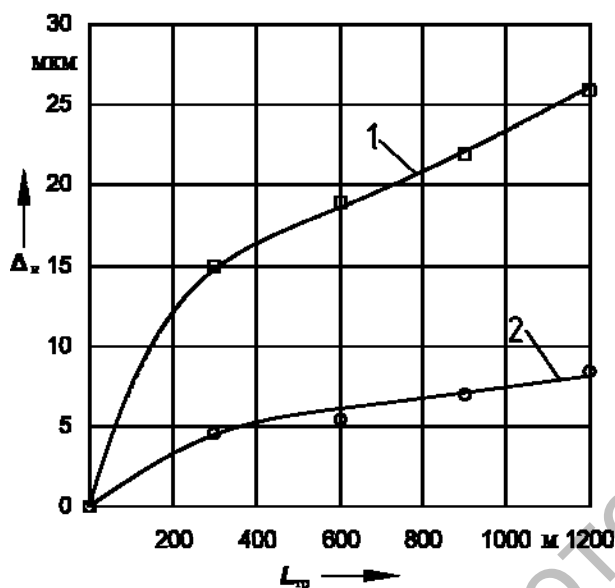


Рис. 5. Зависимость линейного износа  $\Delta_l$  образцов из стали 45 (200...220 HB) от пути трения  $L_{тр}$ : 1 – фрезерование + шлифование; 2 – фрезерование + МДН

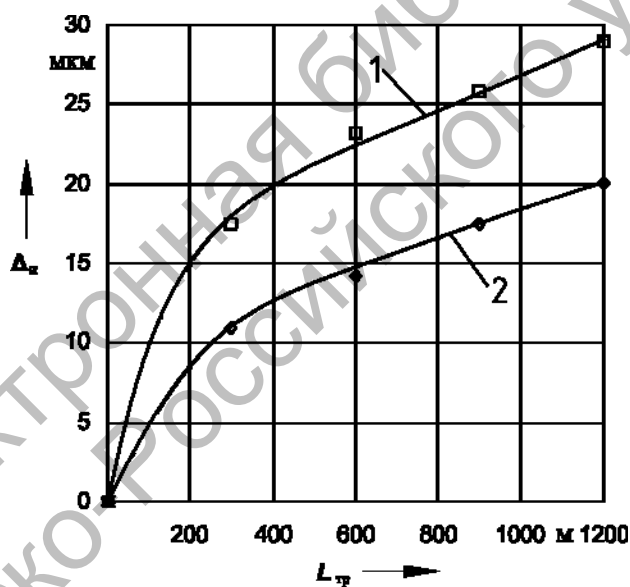


Рис. 6. Зависимость линейного износа  $\Delta_l$  образцов из стали 45 (41...44 HRC) от пути трения  $L_{тр}$ : 1 – фрезерование + ТО + шлифование; 2 – фрезерование + ТО + МДН

Исследование износостойкости показало, что интенсивность линейного изнашивания образцов из стали 45 (200...220 HB), рабочие поверхности которых получены фрезерованием и последующим шлифованием, составила 23 мкм, а обработанных фрезерованием и последующим магнитно-динамическим накатыванием – 11,7 мкм. При этом ко-

эффициент трения поверхностей заготовок, полученных шлифованием, составил 0,116, а упрочненных магнитно-динамическим накатыванием – 0,104.

Таким образом, магнитно-динамическое накатывание (по отношению к шлифованию) позволяет снизить коэффициент трения поверхностей заготовок на 11,5 % и повысить их износостой-



кость в 2,2 раза.

Исследования показали, что интенсивность линейного изнашивания образцов из стали 45 (41...44 HRC), рабочие поверхности которых получены фрезерованием и последующим шлифованием, составляет 21 мкм, а обработанных фрезерованием и последующим магнитно-динамическим накатыванием – 6,8 мкм. При этом коэффициент трения поверхностей заготовок, обработанных шлифованием, составляет 0,131, а упрочненных магнитно-динамическим накатыванием – 0,109. Следовательно, магнитно-динамическое накатывание поверхностей заготовок из стали 45 (41...44 HRC) снижает их коэффициент трения на 20 % и повышает износостой-

кость в 3,1 раза.

### Заключение

Установлено, что магнитно-динамическое накатывание плоских поверхностей заготовок обеспечивает достижение следующих характеристик качества: повышение микротвердости поверхностного слоя на 11...26 %; упрочнение поверхности на глубину до 650 мкм; повышение плотности дефектов кристаллической решетки деформированного металла и формирование в упрочненном слое образцов остаточных напряжений сжатия величиной 185...190 МПа; уменьшение коэффициента трения поверхностей на 12...20 % и повышение их износостойкости в 2,2...3,1 раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструмент и способ магнитно-динамического упрочнения плоской поверхности детали : пат. 17545 РБ, МПК В 24 В 39/02 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20111278 ; заявл. 03.10.11; опубл. 30.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – 4 с.
2. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалева, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.
3. Григорович, В. К. Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 230 с.
4. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 34 с.
5. Лысак, Л. И. Определение истинной ширины рентгеновских интерференционных линий с применением стандартного образца / Л. И. Лысак // Вопросы физики металлов и металловедения : сб. тр. – Киев, 1955. – № 6. – С. 40–53.
6. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.
7. Белый, И. В. Справочник по магнитоимпульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко. – Харьков : Вища шк., 1977. – 320 с.
8. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1993. – 34 с.

Статья сдана в редакцию 26 марта 2016 года

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

**Сергей Александрович Сухоцкий**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: darvin\_serg@mail.ru.

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

**Sergey Aleksandrovich Sukhotsky**, senior lecturer, Belarusian-Russian University.  
E-mail: darvin\_serg@mail.ru.