



УДК 621.787.4

DOI 10.17073/0368-0797-2023-3-272-282



Оригинальная статья

Original article

## СТЕПЕНЬ УПРОЧНЕНИЯ И ГЛУБИНА НАКЛЕПА ПРИ МАЯТНИКОВОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

С. А. Зайдес, Хо Минь Куан

Иркутский национальный исследовательский технический университет (Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

minhquanho2605@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние основных технологических параметров маятникового поверхностного пластического деформирования (ППД) на механические свойства поверхностного слоя цилиндрических деталей из углеродистой стали. С использованием твердомера HBRV-187,5 и микротвердомера HMV-G21 определены твердость поверхностного слоя, микротвердость и глубина наклепанного слоя упрочненных деталей. Представлены результаты по расчету степени упрочнения, которые являются важной информацией для оценки эффективности способа ППД с точки зрения улучшения механических свойств металла. Экспериментальные исследования показали, что после маятникового ППД (при разных режимах обработки) твердость поверхностного слоя повышается на 9 – 12 % по сравнению с твердостью исходной поверхности, а микротвердость возрастает в 1,5 – 1,7 раз, что приводит к значительному упрочнению поверхностного слоя цилиндрической заготовки. Глубина упрочненного слоя варьируется в интервале 0,9 – 1,1 мм, при этом степень упрочнения составляет 45 – 65 %. С помощью программного пакета Statistica 10.1, позволяющего решать задачи оптимизации на основе статистического анализа, построена модель оптимизации и определены оптимальные режимы упрочнения при маятниковом ППД, обеспечивающие одновременно и максимальную глубину упрочненного слоя, и наибольшую степень упрочнения поверхностного слоя. Оптимальные режимы упрочнения формируются при следующих режимах обработки: радиальный натяг  $t = 0,15 \div 0,2$  мм; продольная подача  $s = 0,07 \div 0,11$  мм/об; частота вращения заготовки  $n_3 = 160 \div 200$  мин<sup>-1</sup>; частота маятникового движения рабочего инструмента  $n_{ин} = 110 \div 130$  дв.ход/мин; угловая амплитуда рабочего инструмента  $\alpha = 35 \div 40^\circ$ . По результатам экспериментальных данных и численных расчетов установлено, что средний размер зерен при маятниковом ППД уменьшается на 30 – 40 % по сравнению с исходным размером, а плотность дислокаций возрастает в 2,5 раза.

**Ключевые слова:** углеродистая сталь, степень упрочнения, глубина наклепа, поверхностное пластическое деформирование, твердость, микротвердость, режимы обработки, поверхностный слой, статистический расчет

**Для цитирования:** Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Степень упрочнения и глубина наклепа при маятниковом поверхностном пластическом деформировании углеродистой стали. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(3):272–282.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-272-282>

## DEGREE AND DEPTH OF HARDENING UNDER PENDULUM SURFACE PLASTIC DEFORMATION OF CARBON STEEL

S. A. Zaides, Ho Minh Quan

Иркутск National Research Technical University (83 Lermontova Str., Irkutsk 664074, Russian Federation)

minhquanho2605@gmail.com

**Abstract.** The article discusses influence of the main technological parameters of pendulum surface plastic deformation (SPD) on the mechanical properties of surface layer of cylindrical parts made of carbon steel. Using the hardness tester HBRV-187.5 and the microhardness tester HMV-G21, we determined hardness of the surface layer, microhardness and depth of the work-hardened layer of hardened parts. In addition, the results of calculating the hardening degree are presented, which is important information for evaluating the effectiveness of SPD method in terms of improving the metal mechanical properties. Experimental studies showed that after pendulum SPD (at different processing modes), hardness of the surface layer increases by 9 – 12 % compared to hardness of the original surface, and the microhardness increases by 1.5 – 1.7 times, which leads to a significant hardening of the cylindrical billet surface layer. Depth of the hardened layer varies in the range of 0.9 – 1.1 mm, while the hardening degree is 45 – 65 %. Using the software package Statistica 10.1, which allows solving optimization problems based on statistical analysis and building an optimization model, we determined the optimal modes of hardening by pendulum SPD. These modes simultaneously provide both the maximum depth of the hardened layer and the highest hardening degree of the surface layer. They are formed under the following processing modes: radial interference  $t = 0.15 - 0.2$  mm; longitudinal feed  $s = 0.07 - 0.11$  mm/rev; billet rotation frequency  $n_b = 160 - 200$  min<sup>-1</sup>; frequency of the working

tool pendulum movement  $n_t = 110 - 130$  strokes/min; angular amplitude of the working tool  $\alpha = 35 - 40^\circ$ . According to the results of experimental data and numerical calculations, it was established that the average grain size in pendulum SPD decreases by 30–40 % compared to the initial size, and the dislocation density increases by 2.5 times.

**Keywords:** carbon steel, hardening degree, hardening depth, surface plastic deformation, hardness, microhardness, processing mode, surface layer, statistical calculation

**For citation:** Zaides S.A., Ho Minh Quan. Degree and depth of hardening under pendulum surface plastic deformation of carbon steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(3):272–282. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-272-282>

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы машин и механизмов во многом зависит от качества изготовления отдельных деталей. При этом под качеством изготовления следует понимать не только соответствие точности и шероховатости чертежу детали, но и состояние поверхностного слоя, который в первую очередь воспринимает силовые и температурные воздействия. Надежность работы машин можно увеличить металлургическими, конструкторскими, технологическими и эксплуатационными методами. Практика подтверждает, что в настоящее время наиболее эффективными являются технологические методы [1–3].

Для повышения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя деталей машин достаточно широко используют технологию отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) [4–6].

Пластическая деформация сопровождается структурными изменениями в металле поверхностного слоя. В атомной решетке резко возрастает количество дислокаций, вакансий и других дефектов. Происходит дробление зерен на фрагменты и блоки, изменяются размеры и форма зерен в поверхностном слое. Упруго-пластическая деформация в процессе механической обработки изменяет физико-химические свойства металла поверхностного слоя по сравнению с исходным его состоянием [7–9].

В результате пластической деформации металл упрочняется, монотонно затухая по глубине поверхностного слоя. Так, при обкатывании деталей из стали 45 мультирадиусным роликом [10] глубина наклепа составляет примерно 1,1 мм, при этом в зоне пластической волны микротвердость небольшая, около 270 HV. При алмазном выглаживании деталей из стали 45 тангенциальные сжимающие напряжения увеличиваются почти в 10 раз, при этом формируется небольшая глубина наклепа 0,05–0,40 мм (при увеличении усилия от 50 до 200 Н). Показатель плотности дислокаций упрочненного поверхностного слоя, который характеризует степень измельчения зерна, повышается в 1,4–1,7 раз [11].

Эффект упрочнения металла при ППД положительно отражается на эксплуатационных характеристиках деталей машин, повышая их износостойкость, контактную прочность, надежность пресовых посадок и др. [12–14].

Кроме степени упрочнения, к параметрам качества поверхностного слоя относится глубина упрочненного слоя [15–17]. Увеличение глубины упрочнения сопровождается, как правило, увеличением усилия прижима рабочего инструмента к заготовке. Глубина пластического упрочнения может оказывать разное влияние на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя. Так, увеличение глубины наклепа положительно сказывается на износостойкости деталей машин, но если речь идет об усталостной прочности, то авторы работ [2; 11; 15; 18] утверждают, что с увеличением глубины упрочнения снижается величина остаточных напряжений сжатия, а от этого может уменьшиться выигрыш в долговечности.

Большой вклад в аналитическое определение глубины упрочнения при ППД внесли российские ученые Браславский В.М., Дрозд М.С., Кудряцев И.В., Матлин М.М., Петушков Г.Е., Хейфец С.Г. и др. Однако полученные математические зависимости справедливы для простых по кинематике способов нагружения деформирующими инструментами.

В Иркутском НИТУ ведутся работы по совершенствованию способов ППД на основе более сложной кинематики рабочего инструмента. Авторами статьи предложен способ ППД, основанный на маятниковом движении деформирующего инструмента [19], который последовательно реализует процессы качения и скольжения. Эффективность способа с точки зрения увеличения интенсивности напряжений в очаге деформации без повышения радиального натяга и остаточных напряжений в упрочненных деталях представлена в работе [20].

Цель данной работы – установить влияние параметров и режимов маятникового ППД на глубину наклепа и степень упрочнения, что позволит оценить возможности предлагаемого способа по обеспечению качества деталей машин.

## МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлена кинематическая схема процесса маятникового ППД. При маятниковом поверхностном пластическом деформировании (МППД) наружной поверхности деталей в виде тел вращения детали  $I$  сообщают вращательное движение относительно центральной оси, рабочий инструмент прижимают к обрабатываемой поверхности с некоторым натягом  $t$  и сообщают инструменту продольную подачу

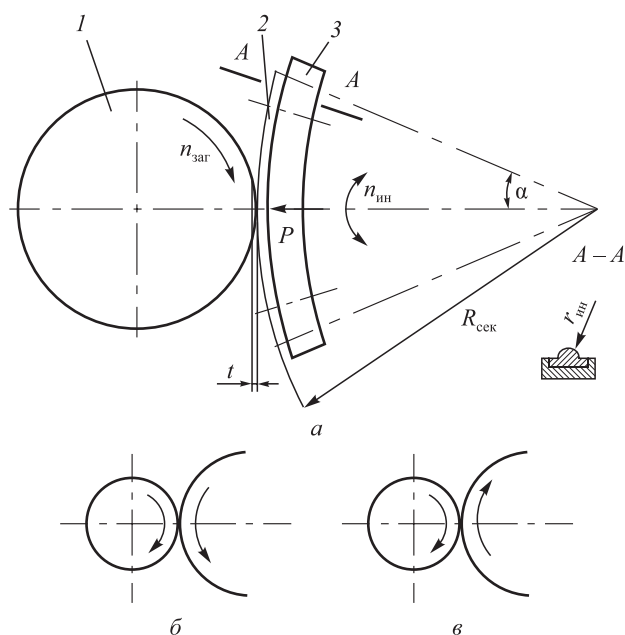


Рис. 1. Схема маятникового поверхностного пластического деформирования (а):  
1 – заготовка; 2 – деформирующий элемент;  
3 – рабочий сектор инструмента;  
б – схема качения; в – схема скольжения в зоне контакта

Fig. 1. Scheme of pendulum surface plastic deformation (a):  
1 – billet; 2 – deforming element; 3 – working sector of the tool;  
б – rolling scheme; в – sliding scheme in the contact zone

в направлении, параллельном оси детали. В качестве рабочего инструмента используют круговой сектор 3 с радиусом скругления на цилиндрической поверхности 2, который жестко закрепляют на одной стороне коромысла, обеспечивающего колебательное движение с некоторым углом  $\alpha$ .

Экспериментальные исследования проведены на токарном станке 1К62, где вместо верхней части суп-

порта устанавливается устройство для создания маятникового движения секториального рабочего инструмента (рис. 2). Геометрические характеристики рабочего инструмента: секториальный радиус  $R_{\text{сек}} = 65$  мм; рабочий радиус  $r_{\text{ин}} = 3$  мм; материал – быстрорежущая сталь P18. В качестве технологической смазки использовано индустриальное масло И-40А, которое широко применяется при обработке деталей ППД.

Для определения глубины наклепа и степени упрочнения цилиндрических деталей после маятникового ППД использовали цилиндрические образцы из среднеуглеродистой стали 45 диаметром 25 мм. Опытные образцы разделены поперечными канавками на шесть одинаковых по длине и диаметру участков, которые обрабатываются с использованием разных технологических параметров и режимов обработки. На каждом образце испытывался один параметр ППД с пятью разными режимами обработки, что позволило построить соответствующие графики. Каждый параметр обработки реализован на трех образцах. На графиках представлены среднеарифметические значения экспериментальных исследований.

Для исключения биения обрабатываемой поверхности образец закрепляли в трехкулачковом патроне токарного станка и поджимали задним центром. После этого цилиндрическую поверхность образца протачивали резцом до диаметра 25 мм ( $s = 0,17$  мм/об,  $n_{\text{об}} = 620$  об/мин,  $t = 0,5$  мм), а затем упрочняли ППД.

Перед проведением экспериментальных исследований выполнено предварительное упрочнение ППД для определения базовых режимов обработки, в качестве которых приняты: радиальный натяг  $t = 0,07$  мм; продольная подача  $s = 0,07$  мм/об; частота вращения заготовки  $n_3 = 100$  об/мин; угловая амплитуда  $\alpha = \pm 20^\circ$ ; частота маятникового движения рабочего инструмента  $n_{\text{ин}} = 55$  дв.ход/мин.

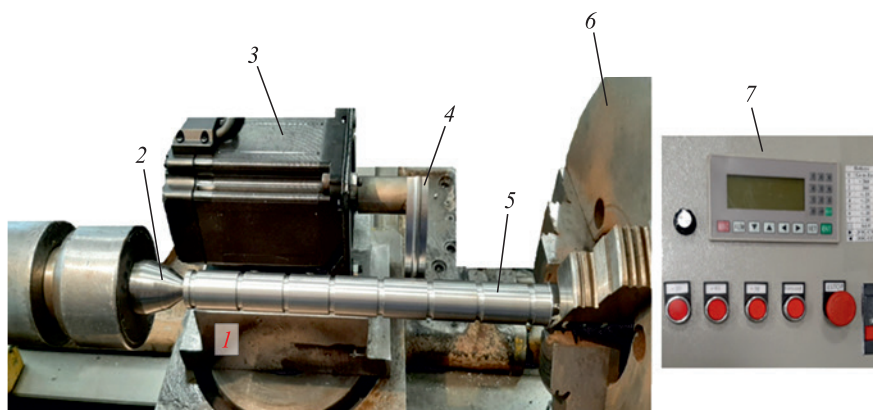


Рис. 2. Общий вид устройства для маятникового ППД наружных поверхностей цилиндрических деталей:  
1 – основание; 2 – задний центр; 3 – мотор-редуктор; 4 – секториальный рабочий инструмент с радиусом скругления;  
5 – обрабатываемый образец; 6 – трехкулачковый патрон; 7 – панель управления параметрами движения рабочего инструмента

Fig. 2. General view of the device for pendulum surface plastic deformation (SPD) of cylindrical parts' outer surfaces:  
1 – base; 2 – rear center; 3 – motor-reducer; 4 – sectorial working tool with a rounding radius; 5 – processed sample;  
6 – three-jaw chuck; 7 – control panel for the working tool movement

После маятникового ППД цилиндрические образцы разрезали на шлифы с помощью металлографического отрезного станка модели Discotom-10. Образцы заливали порошком эпоксидной смолы Aka-Resin Acrylic в формы на автоматическом прессе марки ПОЛИЛАБ С50А. Затем их шлифовали и полировали на автоматическом шлифовально-полированном станке модели Tegramin-25 до зеркального блеска с постоянным охлаждением водой. Для выявления микроструктуры стали 45 шлифы травили с помощью 5 %-ного раствора азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) со спиртом.

Для измерения твердости поверхностного слоя по Роквеллу применяли твердомер HBRV-187,5. На каждом участке образца твердость измеряли в шести точках, расположенных на поверхности по двум окружностям. Твердость каждого участка принята как среднеарифметическое значение по результатам измерений в шести точках.

Измерение микротвердости выполнено с помощью микротвердомера HNV-G21 по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, принцип работы которого заключается в статическом вдавливании наконечника с алмазной пирамидой Виккерса в плоскую поверхность микрошлифа. Для измерения микротвердости микрошлифов использовали шкалу  $\text{HV}_{0,2}$  (значение номинальной нагрузки 1,961 Н, время выдержки 5 с). Для обеспечения корректности измерения микротвердость каждого микрошлифа определили в трех точках, удаленных от поверхности цилиндра на одинаковое расстояние. Исходя из результатов средних значений по трем замерам, установили зависимость микротвердости упрочненных деталей от каждого технологического параметра маятникового ППД, которая отражается в представленных ниже графиках.

Изучение микроструктуры упрочненных деталей проводили на металлографическом микроскопе марки MET-2. Структуру металла с увеличением до 500 крат наблюдали на экране компьютера с помощью программы TopView. Размер зерна оценивали по сред-

неарифметическому значению между максимальной и минимальной его величиной, которое становится устойчивым с наименьшей погрешностью при измерении не менее 5 – 7 раз. В представленных результатах каждое зерно замеряли не менее 10 раз.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим основные физико-механические свойства поверхностного слоя упрочненных деталей в зависимости от технологических параметров и режимов маятникового ППД, которые включают в себя твердость поверхностного слоя, микротвердость и глубину наклепа.

**Твердость поверхностного слоя.** Значения твердости на поверхности деталей при маятниковом ППД в зависимости от основных технологических параметров и режимов упрочнения представлены в табл. 1.

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что твердость поверхностного слоя деталей, упрочненных маятниковым ППД, повышается в среднем на 9 – 12 % по сравнению с исходной твердостью поверхности. Установлено, что кроме величины натяга и продольной подачи существенное влияние на увеличение твердости поверхностного слоя оказывают частота вращения заготовки, частота маятникового движения и угловая амплитуда рабочего инструмента.

**Микротвердость упрочненного слоя.** По результатам измерения микротвердости поверхностного слоя можно оценить не только эффект упрочнения, но и глубину наклепанного слоя. На рис. 3 показано распределение микротвердости по сечению упрочненной детали маятниковым ППД при базовых режимах упрочнения. Установлено, что исходная микротвердость заготовки после механической обработки резанием на токарном станке составляет 210 – 215  $\text{HV}_{0,2}$ . После обработки маятниковым ППД микротвердость на глубине 50 мкм от поверхности повышается до 320  $\text{HV}_{0,2}$ .

Таблица 1

Твердость поверхностного слоя цилиндрических деталей при маятниковом ППД (исходная твердость  $\text{HRB}_{\text{исх}} = 84,8$ )

Table 1. Hardness of the surface layer of cylindrical parts under pendulum SPD (initial hardness  $\text{HRB}_{\text{in}} = 84.8$ )

|                                                              |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Величина продольной подачи, мм/об                            | 0,07 | 0,11 | 0,13 | 0,17 | 0,23 |
| Твердость, HRB                                               | 94,1 | 93,7 | 93,5 | 93,2 | 93,0 |
| Величина радиального натяга, мм                              | 0,05 | 0,07 | 0,10 | 0,15 | 0,20 |
| Твердость, HRB                                               | 93,7 | 94,1 | 94,3 | 94,6 | 94,8 |
| Частота вращения заготовки об/мин                            | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
| Твердость, HRB                                               | 93,8 | 94,1 | 94,2 | 94,8 | 95,6 |
| Частота маятникового движения рабочего инструмента, дв.х/мин | 40   | 55   | 80   | 100  | 120  |
| Твердость, HRB                                               | 93,6 | 94,1 | 94,3 | 94,6 | 94,7 |
| Угловая амплитуда рабочего инструмента, град                 | ±15  | ±20  | ±25  | ±30  | ±37  |
| Твердость, HRB                                               | 93,8 | 94,1 | 94,3 | 94,5 | 94,8 |



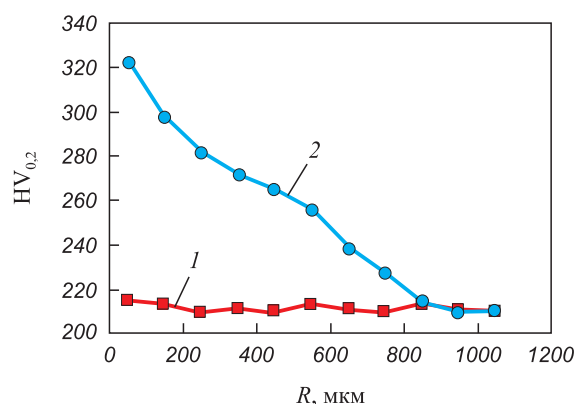


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя при маятниковом ППД (в базовых режимах обработки): 1 – до МППД; 2 – после МППД

Fig. 3. Distribution of microhardness over the surface layer depth under pendulum SPD (in basic processing modes): 1 – before pendulum SPD; 2 – after pendulum SPD

Следует отметить, что микротвердость уменьшается в направлении центра цилиндра и на некоторой глубине переходит к исходной микротвердости основного металла. Зона повышенной микротвердости по сравнению с исходной является глубиной упрочненного слоя, которая в данном случае составила около 0,88 мм (рис. 3). Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя в зависимости от параметров маятникового ППД качественно соответствует рис. 3.

В табл. 2 представлено влияние основных параметров и режимов маятникового ППД на максимальную величину микротвердости и глубину наклепа.

На рис. 4 показаны графические зависимости микротвердости и глубины упрочненного слоя от более значимых технологических параметров ( $s$ ,  $t$ ,  $n_3$ ,  $n_{ин}$ ) маятникового ППД.

Установлено, что с увеличением величины натяга от 0,05 до 0,20 мм микротвердость поверхностного слоя

повышается примерно на 12 %, а глубина упрочненного слоя при этом возрастает примерно на 35 %. Увеличение продольной подачи от 0,07 до 0,23 мм/об приводит к снижению микротвердости на 3 – 5 % и глубины упрочненного слоя на 7 – 8 %. Увеличение частоты вращения заготовки (от 80 до 200 об/мин) и частоты маятникового движения рабочего инструмента (от 40 до 120 дв.х/мин) также повышает микротвердость на 10 – 14 %, а глубину упрочненного слоя на 15 – 18 %. Увеличение угловой амплитуды оказывает незначительное влияние на изменение микротвердости и глубины упрочненного слоя.

Степень упрочнения ( $CH$ ) поверхностного слоя после маятникового ППД определена по формуле

$$CH = \frac{HV_2 - HV_1}{HV_1} \cdot 100 \% \quad (1)$$

где  $HV_1$  – исходная микротвердость поверхности обрабатываемого материала;  $HV_2$  – микротвердость поверхности после обработки ППД.

Результаты расчета степени упрочнения в зависимости от основных параметров и режимов маятникового ППД представлены в табл. 3.

Анализируя указанные данные, можно сделать вывод, что при базовых условиях маятникового ППД степень упрочнения составляет около 50 %, а при изменении основных технологических параметров и режимов ППД степень упрочнения варьируется в интервале 45 – 65 %. На рис. 5 представлены графические зависимости степени упрочнения от основных технологических параметров ( $s$ ,  $t$ ,  $n_3$ ,  $n_{ин}$ ) маятникового ППД.

Для поиска оптимальных режимов маятникового ППД, обеспечивающих получение наибольших значений глубины упрочненного слоя и степени упрочнения, использовали программный пакет Statistica 10.1, который является одной из широко применяемых программ для решения задачи статистического характера

Таблица 2

### Микротвердость ( $HV_{0.2}$ ) на поверхности и глубина наклепа ( $h$ ) при маятниковым ППД

Table 2. Microhardness ( $HV_{0.2}$ ) on the surface and hardening depth ( $h$ ) under pendulum SPD

|                                                              |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Величина продольной подачи, мм/об                            | 0,07     | 0,11     | 0,13     | 0,17     | 0,23     |
| Микротвердость / глубина, мм                                 | 323/0,88 | 317/0,86 | 313/0,85 | 307/0,82 | 305/0,81 |
| Величина радиального натяга, мм                              | 0,05     | 0,07     | 0,10     | 0,15     | 0,20     |
| Микротвердость / глубина, мм                                 | 306/0,81 | 323/0,88 | 333/0,94 | 339/1,01 | 348/1,1  |
| Частота вращения заготовки об/мин                            | 80       | 100      | 125      | 160      | 200      |
| Микротвердость / глубина, мм                                 | 320/0,86 | 323/0,88 | 325/0,89 | 328/0,91 | 330/0,93 |
| Частота маятникового движения рабочего инструмента, дв.х/мин | 40       | 55       | 80       | 100      | 120      |
| Микротвердость / глубина, мм                                 | 317/0,85 | 323/0,88 | 327/0,91 | 334/0,94 | 339/0,98 |
| Угловая амплитуда рабочего инструмента, град                 | ±15      | ±20      | ±25      | ±30      | ±37      |
| Микротвердость / глубина, мм                                 | 316/0,87 | 323/0,88 | 325/0,89 | 327/0,90 | 329/0,91 |

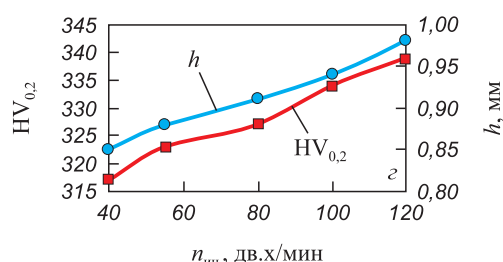
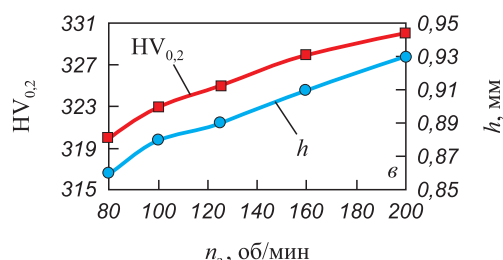
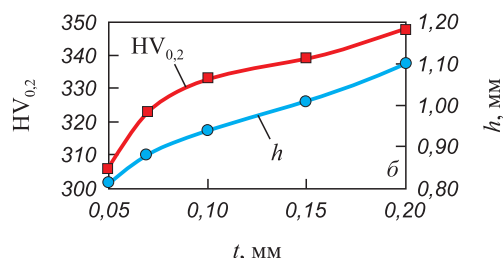
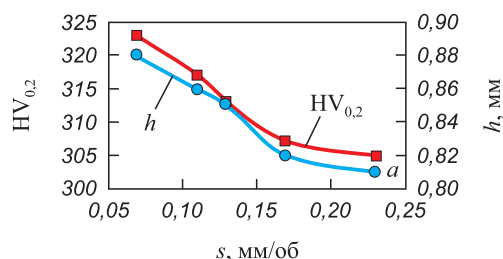


Рис. 4. Зависимость микротвердости и глубины упрочнения от основных параметров маятникового ППД:  $s$  (а);  $t$  (б);  $n_3$  (в);  $n_{ни}$  (г)

Fig. 4. Dependence of microhardness and hardening depth on the main parameters of pendulum SPD:  $s$  (а);  $t$  (б);  $n_b$  (в);  $n_t$  (г)

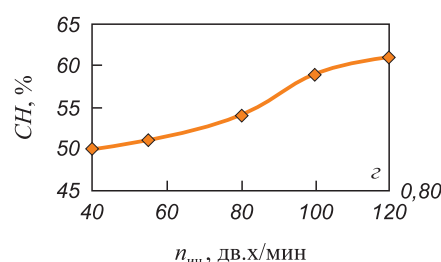
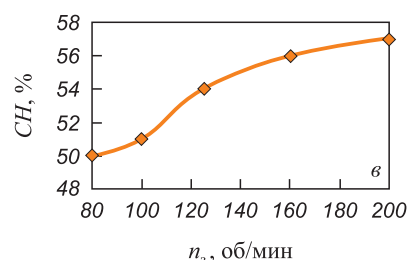
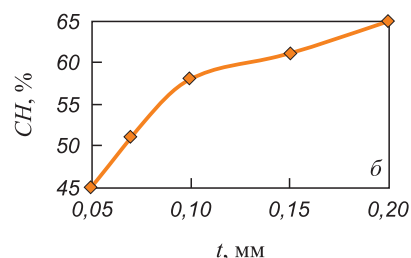
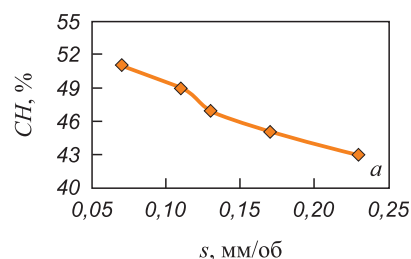


Рис. 5. Зависимость степени упрочнения от основных параметров маятникового ППД:  $s$  (а);  $t$  (б);  $n_3$  (в);  $n_{ни}$  (г)

Fig. 5. Dependence of hardening degree on the main parameters of pendulum SPD:  $s$  (а);  $t$  (б);  $n_b$  (в);  $n_t$  (г)

Таблица 3

Влияние основных параметров маятникового ППД на степень упрочнения

Table 3. Influence of the main parameters of pendulum SPD on hardening degree

|                                                              |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Величина продольной подачи, мм/об                            | 0,07 | 0,11 | 0,13 | 0,17 | 0,23 |
| Степень упрочнения, %                                        | 51   | 49   | 47   | 45   | 43   |
| Величина радиального натяга, мм                              | 0,05 | 0,07 | 0,10 | 0,15 | 0,20 |
| Степень упрочнения, %                                        | 45   | 51   | 58   | 61   | 65   |
| Частота вращения заготовки, об/мин                           | 80   | 100  | 125  | 160  | 200  |
| Степень упрочнения, %                                        | 50   | 51   | 54   | 56   | 57   |
| Частота маятникового движения рабочего инструмента, дв.х/мин | 40   | 55   | 80   | 100  | 120  |
| Степень упрочнения, %                                        | 50   | 51   | 54   | 59   | 61   |
| Угловая амплитуда рабочего инструмента, град.                | ±15  | ±20  | ±25  | ±30  | ±37  |
| Степень упрочнения, %                                        | 50   | 51   | 53   | 55   | 56   |

в области машиностроения. Для обработки данных в программе Statistica 10.1 необходимо использовать однофакторные уравнения (2) и (3), полученные при описании кривых, представленных на рис. 4, 5. При этом глубина упрочненного слоя и степень упрочнения являются основными параметрами оптимизации:

$$h = \begin{cases} 7,3s^2 + 3s + 2,1; \\ 69t^2 + 17t + 7,8; \\ 0,05n_{ин}^2 + 1,6n_{ин} + 6,6; \\ 0,87n_3^2 + 0,4n_3 + 0,9; \end{cases} \quad (2)$$

$$CH = \begin{cases} 9,3s^2 + 5s + 25; \\ 9,9t^2 + 1,7t + 5; \\ 0,7n_{ин}^2 + 0,5n_{ин} + 6; \\ 7,9n_3^2 + 0,3n_3 + 4. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 6 и 7 показаны некоторые отклики по определению оптимальных режимов, обеспечивающих

наибольшие значения глубины упрочненного слоя и степени упрочнения, которые получены с помощью программного пакета Statistica 10.1.

Сводные результаты статистической обработки по оптимизации глубины упрочненного слоя и степени упрочнения представлены в табл. 4. Установлено, что существуют режимы обработки маятникового ППД, которые одновременно обеспечивают получение наибольших значений глубины упрочненного слоя (около 1,1 мм) и степени упрочнения (около 65 %). Это происходит благодаря однозначной зависимости глубины и степени упрочнения от каждого технологического параметра. Так, величины  $h$  и  $CH$  находятся в прямой пропорциональной зависимости от параметров  $\alpha$ ,  $t$ ,  $n_3$ ,  $n_{ин}$  и обратной пропорциональной зависимости от продольной подачи  $s$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Упрочнение металлов и сплавов обусловлено торможением движущихся дислокаций. Один из путей

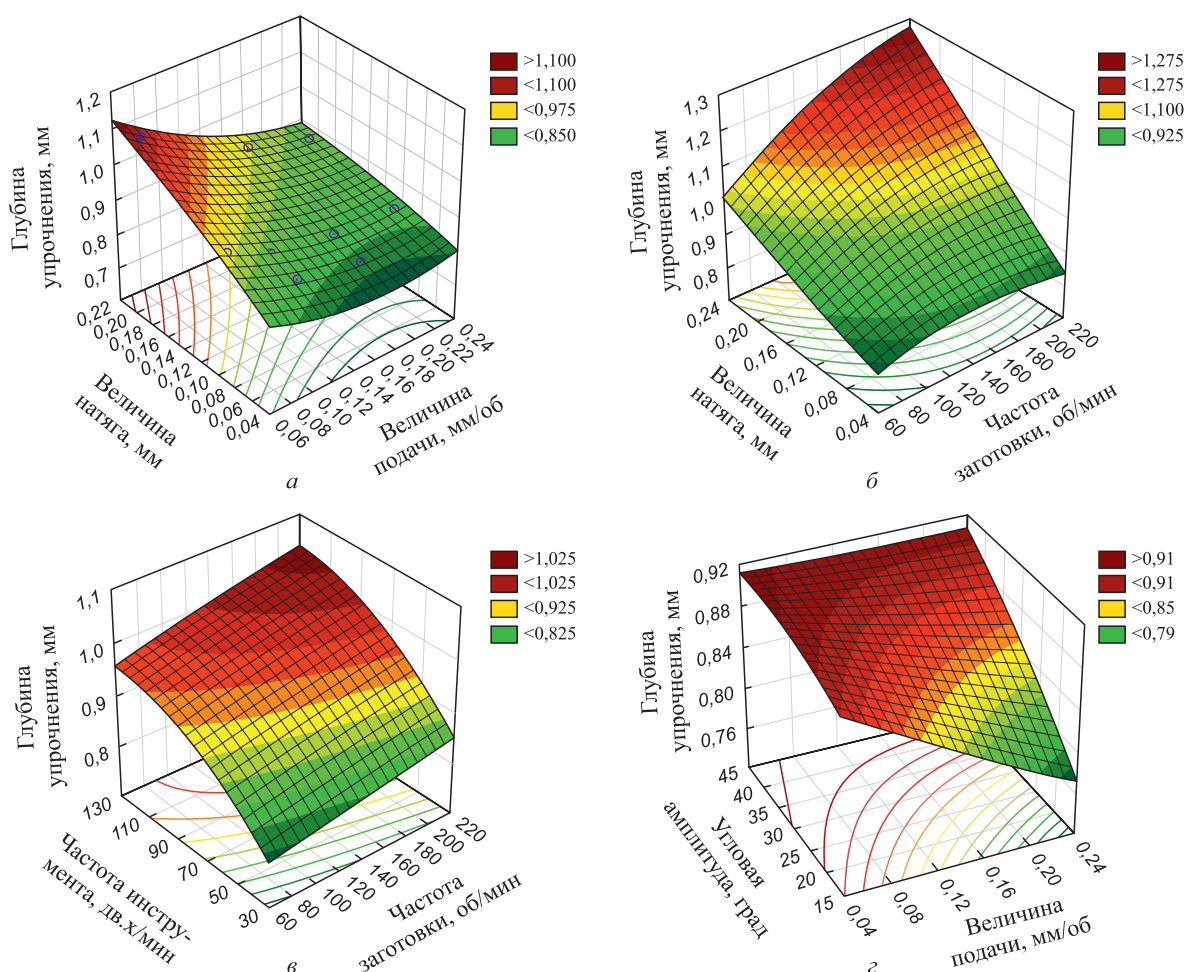


Рис. 6. Поверхности отклика глубины упрочненного слоя цилиндрической поверхности при маятниковом ППД в зависимости от:  $t$  и  $s$  (а);  $t$  и  $n_3$  (б);  $n_{ин}$  и  $n_3$  (в);  $\alpha$  и  $s$  (г)

Fig. 6. Depth response surfaces of the hardened layer of cylindrical surfaces under pendulum SPD depending on:  $t$  and  $s$  (а);  $t$  and  $n_b$  (б);  $n_i$  and  $n_b$  (в);  $\alpha$  and  $s$  (г)

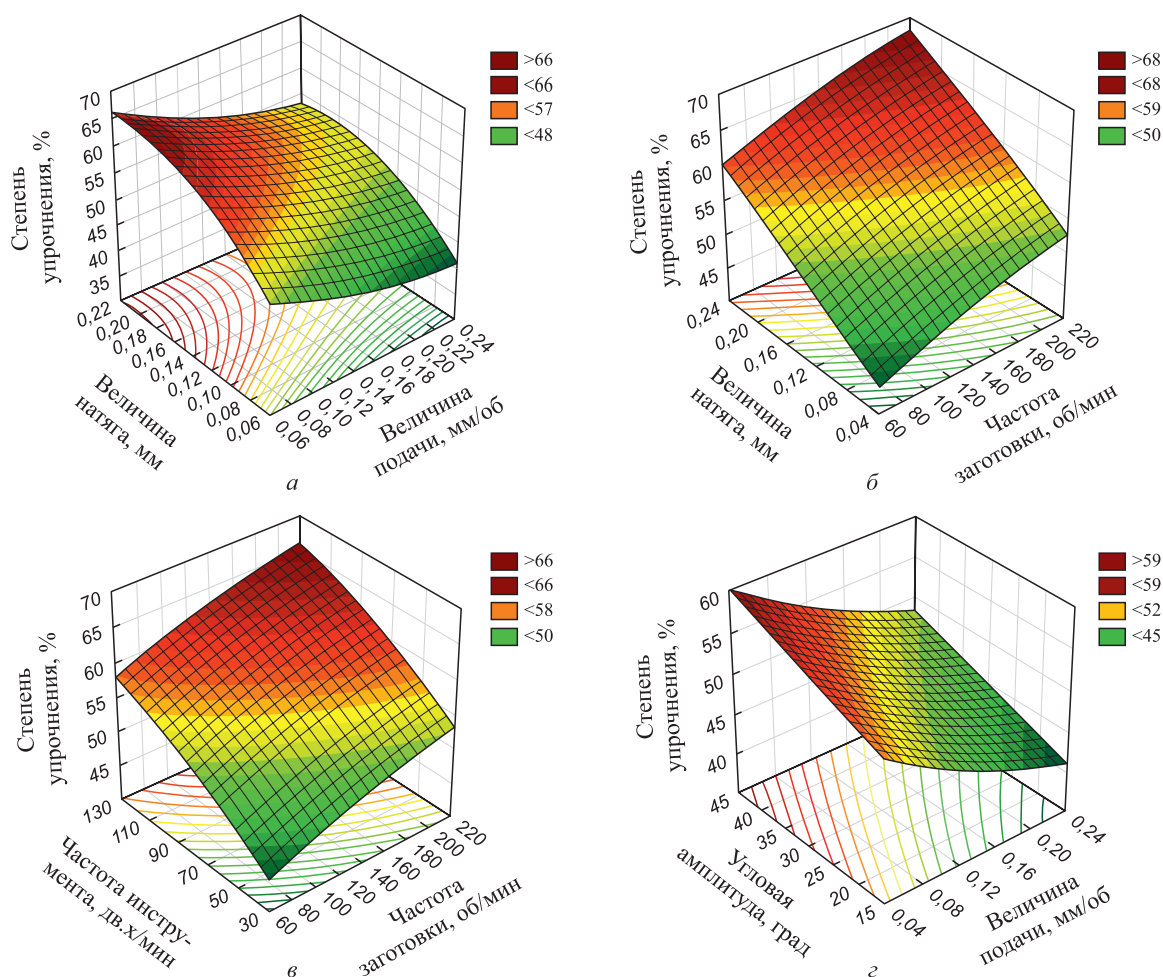


Рис. 7. Поверхности отклика степени упрочнения цилиндрической поверхности при маятниковом ППД в зависимости от:  $t$  и  $s$  (а);  $t$  и  $n_3$  (б);  $n_{ин}$  и  $n_3$  (в);  $\alpha$  и  $s$  (г)

Fig. 7. Response surfaces of hardening degree of cylindrical surface under pendulum SPD depending on:  $t$  and  $s$  (а);  $t$  and  $n_b$  (б);  $n_i$  and  $n_b$  (в);  $\alpha$  and  $s$  (г)

торможения дислокаций возможен при измельчении зеренной структуры металла. Скопление дислокаций по границам зерен вызывает торможение их движения, что приводит к упрочнению металла [21 – 23]. Оценить возможности нового способа ППД с точки зрения увеличения механических свойств поверхностного слоя можно по степени изменения геометрических размеров зеренной структуры и плотности дислокаций, которая

непосредственно связана с размерами межзеренных границ. Результаты исследования микроструктуры как в осевой, так и в поверхностной зоне цилиндрической заготовки представлены в табл. 5. Микроструктура поверхностного слоя деталей из стали 45 состоит из перлита (темные) и феррита (светлые).

В осевой зоне цилиндра размеры зерен, не подвергающиеся пластической деформации, незначи-

Таблица 4

Параметры и режимы маятникового ППД, обеспечивающие повышение механических свойств поверхностного слоя

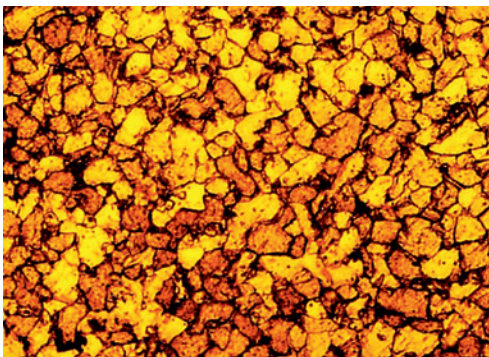
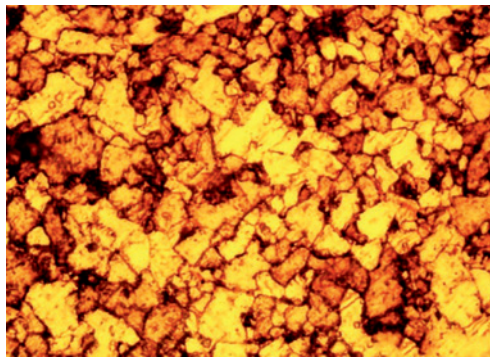
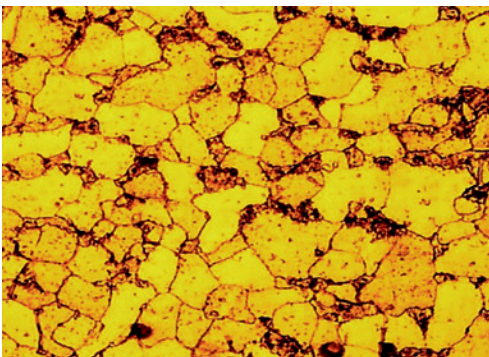
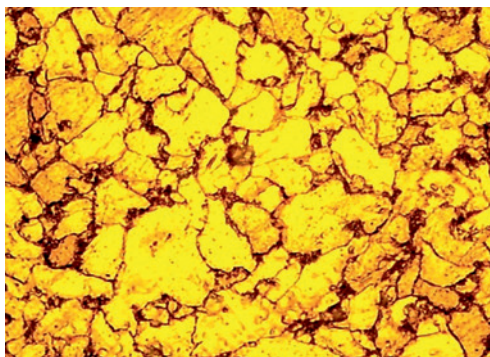
Table 4. Parameters and modes of pendulum SPD providing an increase in physical and mechanical properties of the surface layer

| Характеристики слоя | Режимы обработки |             |                 |                     |                | Параметры оптимизации |          |
|---------------------|------------------|-------------|-----------------|---------------------|----------------|-----------------------|----------|
|                     | $t$ , мм         | $s$ , мм/об | $\alpha$ , град | $n_{ин}$ , дв.х/мин | $n_3$ , об/мин | $h$ , мм              | $CH$ , % |
| $h$ , мм            | 0,15 – 0,20      | 0,07 – 0,11 | 35 – 40         | 120 – 130           | 160 – 200      | 1,0 – 1,1             | 50 – 60  |
| $CH$ , %            | 0,15 – 0,20      | 0,07 – 0,11 | 35 – 40         | 110 – 130           | 180 – 200      | 1,0 – 1,1             | 61 – 65  |



Микроструктура упрочненного слоя (сталь 45) после маятникового ППД

Table 5. Microstructure of the hardened layer (steel 45) after pendulum SPD

| Тип сечения        | Микроструктура упрочненного образца из стали 45 (×500)                             |                                                                                     |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | Поперечное сечение                                                                 | Продольное сечение                                                                  |
| Поверхностная зона |   |   |
| Осевая зона        |  |  |

тельно отличаются между собой и равны примерно 50 – 70 мкм. При этом они практически одинаковы как в радиальном, так и в осевом сечении. В поверхностной зоне структура зерен, которые непосредственно подвергаются измельчению и дроблению в результате механического упрочнения, более мелкозернистая. Микроструктура в данной зоне характерна не только преобладанием сжатых зерен в радиальном направлении (направлении главной деформации) и вытянутых в осевом направлении (направлении пластического течения), но и повышенной концентрацией зерен перлита, о чем можно судить по увеличению микротвердости наклепанного слоя, а также увидеть визуально (табл. 5). Средние размеры зерен в поперечном сечении: для феррита 25 мкм; для перлита 30 мкм. В осевом направлении: для феррита 35 мкм; для перлита 40 мкм.

Таким образом, после маятникового ППД размеры зерен в упрочненных слоях уменьшаются на 30 – 40 %. Кроме того, значительное увеличение концентрации измельченных твердых зерен перлита обеспечивает повышение микротвердости в поверхностном слое упрочненных деталей.

В теоретических исследованиях [21; 22] отмечено, что механизм изменения степени упрочнения поверхностного слоя деталей может быть рассмотрен с точки

зрения теории дислокаций. Согласно этой теории, упрочнение металла происходит за счет формирования такого структурного состояния материала, при котором создаются более плотные дислокационные субструктуры с увеличением сопротивления сдвига кристаллических решеток. Исследованием [22] подтверждено, что образование малоугловых границ с увеличением плотности дислокационной сетки затрудняет скольжение между зернами и в результате приводит к упрочнению материала. Это означает, что чем выше плотность дислокаций, тем прочнее металл. В работе [23] предложена формула для расчета плотности дислокаций:

$$\rho = \left( \frac{0,27(HV_2 - HV_1)}{amGb} \right)^2 + \rho_0, \quad (4)$$

где  $HV_1$  – исходная микротвердость поверхности обрабатываемого материала;  $HV_2$  – микротвердость поверхности после обработки ППД;  $\rho_0 = 10^8 \text{ см}^{-2}$  – исходная плотность дислокаций для углеродистых сталей. Приняты следующие значения [22; 23]: для ферритной стали параметр междислокационного взаимодействия  $\alpha = 0,32$ ; рассчитанные Г. Тейлором значения ориентационного множителя для различного типа кристаллических решеток поликристаллов составляют: для метал-

лов объемно-центрированных кубических решеток  $m = 2,75$ ; для стали 45 модуль сдвига  $G = 78\,000$  МПа; значение вектора Бюргера дислокации  $b = 3 \cdot 10^{-8}$  см.

С учетом вышеприведенных данных рассчитана плотность дислокаций на глубине 50 мкм от поверхности образца, упроченного маятниковым ППД в условиях базовых режимов обработки, которая составляет  $2,28 \cdot 10^8$  см $^{-2}$ .

Таким образом плотность дислокаций после маятникового ППД повышается в 2,2 – 2,5 раза. Результаты расчетов плотности дислокаций сопоставлены с исследованиями [11; 12], в которых отмечено, что плотность дислокаций при ППД роликом в стесненном условии увеличивается в 1,26 раз, а при обкатывании двухрадиусным роликом – в 2,5 раза.

В заключение следует отметить, что разработанный способ маятникового ППД, в отличие от известных способов поверхностного деформирования, сочетает в себе два процесса – поочередное качение и скольжение рабочего инструмента. Такое сочетание рабочих движений обеспечивает не только эффективное сглаживание микронеровностей поверхности, но и повышение механических свойств поверхностного слоя деталей машин.

## Выводы

Разработан новый способ ППД и технологическое оснащение для его реализации, позволяющие повысить твердость поверхностного слоя на 9 – 12 % по сравнению с твердостью исходного металла.

Маятниковое ППД обеспечивает повышение микротвердости в 1,5 – 1,7 раза, что приводит к значительному упрочнению поверхностного слоя. При этом глубина упроченного слоя составляет 0,9 – 1,1 мм, а степень упрочнения – 45 – 65 %.

Определены оптимальные режимы упрочнения, обеспечивающие максимальную глубину упроченного слоя и наибольшую степень упрочнения поверхностного слоя ( $n_3 = 160 \div 200$  мин $^{-1}$ ;  $n_{\text{ин}} = 110 \div 130$  дв.ход/мин;  $t = 0,15 \div 0,2$  мм;  $s = 0,07 \div 0,11$  мм/об;  $\alpha = 35 \div 40^\circ$ ).

Представлены результаты экспериментальных исследований и численных расчетов, объясняющих причину повышения механических свойств поверхностного слоя при маятниковом ППД. Установлено, что средний размер зерна при маятниковом ППД уменьшается на 30 – 40 % по сравнению с исходным размером, а плотность дислокаций возрастает в 2,5 раза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Laouar L., Hamadache H., Saad S., Bouchelaghem A., Mekhilef S. Mechanical surface treatment of steel – Optimization parameters of regime. *Physics Procedia*. 2009;2(3): 1213–1221. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2009.11.084>
- Горбунов А.В., Горбунов В.Ф. Обоснование глубины упрочнения нежестких валов при поверхностной пластической деформации центробежным обкатником. *Вестник ИргТУ*. 2012;9(68):29–33.
- Gorbunov A.V., Gorbunov V.F. Rationale for non-rigid shaft hardening depth under surface plastic deformation by centrifugal roller. *Vestnik IrGTU*. 2012;9(68):29–33. (In Russ.).
- Zhang Z. Theoretical prediction of cross-sectional deformation of circular thin-walled tube in large elastic–plastic deformation stage under lateral compression. *Thin-Walled Structures*. 2022;180:109957. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109957>
- Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser surface melting and texturing of Ti-6Al-4V ELI alloy on surface properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2): 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057>
- Li Y.B., Zhang Q.X., Qi L., David S.A. Improving austenitic stainless steel resistance spot weld quality using external magnetic field. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018;23(7):619–627. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1443997>
- DiGiovanni C., Biro E., Zhou N.Y. Impact of liquid metal embrittlement cracks on resistance spot weld static strength. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2019;24(3):218–224. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1518363>
- Grzesik W., Rech J., Żak K. High-precision finishing hard steel surfaces using cutting, abrasive and burnishing operations. *Procedia Manufacturing*. 2015;1:619–627. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.048>
- Chen X.S., Li Q., Fei S.M. Constrained model predictive control in ball mill grinding process. *Powder Technology*. 2008;186(1):31–39. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.10.026>
- Roux J.D.L., Craig I.K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC-Papers OnLine*. 2017;50(1):1169–1174. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.403>
- Митрофанова К.С. Исследование качества поверхностного слоя стали 45 после поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом. *Сборник трудов конференции «Инновации в машиностроении»*. 2019:639–787.
- Зайдес С.А. *Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования*. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ; 2021:504.
- Кьюнг Н.К. *Повышение качества маложестких валов поверхностным пластическим деформированием в стесненных условиях: Дис. ...канд. техн. наук*. Иркутск, 2018:149.
- Yaman N., Sunay N., Kaya M., Kaynak Y. Enhancing surface integrity of additively manufactured Inconel 718 by roller burnishing process. *Procedia CIRP*. 2022;108:681–686. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.106>
- Frihat M.H., Al Quran F.M.F., Al-Odat M.Q. Experimental investigation of the influence of burnishing parameters on surface roughness and hardness of brass alloy. *Material Science & Engineering*. 2015;5(1):1–4. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000216>
- Ежелев А.В., Бобровский И.Н., Лукьянов А.А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием. *Фундаментальные исследования*. 2012;(6–3): 642–646.

- Ezhelev A.V., Bobrovskii I.N., Luk'yanov A.A. Analysis of processing ways by superficial and plastic deformation. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2012;(6–3):642–646. (In Russ.).
16. Kotenok V.I., Podobedov S.I. Energy-efficient design of rolls for ball-rolling mills. *Metallurgist*. 2001;45(9–10): 363–367.
  17. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018;63(1):5–12. <https://doi.org/10.24425/118901>
  18. Chumachenko E.N., Aksenov S.A., Logashina I.V. Mathematical modeling and energy conservation for rolling in passes. *Metallurgist*. 2010;(8):498–503.
  19. Пат. 2757643 RU. Способ поверхностно-пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения / Зайдес С.А., Хо Минь Куан; заявл. 04.02.2021; опубл. 19.10.2021.
  20. Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(5):344–353. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353>  
Zaides S.A., Kho Min' Kuan. Pendulum surface plastic deformation of cylindrical blanks. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(5):344–353. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353>
  21. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. *Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий*. Москва: Машиностроение; 2003:384.
  22. Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. *Свойства сплавов в экстремальном состоянии*. Москва: Машиностроение; 2004:256.
  23. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин*. Москва: Машиностроение; 1988:146–149.

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Семен Азикович Зайдес**, д.т.н., профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет

**E-mail:** [zsa@istu.edu](mailto:zsa@istu.edu)

**Хо Минь Куан**, аспирант кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет

**ORCID:** 0000-0002-0488-0290

**E-mail:** [minhquanho2605@gmail.com](mailto:minhquanho2605@gmail.com)

**Semen A. Zaides**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University

**E-mail:** [zsa@istu.edu](mailto:zsa@istu.edu)

**Ho Minh Quan**, Postgraduate of the Chair of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University

**ORCID:** 0000-0002-0488-0290

**E-mail:** [minhquanho2605@gmail.com](mailto:minhquanho2605@gmail.com)

Поступила в редакцию 27.01.2023

После доработки 21.03.2023

Принята к публикации 11.04.2023

Received 27.01.2023

Revised 21.03.2023

Accepted 11.04.2023