

---

УДК 621.787

*С. А. Сухоцкий*

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ЗАГОТОВОК, УПРОЧНЕННЫХ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ  
НАКАТЫВАНИЕМ**

---

UDC 621.787

*S. A. Sukhotsky*

**STUDY OF MICRORELIEF OF FLAT WORKPIECE SURFACES HARDENED BY  
MAGNETO-DYNAMIC ROLL FORMING**

---

**Аннотация**

В статье приведены зависимости шероховатости упрочненных плоских поверхностей стальных заготовок от параметров процесса магнитно-динамического накатывания. Определены оптимальные режимы процесса упрочнения. Исследованы характеристики получаемого на поверхности заготовок микрорельефа, представляющего собой сетку пересекающихся микролунок. Установлено повышение удельной маслоемкости плоских поверхностей, упрочненных магнитно-динамическим накатыванием.

**Ключевые слова:**

шероховатость, микрорельеф, сетка микролунок, удельная маслоемкость, магнитная система, деформирующие шары, поверхностное пластическое деформирование.

**Abstract**

The paper shows the dependencies of roughness of hardened flat surfaces of steel workpieces upon the parameters of the magneto-dynamic roll forming process. Optimum modes of the process of hardening have been determined. The characteristics of the micro-relief, which is a mesh of mating micro-irregularities obtained on workpiece surfaces, have been studied. The increase of specific oil absorption power of flat surfaces hardened by magneto-dynamic roll forming has been discovered.

**Key words:**

roughness, microrelief, mesh of micro-irregularities, specific oil absorption power, magnetic system, deforming balls, surface plastic deformation.

---

**Введение**

Существенную роль на эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин оказывают их качественные характеристики, в том числе микрорельеф поверхности. Для обеспечения высоких качественных характеристик поверхностей в технологических процессах изготовления деталей применяют методы поверхностного пластического деформирования.

К перспективным методам отде-

льно-упрочняющей обработки относится магнитно-динамическое накатывание плоских поверхностей, при котором упрочнение осуществляют деформирующими шарами, свободно установленными в кольцевой камере инструмента и введенными в контакт с поверхностью заготовки, перемещаемой с подачей. При этом деформирующим шарам сообщают энергию, необходимую для импульсно-ударного деформирования поверхности, от приводных шаров посредством воздействия на по-

следние вращающимся магнитным полем инструмента. Магнитно-динамическое накатывание обеспечивает совмещение процессов упрочнения и формирования на плоской поверхности детали микрорельефа с высокой маслоемкостью [1].

В связи с этим актуальной задачей является проведение исследований по выявлению технологических возможностей способа магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей деталей.

### *Исследование влияния режимов процесса магнитно-динамического накатывания плоских заготовок на шероховатость упрочненной поверхности*

В соответствии с поставленной задачей были выявлены зависимости шероховатости плоских поверхностей заготовок от параметров процесса магнитно-динамического накатывания.

Отделочно-упрочняющую обработку заготовок из стали 45 различной твердости осуществляли по разработанному способу [1] на вертикально-фрезерном станке на следующих режимах:  $n = 500 \dots 1300 \text{ мин}^{-1}$  ( $V = 200 \dots 518 \text{ м/мин}$ );  $S = 20 \dots 500 \text{ мм/мин}$ ;  $h = 0,7 \text{ мм}$ ; количество рабочих ходов инструмента – 1.

Магнитно-динамическое накатывание

поверхности заготовок производили инструментом, содержащим корпус, кольцевые камеры, приводные и деформирующие шары, магнитную систему [2]. В состав магнитной системы входили кольцевой постоянный магнит осевой намагниченности из феррита стронция с размерами ( $D \times d \times h$ )  $71 \times 27 \times 14 \text{ мм}$  и магнитопроводные зубчатые диски из стали Ст 3 с прямобочным профилем зубьев. Величина магнитной индукции на периферии зубьев магнитопроводных дисков –  $0,23 \text{ Тл}$ . В кольцевых камерах инструмента были установлены приводные и деформирующие шары из стали ШХ15 ( $62 \dots 65 \text{ HRC}$ ) диаметром 22 и 12 мм соответственно. Степень точности шаров – 100 (ГОСТ 3722-81). Количество приводных и деформирующих шаров – 16 и 24 шт. соответственно.

Шероховатость упрочненных плоских поверхностей заготовок измеряли профилометром-профилографом фирмы «Митутойо» (Mitutoyo) модели Surftest SJ-210 (Япония). Погрешность измерения шероховатости при этом составляла не более 5 %. За величину шероховатости упрочненной поверхности заготовки принимали среднее значение пяти измерений шероховатости по параметру  $Ra$ .

Результаты исследований шероховатости упрочненной поверхности заготовок представлены на рис. 1 и 2.

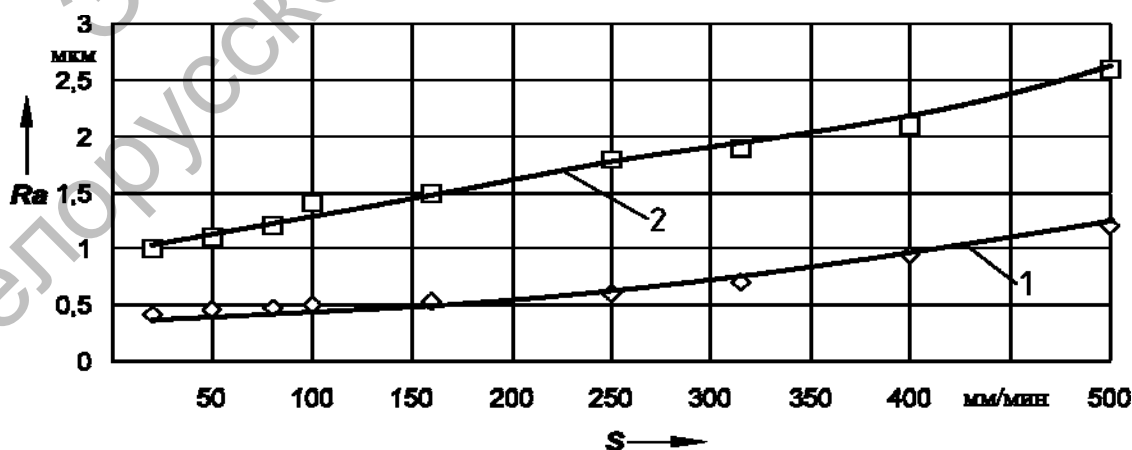


Рис. 1. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности заготовок от подачи инструмента: 1 – сталь 45 (200...220 НВ),  $Ra_{\text{неч}} = 4,5 \dots 4,3 \text{ мкм}$ ; 2 – сталь 45 (41...44 HRC),  $Ra_{\text{неч}} = 4,3 \dots 4,1 \text{ мкм}$

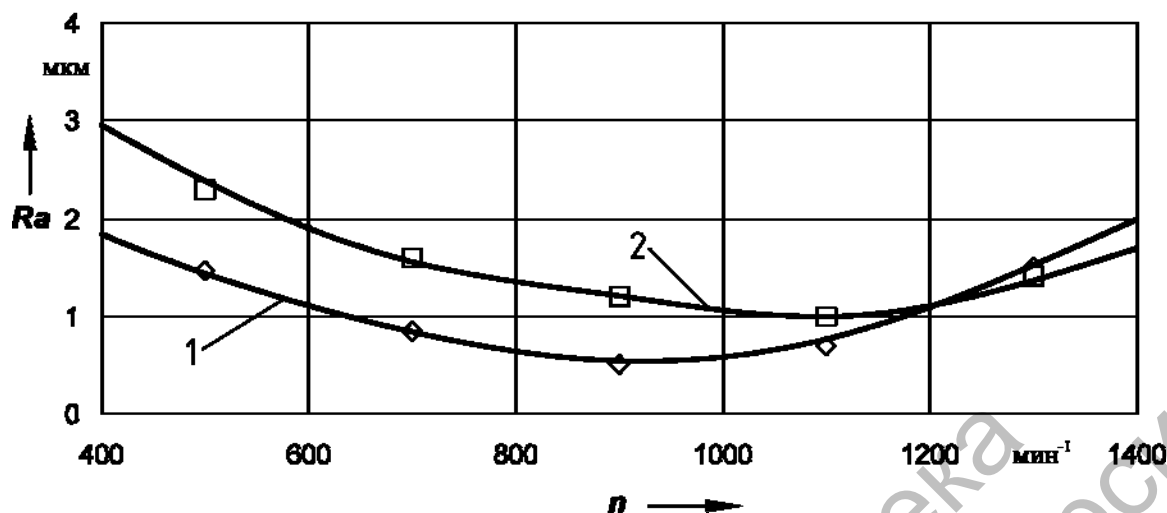


Рис. 2. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности заготовок от частоты вращения инструмента: 1 – сталь 45 (200...220 НВ),  $Ra_{исх} = 4,5...4,3$  мкм; 2 – сталь 45 (41...44 HRC),  $Ra_{исх} = 4,3...4,1$  мкм

Анализ экспериментальных зависимостей (см. рис. 1 и 2) показывает, что магнитно-динамическое накатывание в диапазоне подач от 20 до 500 мм/мин обеспечивает снижение шероховатости поверхности заготовок из стали 45 твердостью 200...220 НВ и 41...44 HRC с  $Ra$  4,5...4,1 мкм до 1,25...0,45 и 2,7...1,1 мкм соответственно. Снижение шероховатости поверхности заготовок имеет место при частоте вращения инструмента 400...1300 мин<sup>-1</sup> ( $V = 160...518$  м/мин). При частоте вра-

щения инструмента меньше 400 мин<sup>-1</sup> приводные шары не могут оторваться от магнитной системы инструмента, что исключает их взаимодействие с деформирующими шарами и делает невозможным процесс упрочнения.

На рис. 3...5 показаны зависимости шероховатости упрочненных поверхностей заготовок от числа рабочих ходов инструмента, исходной шероховатости заготовок и натяга между приводными и деформирующими шарами.

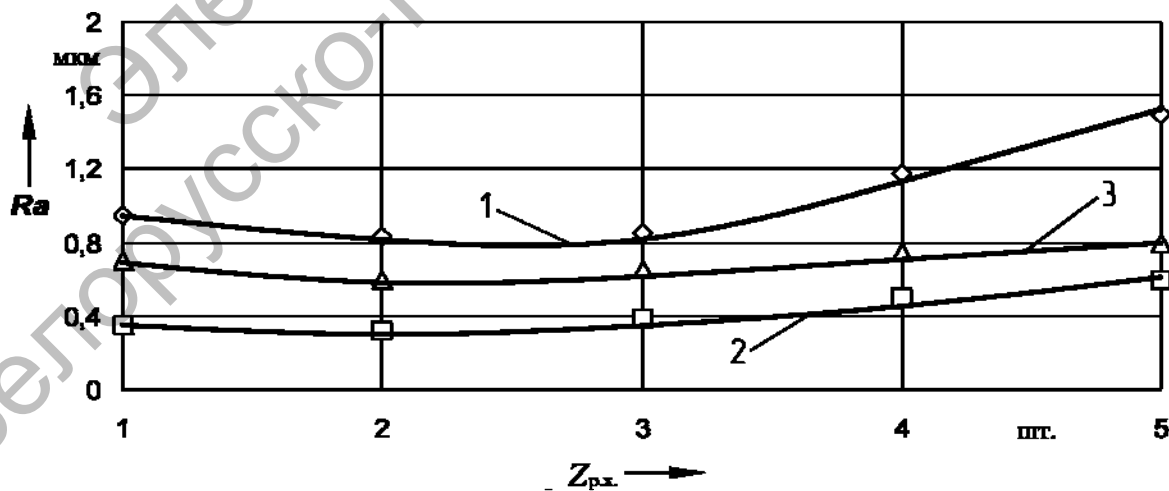


Рис. 3. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности от числа рабочих ходов инструмента: 1 – сталь 45 (200...220 НВ),  $Ra_{исх} = 6,3...6,0$  мкм; 2 – сталь 45 (200...220 НВ),  $Ra_{исх} = 1,25...1,15$  мкм; 3 – сталь 45 (41...44 HRC),  $Ra_{исх} = 2,5...2,3$  мкм

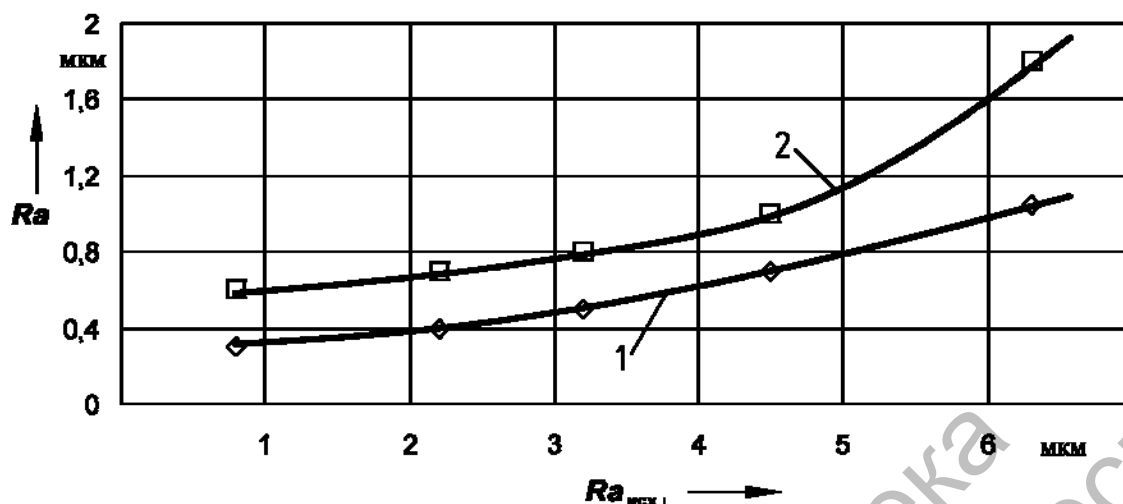


Рис. 4. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от исходной шероховатости поверхности заготовок: 1 – сталь 45 (200...220 НВ); 2 – сталь 45 (41...44 HRC)

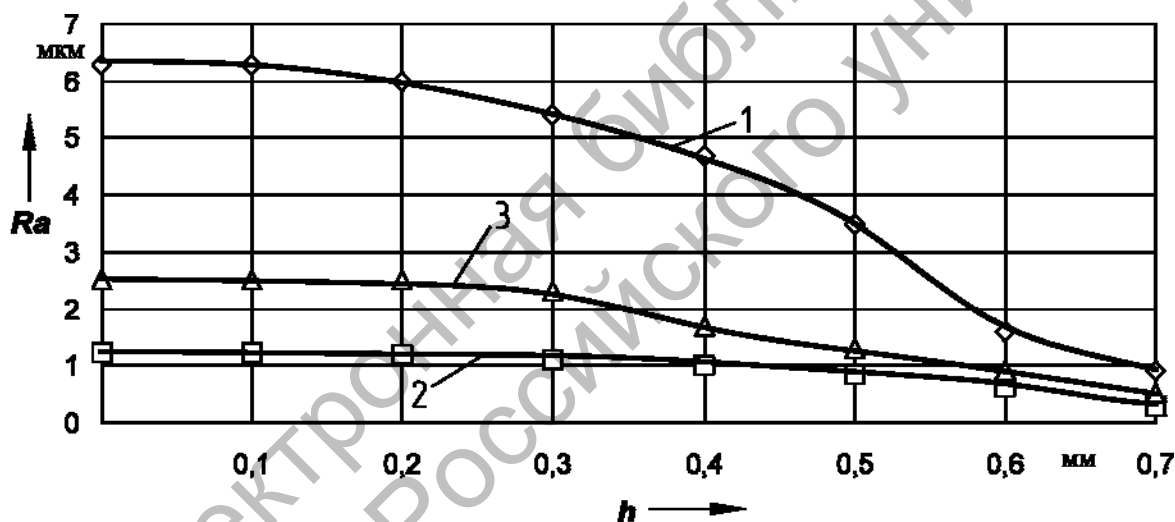


Рис. 5. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности от натяга между деформирующими и приводными шарами инструмента: 1 – сталь 45 (200...220 НВ)  $Ra_{исх} = 6,3...6,0$  мкм; 2 – сталь 45 (200...220 НВ)  $Ra_{исх} = 1,25...1,15$  мкм; 3 – сталь 45 (41...44 HRC)  $Ra_{исх} = 2,5...2,3$  мкм

Установлено, что при магнитно-динамическом накатывании плоских поверхностей заготовок из стали наибольшее снижение шероховатости происходит за первый и второй рабочие ходы инструмента. Третий и последующий рабочие ходы инструмента не приводят к дальнейшему уменьшению шероховатости.

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 4) показывает, что магнитно-динамическое накатывание позволяет

снизить шероховатость (по параметру  $Ra$ ) плоских поверхностей заготовок из стали 45 твердостью 200...220 НВ в 5,5...6 раз, а твердостью 41...44 HRC – в 4...4,5 раза. При величине натяга между деформирующим и приводными шарами применяемого инструмента до 0,3 мм (см. рис. 5) исходная шероховатость плоской поверхности почти не изменяется, т. к. энергии взаимодействия между деформирующими и приводными шарами недостаточно для смя-

тия микронеровностей заготовки. При натяге между деформирующими и приводными шарами инструмента в диапазоне 0,3...0,7 мм имеет место эффективное снижение исходной шероховатости поверхности заготовок.

Выполнена оптимизация параметров процесса магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей заготовок из стали 45 (200...220 НВ) с  $Ra_{исх} = 4,5...4,3$  мкм с целью максимального снижения их шероховатости.

Установлено, что основными факторами процесса упрочнения, оказывающими наибольшее влияние на шероховатость упрочненной поверхности, являются частота вращения  $n$  (скорость  $V$ ), подача  $S$  и диаметр деформирующих шаров  $d$  инструмента. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности заготовок  $Ra = f(n, S, d)$  от основных факторов аппроксимировали полиномом второй степени и использовали центральный композиционный план, отвечающий

требованию ротатабельности.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена зависимость шероховатости упрочненной плоской поверхности от основных параметров обработки:

$$Ra = 7,432 - 1,384 \cdot 10^{-2} \cdot n - 5,986 \cdot 10^{-4} \times \\ \times S - 6,748 \cdot 10^{-2} \cdot d - 0,31 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot S + \\ + 6,3 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot d - 37,7 \cdot 10^{-6} \cdot d \cdot S + \\ + 7,325 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 6,29 \cdot 10^{-6} \cdot S^2 + \\ + 2,08 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \quad (1)$$

Полученная модель (1) имеет погрешность в пределах 8...12 %, что позволяет считать ее в достаточной степени адекватной.

Графическое изображение математической модели, показывающее зависимость шероховатости  $Ra$  обработанных плоских поверхностей заготовок от двух соответствующих факторов, представлено на рис. 6.

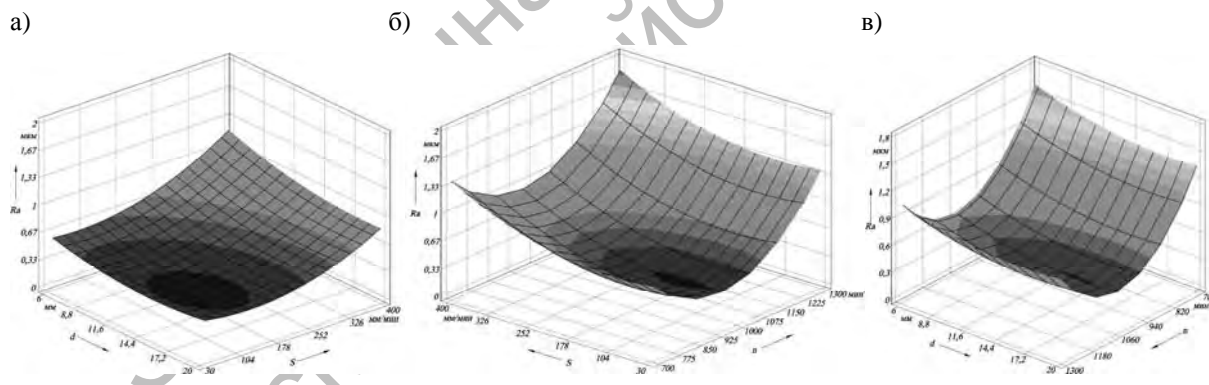


Рис. 6. Влияние подачи  $S$  и диаметра деформирующего шара  $d$  (а), подачи  $S$  и частоты вращения инструмента  $n$  (б), частоты вращения инструмента  $n$  и диаметра деформирующего шара  $d$  (в) на шероховатость плоской поверхности, упрочненной магнитно-динамическим накатыванием

Полученные диаграммы позволяют определить значения режимов магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей и диаметр деформирующего шара инструмента, при которых обеспечивается заданная чертёжом шероховатость поверхности заготовки по параметру  $Ra$ .

Анализ полученных результатов показывает, что оптимальными режимами магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей заготовок из стали 45 (200...220 НВ) являются частота вращения инструмента  $n = 940$  мин<sup>-1</sup> ( $V = 375$  м/мин), подача инструмента  $S = 120$  мм/мин, при которых достига-

ется снижение исходной шероховатости поверхности с  $Ra$  4,3...4,1 до  $Ra$  0,41...0,36 мкм. Из графиков видно, что наибольшее снижение шероховатости упрочненной поверхности имеет место при диаметре деформирующих шаров инструмента, равном 15 мм.

#### **Исследование характеристик сетки микролунок на упрочненной поверхности заготовок**

Экспериментально установлено, что магнитно-динамическое накатывание совместно с интенсивным снижением шероховатости обеспечивает формирование на плоской поверхности заготовки сетки пересекающихся микролунок, выполняющих в парах трения функцию удержания смазки и оказывающих существенную роль на износостойкость, прирабатываемость, сопротивление схватыванию и гидроплотность поверхностей [3]. В связи с этим определение и обеспечение рациональных параметров микрорельефа поверхности заготовки, а также управление его характеристиками являются важной технологической задачей.

Научный и практический интерес представляют исследования, связанные с определением влияния режимов процесса магнитно-динамического накатывания на параметры микрорельефа (сетки пересекающихся микролунок) упрочняемой поверхности.

Шаг  $P$  и глубину  $h_l$  микролунок на поверхности упрочненных заготовок измеряли методом профилографирования с использованием профилометра-профилографа SurfTest SJ-210. За экспериментальные значения параметров  $P$  и  $h_l$  принимали их средние величины на участке поверхности длиной 6,4 мм (рис. 7). Упрочняемые образцы из стали 45 (41...44 HRC) имели исходную шероховатость  $Ra = 1,2...1,3$  мкм. После упрочнения образцов магнитно-динамическим накатыванием ( $n = 800$  мин<sup>-1</sup> ( $V = 320$  м/мин),  $S = 125$  мм/мин,  $h = 0,7$  мм) шероховатость поверхности снизилась и составила  $Ra$  0,28...0,25 мкм.

Результаты экспериментальных исследований шага и глубины микролунок упрочненных поверхностей заготовок представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

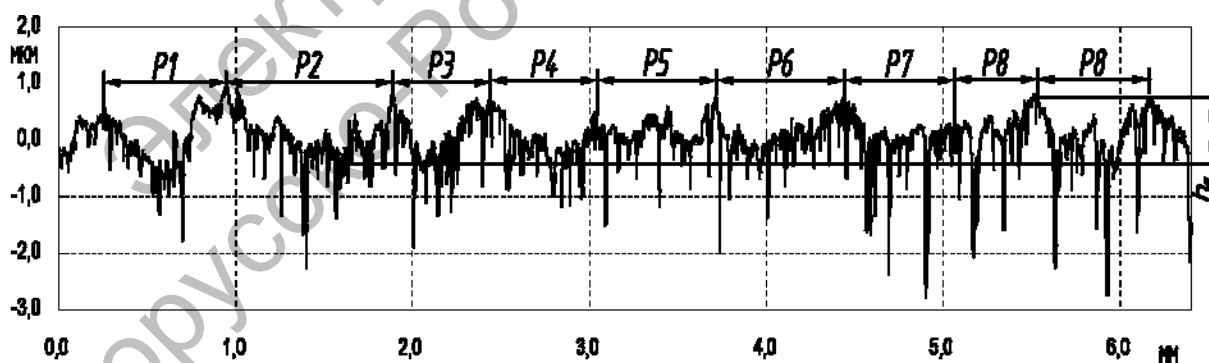


Рис. 7. Профилограмма поверхности плоской детали из стали 45 (41...44 HRC), упрочненной магнитно-динамическим накатыванием

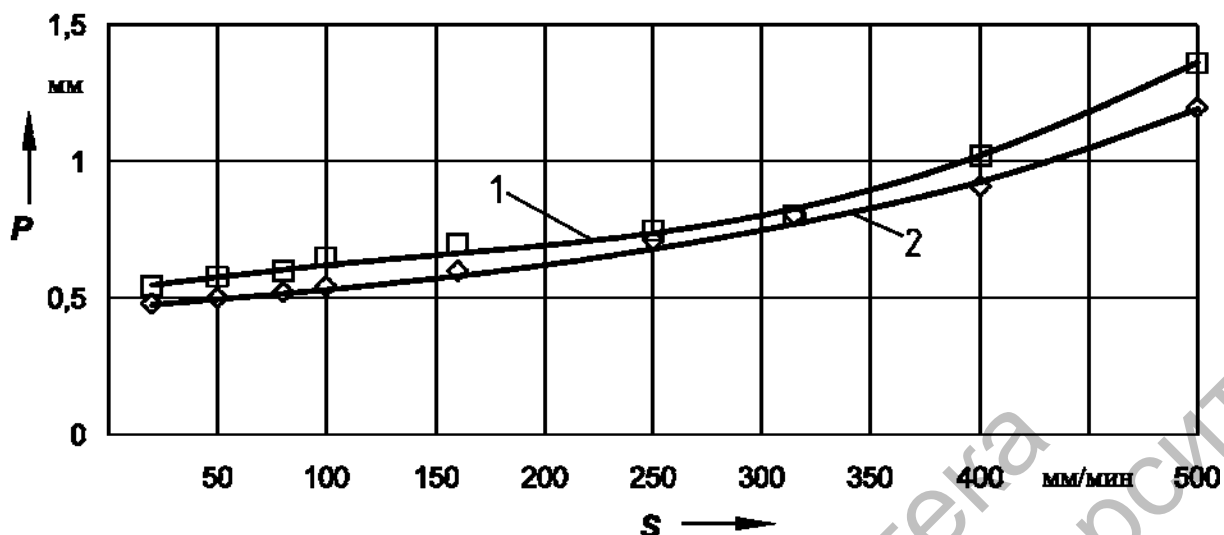


Рис. 8. Зависимость шага микролунок, имеющих на поверхности упрочненных заготовок, от подачи инструмента: 1 – сталь 45 (200...220 НВ); 2 – сталь 45 (41...44 HRC)

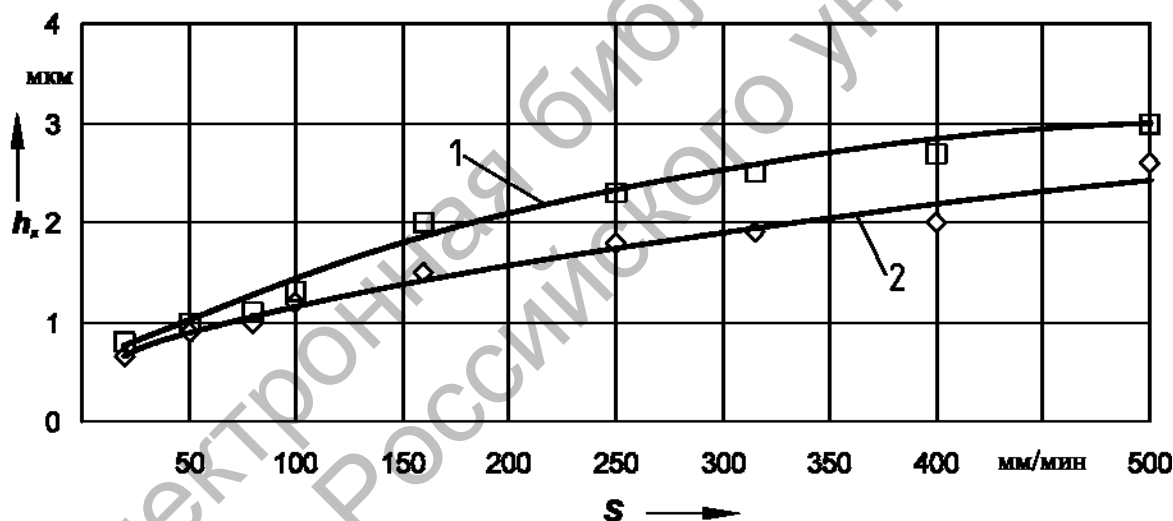


Рис. 9. Зависимость глубины микролунок на поверхности упрочненных заготовок от подачи инструмента: 1 – сталь 45 (200...220 НВ); 2 – сталь 45 (41...44 HRC)

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что шаг  $P$  и глубина микролунок  $h_l$  возрастают с увеличением подачи инструмента, что связано с уменьшением числа ударов деформирующих шаров в единицу времени на элементарный участок упрочняемой поверхности. При этом глубина микролунок больше у заготовок из стали 45 твердостью 200...220 НВ (чем у заготовок с аналогичной стали твердостью 41...44 HRC), т. к. они характери-

зуются более высокой пластичностью.

#### Определение удельной маслостойкости

Важной характеристикой, определяющей эксплуатационные свойства упрочненных поверхностей заготовок, является их удельная маслостойкость [4].

Расчет указанного параметра осуществляли на основе полученных профилеграмм упрочненных поверхностей за-

готовок и построения соответствующих им кривых Аббота-Файерстоуна [5, 6].

Используя параметры формы профиля шероховатости анализируемой поверхности заготовки  $R_{vk}$  и  $Mr_2$ , удельную маслосъемность поверхностей  $Q$ ,  $\text{мм}^3/\text{см}^2$ , неупрочненных и упрочненных магнитно-динамическим накатыванием, рассчитывали по формуле [4]

$$Q = \frac{R_{vk}}{20} \left( 1 - \frac{Mr_2}{100\%} \right). \quad (2)$$

Кривые Аббота-Файерстоуна, соответствующие профилограммам обработанных поверхностей заготовок, показаны на рис. 10.

В табл. 1 представлены результаты расчета удельной маслосъемности плоских поверхностей заготовок из стали 45.

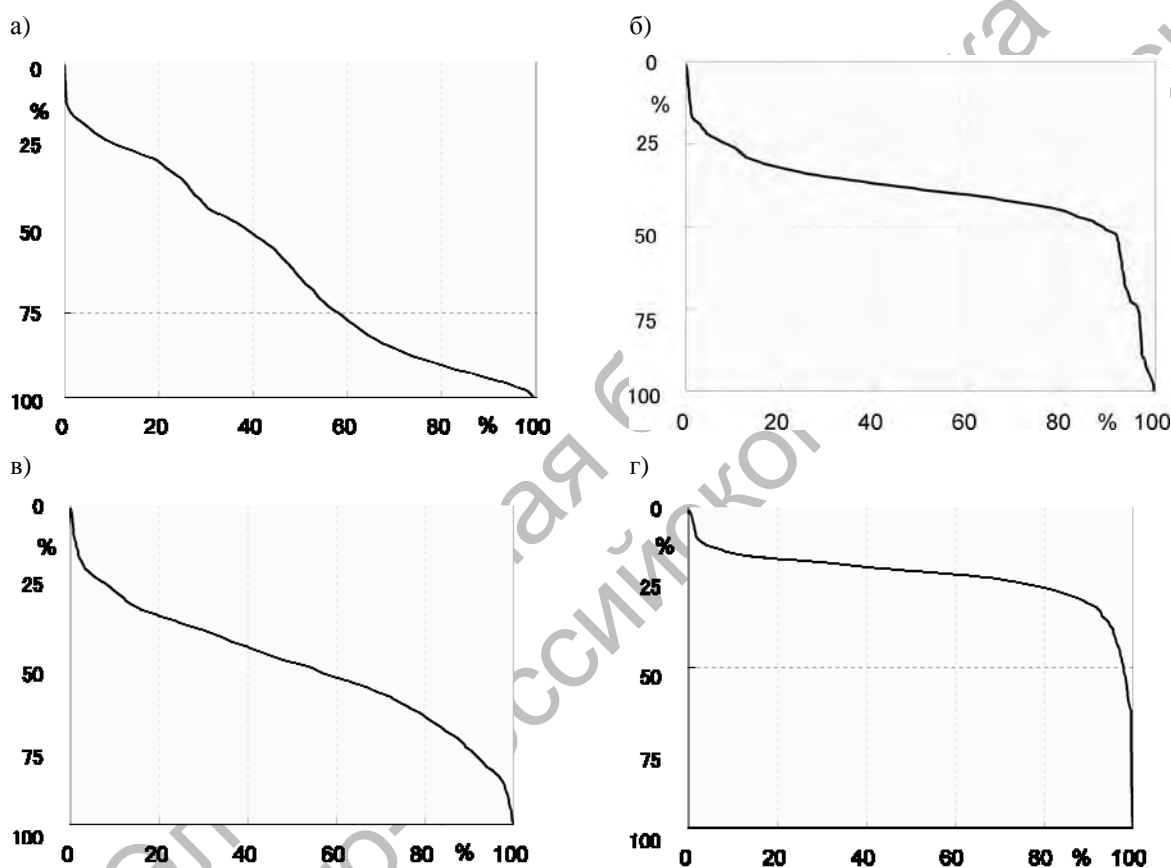


Рис. 10. Кривые Аббота-Файерстоуна, соответствующие профилограммам обработанных плоских поверхностей заготовок: а – поверхность заготовки из стали 45 (200...220 НВ), полученная методом фрезерования ( $Ra$  6,2...5,9 мкм); б – поверхность заготовки из стали 45 (200...220 НВ), полученная фрезерованием и последующим упрочнением магнитно-динамическим накатыванием ( $Ra$  0,44...0,41 мкм); в – поверхность заготовки из стали 45 (41...44 HRC), обработанная методом шлифования ( $Ra$  0,63...0,61 мкм); г – поверхность заготовки из стали 45 (41...44 HRC), полученная шлифованием и последующим магнитно-динамическим накатыванием

Табл. 1. Удельная маслосъемность плоских поверхностей анализируемых заготовок

Метод обработки поверхности	Твердость образцов	$Ra$ , мкм	$R_{vk}$ , мкм	$Mr_2$ , %	$Q$ , $\text{мм}^3/(\text{см}^2 \cdot 10^{-3})$
Фрезерование	200–220 НВ	6,2–5,9	0,732	97,88	0,778
Фрезерование + МДН		0,44–0,41	0,743	86,40	5,052
Шлифование	41–44 HRC	0,63–0,61	0,764	88,67	4,328
Шлифование + МДН		0,18–0,16	0,614	82,40	5,403



Сравнительный анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что магнитно-динамическое накатывание поверхностей заготовок из стали 45 (200...220 НВ), полученных методом фрезерования, обеспечивает повышение удельной маслостойкости поверхности в 6,5, а из стали 45 (41...44 HRC), полученных методом шлифования, – в 1,25 раза.

### Заключение

Разработанный способ магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей обеспечивает следующие качественные характеристики:

– снижение шероховатости поверхности заготовок из стали 45 твердостью 200...220 НВ в 5,5...6, а твердостью

41...44 HRC – в 4...4,5 раза;

– получение на поверхности плоских стальных заготовок сетки микролунок с шагом  $P = 0,5...1,4$  мм и глубиной  $h_{л} = 0,7...3,0$  мкм;

– повышение удельной маслостойкости поверхностей заготовок из стали 45 в 1,25...6,5 раза.

Оптимальными параметрами процесса магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей заготовок из стали 45 (200...220 НВ) (для достижения шероховатости поверхности  $Ra$  0,41...0,36 мкм) являются частота вращения инструмента  $n = 940$  мин<sup>-1</sup> ( $V = 375$  м/мин), подача  $S = 120$  мм/мин, диаметр деформирующих шаров инструмента  $d = 15$  мм.

### 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. Свирица // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.
3. Шнейдер, Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1972. – 240 с.
4. Минаков, А. П. Исследование влияния пневмовибродинамической обработки на эксплуатационные свойства обработанной поверхности / А. П. Минаков, Е. В. Ильющина // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 172–176.
5. Абрамова, Н. Б. Исследование качества поверхности медных гильз кристаллизаторов МНЛЗ / Н. Б. Абрамова // Технология машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 12–14.
6. Васильков, Д. В. Эффективность использования международных стандартов при контроле микрогеометрии поверхностей деталей / Д. В. Васильков, Д. Ю. Печенюк // Инструмент. – 2002. – № 12. – С. 6–7.

Статья сдана в редакцию 22 июня 2016 года

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

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