

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №4 (142). С.37-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №4 (142). P. 37-48.

Научная статья  
УДК 621.787.4  
doi

## Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на параметры волнистости цилиндрических деталей

Семен Азикович Зайдес<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Хью Хай Нгуен<sup>2</sup>, аспирант.

<sup>1,2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия  
<sup>1</sup> zsa@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>  
<sup>2</sup> nquan6799@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7909-385X>

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на параметры волнистости поверхности цилиндрических деталей из стали 45. Для реализации предлагаемого способа отделочно-упрочняющей обработки разработано устройство для образования реверсивного кругового движения рабочего инструмента. По результатам экспериментальных исследований и с помощью компьютерной программы PyCharm с языком программирования Python, были определены оптимальные режимы упрочнения, обеспечивающие наименьшую высоту волнистости.

**Ключевые слова:** реверсивное поверхностное пластическое деформирование, параметры волнистости, двухрадиусный ролик, амплитуда угла реверсивного вращения, реверсивная частота вращения

**Для цитирования:** Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на параметры волнистости цилиндрических деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 4 (142). С. 37–48. doi:

## Influence of reversible surface plastic deformation parameters on the parameters of the surface waviness of cylindrical parts

Semen A. Zaides<sup>1</sup>, D. Eng.,  
Huu H. Nguyen<sup>2</sup>, PhD student.

<sup>1,2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia  
<sup>1</sup> zsa@istu.edu  
<sup>2</sup> nquan6799@gmail.com

**Abstract.** The results of experimental studies to determine the influence of the parameters of reversible surface plastic deformation on the parameters of the surface waviness of cylindrical parts made of steel 45, are presented. The proposed method implementation for finishing and hardening treatment requires the development of a device for the formation of a reversing circular motion of the working tool. On completion of experimental studies using the PyCharm computer program and Python programming language, optimal modes of simplification were determined, providing the lowest waviness height.

**Keywords:** reversible surface plastic deformation, waviness parameters, two-radius rolling element, amplitude in reversing rotation angle, reversing angular velocity

*For citation:* Zaides S.A., Nguyen H.H. Influence of reversible surface plastic deformation parameters on the parameters of the surface waviness of cylindrical parts / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023. № 4 (142). P. 37–48. doi:

## Введение

Работоспособность деталей машин во многом зависит от качества поверхностного слоя. Качество поверхности — это показатель, который объединяет ряд важных свойств поверхностного слоя, такие как форма поверхностного слоя (волнистость, шероховатость, округлость), состояние и физико-механические свойства поверхностного слоя, а также взаимодействие поверхностного слоя с рабочей среды (износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость). Важным критерием качества является волнистость поверхностного слоя, которая оказывает значительное влияние на ресурс подвижных и надежность неподвижных соединений [1 – 3].

Волнистость поверхности деталей машин, возникающая при изготовлении, а также в процессе работы машины под влиянием силовых и температурных деформаций и вибрации, уменьшает контактную жесткость стыковых поверхностей деталей и изменяет установленный при сборке начальный характер посадок. Волнистость возникает при обработке на низких скоростях резания; частота их близка к частоте собственных колебаний заготовки или узлов станка. Волнистость поверхности отрицательно влияет на эксплуатационные свойства деталей: увеличивается скорость изнашивания и снижается долговечность трущихся поверхностей; уменьшается площадь контакта сопряженных поверхностей и контактная жесткость; снижается герметичность соединения; снижается КПД передачи из-за увеличения силы трения; ослабляется натяг в соединениях а, следовательно, их прочность и ухудшается внешний вид изделий [4 – 6].

Для повышения качества поверхностного слоя ответственных деталей машин на практике достаточно широко применяют отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД). Благодаря тонкой пластической деформации поверхностного слоя удается не только

эффективно сгладить микронеровности, но и сформировать сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое и упрочнить металл [7 – 9].

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете ведутся работы по созданию новых способов ППД [10 – 12]. Одним из них является процесс, основанный на реверсивном ППД [13]. Особенность данного способа заключается в новой кинематике рабочего инструмента, реализующей реверсивное круговое движение тороидального ролика. С использованием конечно-элементного моделирования и численных расчетов в работах [10, 14, 15] было установлено эффективность данного способа для интенсификации напряженного состояния в очаге деформации и формирования остаточных сжимающих напряжений в поверхностных слоях деталей машин.

Цель данной работы заключается в экспериментальном определении влияния параметров и режимов реверсивного ППД на геометрические параметры волнистости поверхностного слоя цилиндрических деталей из среднеуглеродистой стали Ст 45.

## Способ реверсивного поверхностного пластического деформирования

Схема реверсивного ППД цилиндрической заготовки представлена на рис. 1, где показана также и кинематика деформирующего инструмента.

Особенность данного способа заключается в том, что деформирующий элемент выполнен в виде двухрадиусного ролика, вершины которого располагаются относительно друг друга на некотором расстоянии  $l$ , при этом ось вращения деформирующего элемента расположена параллельно оси заготовки, а рабочему инструменту (РИ) сообщают реверсивное вращение относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющую два ролика деформирующего элемента и перпендикулярную оси заготовки, с круговой амплитудой угла  $\alpha_p$  (рис. 1).

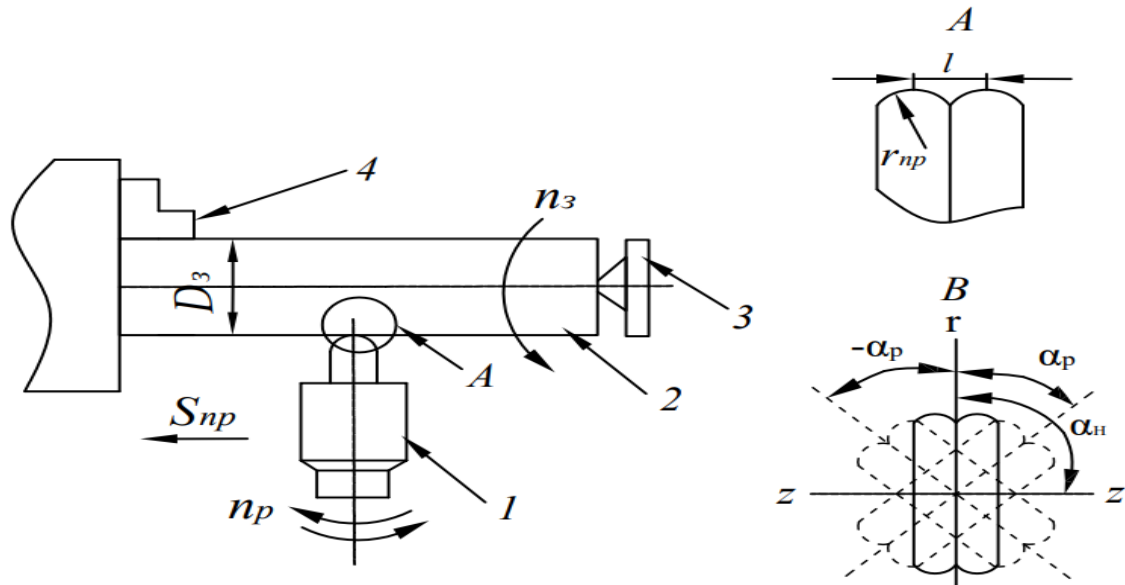


Рис. 1. Схема реверсивного поверхностного пластического деформирования двухрадиусным роликом: 1 – рабочий инструмент; 2 – заготовка; 3 – задняя бабка; 4 – трехкулачковый патрон; А – вид вершин двухрадиусного ролика; В – схема реверсивного вращения двухрадиусного ролика

Как видно из схемы обработки (см. рис. 1) параметрами режима, определяющими кинематику процесса, являются: частота вращения заготовки  $n_3$ ; продольная подача РИ  $S_{np}$ ; реверсивная частота вращения РИ  $n_p$ ; амплитуда угла реверсивного вращения РИ  $\alpha_p$ . Заготовку 2 устанавливают на токарно-винторезном станке, закрепляют в трехкулачковом патроне 4 и поджимают вращающимся центром задней бабки 3. Заготовке придают вращательное движение с частотой  $n_3$  (об/мин). Рабочему инструменту 1 одновременно сообщают продольную подачу  $S_{np}$  и реверсивное вращение  $n_p$  вокруг своей оси.

#### Методика и техника выполнения эксперимента

Для определения параметров волнистости цилиндрических деталей после реверсивного ППД использовали образцы из

среднеуглеродистой стали 45 диаметром 28 мм (рис. 2). Опытные образцы разделены поперечными канавками на шесть одинаковых участков по длине и диаметру, которые упрочняются с использованием разных технологических параметров и режимов обработки. На каждом образце испытывался один параметр ППД с пятью разными режимами упрочнения, что позволяло построить соответствующие графики. Один из шести участков не обрабатывался, и он служил для определения исходной волнистости поверхности перед ППД.

Для исключения биения обрабатываемой поверхности образец закрепляли в трехкулачковом патроне токарного станка и поджимали задним центром. После этого цилиндрическую поверхность образца диаметром 30 мм протачивали резцом до диаметра 28 мм ( $S_{np} = 0,2$  мм/об;  $n_3 = 600$  об/мин;  $t = 0,2$  мм), а затем упрочняли реверсивным ППД

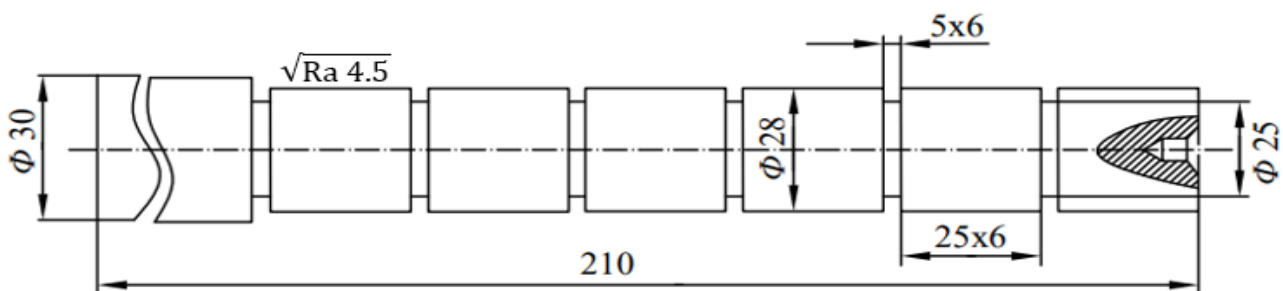
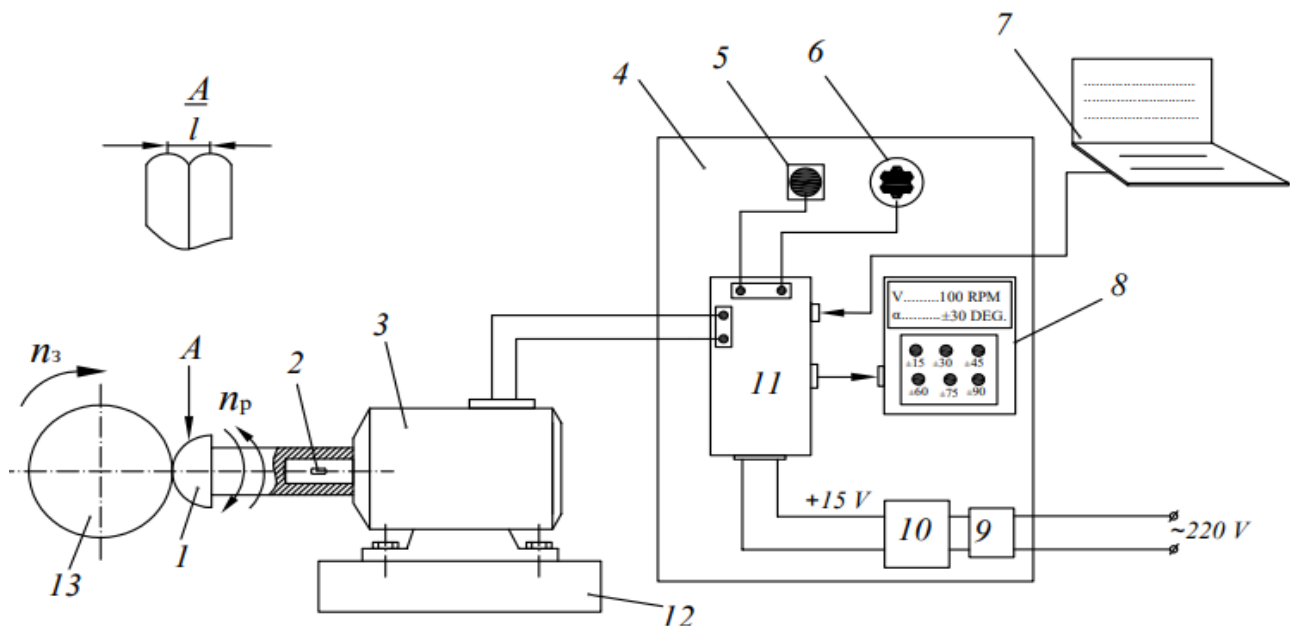


Рис. 2. Образец для экспериментального определения параметров волнистости поверхности после реверсивного ППД

**Устройство для реверсивного ППД.** Для реализации предлагаемого способа отделочно-упрочняющей обработки авторами статьи разработано устройство для образования реверсивного кругового движения рабочего инструмента (рис. 3). Устройство содержит рабочий инструмент 1 выполненный в виде двухрадиусного ролика с реверсивной частотой вращения  $n_p$  по заданной круговой амплитуде, шпонку 2, с помощью которой на валу шагового электродвигателя 3 закреплен рабочий инструмент 1, шаговый электродвигатель 3 смонтирован на основании 12, блок управления 4 расположен в электрическом шкафу, в котором находятся кнопка запуска 5, регулятор частоты реверса 6, программируемый контроллер (PLC) 11, экран режимов обработки 8, автоматический выключатель 9 и трансформатор 10. Параметры шагового электродвигателя задаются по управляющей программе при помощи персонального компьютера 7 через блок управления 4.

Устройство работает следующим образом: управляющая программа для шагового

электродвигателя 3, запрограммированная на персональном компьютере 7, загружается в программируемый контроллер (PLC) 11. Запускают систему нажатием кнопки запуска 5, выбирают режим обработки, используя регулятор частоты реверса 6 и кнопки величины угла реверса рабочего инструмента. Информация о параметрах рабочего инструмента отражается на экране режимов обработки 8. Программируемый контроллер (PLC) 11 преобразует команды управляющей программы в управляющие импульсы, подаваемые на обмотки шагового электродвигателя 3. При этом рабочий инструмент вращается по заданной управляющей программой движением – реверсивное вращение по амплитуде  $\pm \alpha$  с частотой реверса  $n_p$ . Трансформатор 10, используется для преобразования напряжения переменного тока 220 V в напряжение постоянного тока 15 V, необходимое для программируемого контроллера 11, а автоматический выключатель 9, служит для защиты электрических цепей от перегрузки или короткого замыкания.



**Рис. 3. Принципиальная схема устройства для реверсивного поверхностного пластического деформирования двухрадиусным роликом:**

1 – рабочий инструмент; 2 – шпонка; 3 – шаговый электродвигатель; 4 – блок управления; 5 – кнопка запуска; 6 – регулятор скорости реверса; 7 – персональный компьютер; 8 – экран режимов обработки; 9 – автоматический выключатель; 10 – трансформатор; 11 – программируемый контроллер; 12 – основание, 13 – заготовка

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

части суппорта устанавливается устройство для создания реверсивного кругового

движения двухрадиусного ролика (рис. 4). Геометрические характеристики рабочего инструмента: диаметр рабочего ролика  $D_p = 30$  мм; профильный радиус  $r_{пр} = 2.5$  мм; расстояние между вершинами рабочего ролика  $l = 1,5$  мм; материал – быстрорежущая сталь SKD-11. В качестве технологической смазки использовано индустриальное масло И-40А, которое широко применяется при обработке деталей ППД.

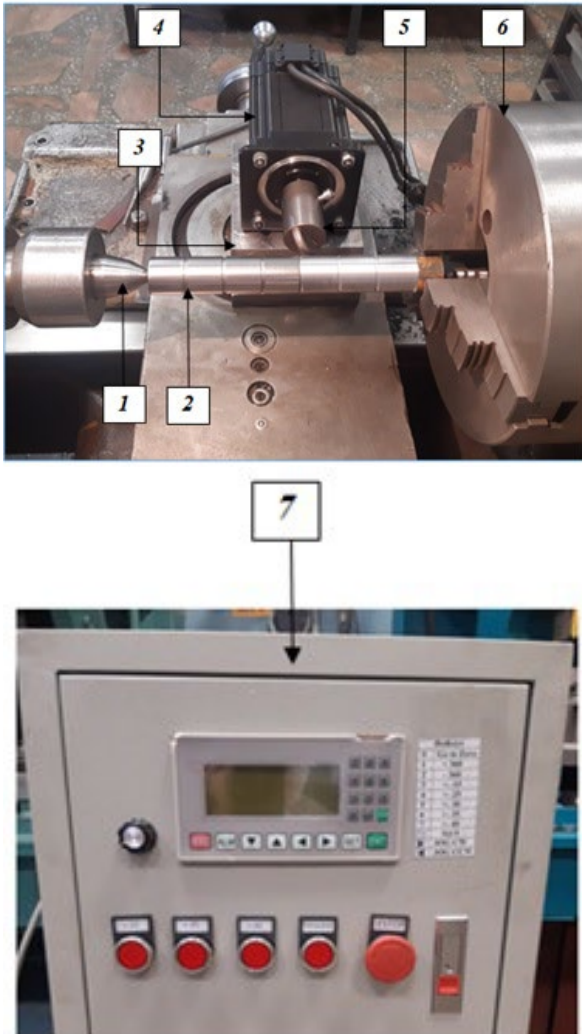


Рис. 4. Общий вид устройства для реверсивного поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей цилиндрических деталей на токарном станке:

1 – задний центр; 2 – обрабатываемый образец; 3 – основание; 4 – шаговый электродвигатель; 5 – рабочий инструмент; 6 – трехкулачковый патрон; 7 – панель управления параметрами движения рабочего инструмента

#### Методика измерения волнистости.

Измерение параметров волнистости цилиндрической поверхности опытных образцов, подвергающихся маятниковому ППД, проводили с помощью профилометра

Form Talysurf i200 производства компании Taylor Hobson (рис. 5). Для измерения волнистости цилиндрический образец 1 устанавливался в V-образную призму, закрепленную на подложке. Измерительная головка 5 перемещается в соответствии сигналом ручного управления по поверхности образца 1 для осуществления измерения. Результаты каждого замера представляются на экране компьютера в виде профилограмм с высотными и шаговыми характеристиками микропрофиля.

Для обеспечения корректности измерения параметры волнистости каждого участка определили в трех зонах через  $120^\circ$  по окружности. Исходя из результатов средних значений по трем замерам определили зависимость волнистости упрочненных поверхностей от каждого технологического параметра реверсивного ППД, которая отражается в графиках, представленных далее.

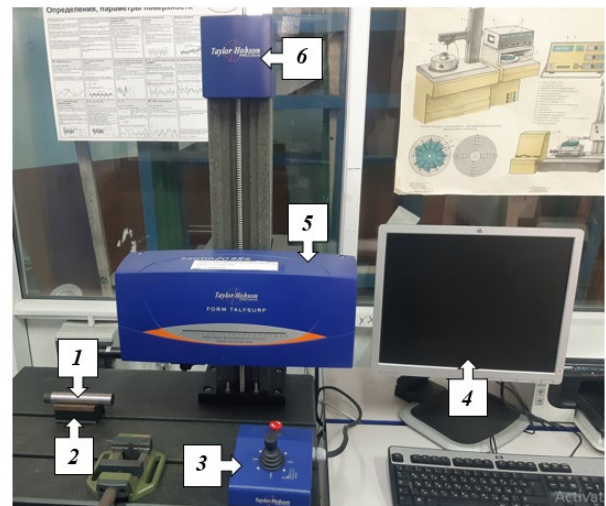


Рис. 5. Измерительный комплекс для определения волнистости поверхности на профилометре Form Talysurf i200 производства компании Taylor Hobson: 1 – опытный образец; 2 – V-образная призма с подложкой; 3 – ручное управление измерительной головкой; 4 – персональный компьютер; 5 – измерительная головка; 6 – направляющая по вертикали

В отличие от шероховатости поверхности для параметров волнистости характерны микронеровности со значительно большим шагом по сравнению с высотой. Волнистость занимает промежуточную границу между шероховатостью и погрешностью формы, которую можно установить по следующему отношению шага  $S_w$  к высоте неровностей  $W_z$ : отклонения, у которых отношение  $S_w/W_z < 50$ , относят к шероховатости; при  $50 \leq S_w/W_z \leq 1000$  – к



волнистости; при  $S_w/W_z > 1000$  – к отклонениям формы. Для оценки волнистости поверхности используют параметры  $W_z$  и  $S_w$ , которые являются базовыми характеристиками волны и отражают вполне достаточную информацию о волнистости исследуемой поверхности.

**Результаты экспериментальных исследований**

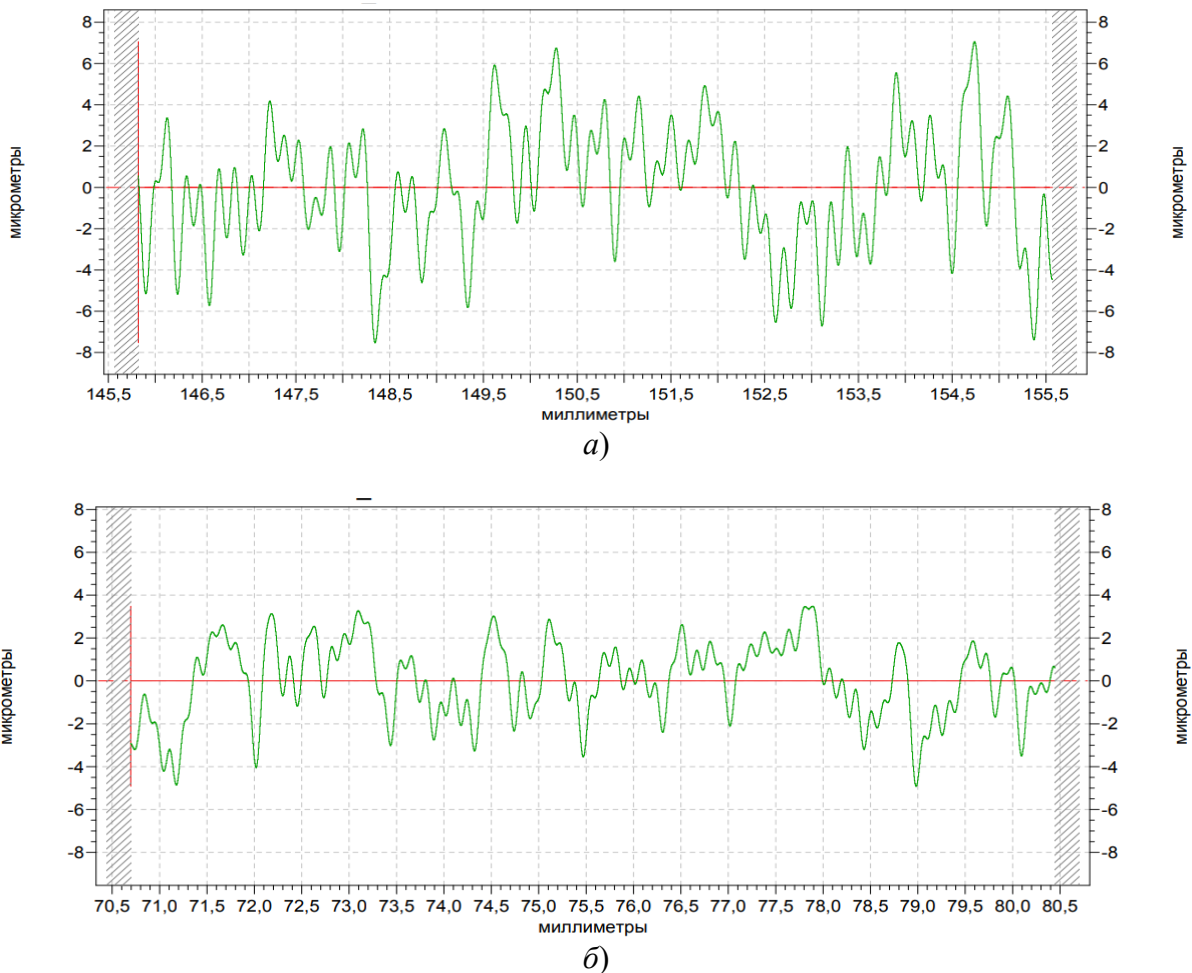
Базовые режимы обработки, которые были установлены в результате предварительного упрочнения реверсивным ППД, представлены в табл. 1.

**1. Базовые режимы реверсивного ППД**

$S_{пр}$ , мм/об	$n_z$ , об/мин	$t$ , мм	$\alpha_n$ , °	$\alpha_p$ , °	$n_p$ , дв.ход./мин
0,075	100	0,075	90	± 15	120

Опытные образцы после механической обработки резанием имеют поверхность с исходной волнистостью:  $W_z = 15,1...15,5$  мкм;

$S_w = 1400...1500$  мкм. Профилограммы волнистости поверхностей до и после маятникового ППД показаны на рис. 6.



**Рис. 6. Профилограммы исходной (а) и упрочненной (б) поверхностей при реверсивном ППД (при базовых режимах обработки)**

Из рис. 6 видно, что способ реверсивного ППД значительно снижает волнистость поверхности цилиндрических деталей, при этом высота  $W_z$  и шаг  $S_w$  неровности поверхности после упрочнения реверсивным ППД в

условиях базовых режимах обработки уменьшаются на 64 % и 47 %, соответственно.

Рассмотрим степень влияния каждого технологического параметра реверсивного

ППД на параметры волнистости поверхности цилиндрических заготовок.

**Влияние продольной подачи и частоты вращения заготовки.** Зависимость

параметров волнистости от величины продольной подачи и частоты вращения заготовки после реверсивного ППД представлена на рис. 7

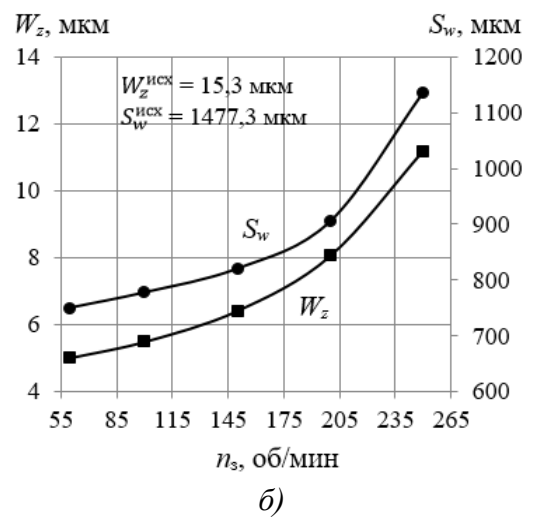
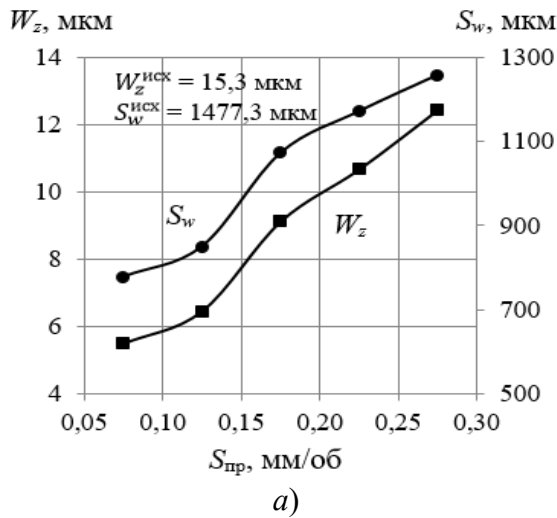


Рис. 7. Влияние продольной подачи (а) и частоты вращения заготовки (б) на параметры волнистости после реверсивного ППД

Анализ экспериментальных результатов на рис. 7 показал, что чем меньше величина продольной подачи и частота вращения заготовки, тем ниже параметры волнистости. Установлено, что уменьшение продольной подачи рабочего инструмента от 0,275 до 0,075 мм/об и частоты вращения заготовки от 250 до

60 об/мин приводит к снижению значения параметров волнистости почти в 1,5 – 2,3 раза.

**Влияние величины радиального натяга и начального угла установки рабочего инструмента.** Влияние величины радиального натяга и начального угла установки РИ на параметры волнистости после реверсивного ППД представлено на рис. 8.

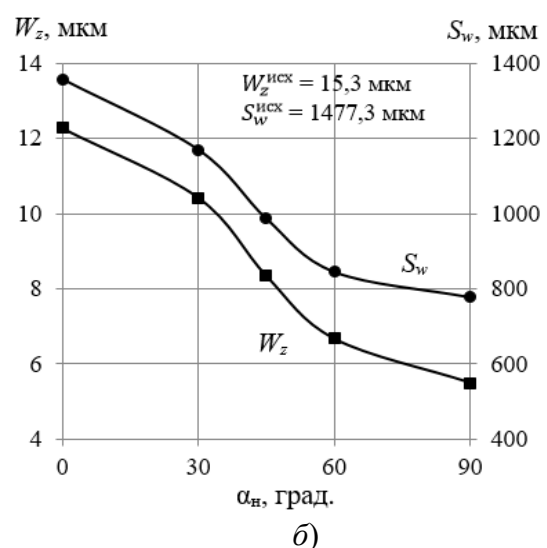
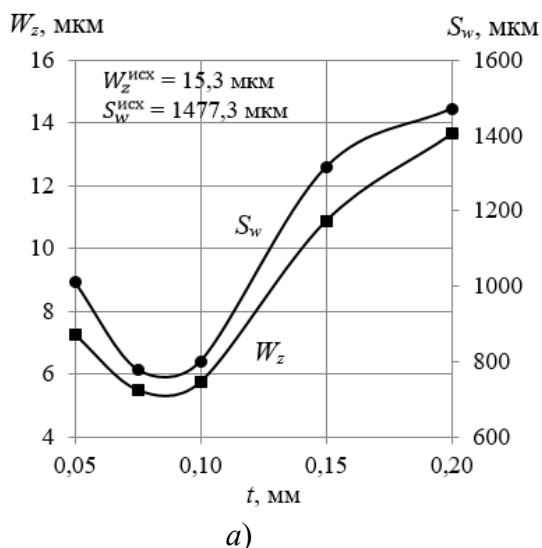


Рис. 8. Зависимость параметров волнистости от величины радиального натяга (а) и начального угла установки рабочего инструмента (б) после реверсивного ППД

Наименьшее значение параметров волнистости после реверсивного ППД обеспечивается при величине радиального натяга  $t = 0,075 \dots 0,10$  мм, при этом значение  $W_z$  и  $S_w$

снижаются в 2,6...2,8 раза и 1,8...1,9, соответственно, по сравнению с исходным микропрофилем, что видно из рис. 8, а. При малой величине радиального натяга ( $t = 0,05$  мм)

происходит незначительное изменение формы профиля из-за неполного деформирования микронеровностей, а при  $t > 0,1$  мм значения параметров волнистости резко возрастают. Большая величина радиального натяга приводит к увеличению вибраций в процессе ППД, которая увеличивает параметры волнистости. Следует отметить, что наименьшие значения параметров волнистости после реверсивного ППД достигаются при начальном угле установки РИ  $\alpha_n = 90^\circ$  (см. рис. 8, б), а наибольшие

при  $\alpha_n = 0^\circ$ . При изменении начального угла установки РИ от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  значения параметров волнистости  $W_z$  и  $S_w$  уменьшаются в 2,2 и 1,7 раза, соответственно.

**Влияние амплитуды угла и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента.** Графики, показывающие зависимость величины  $W_z$  и  $S_w$  от амплитуды угла и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента после ППД представлены на рис. 9.

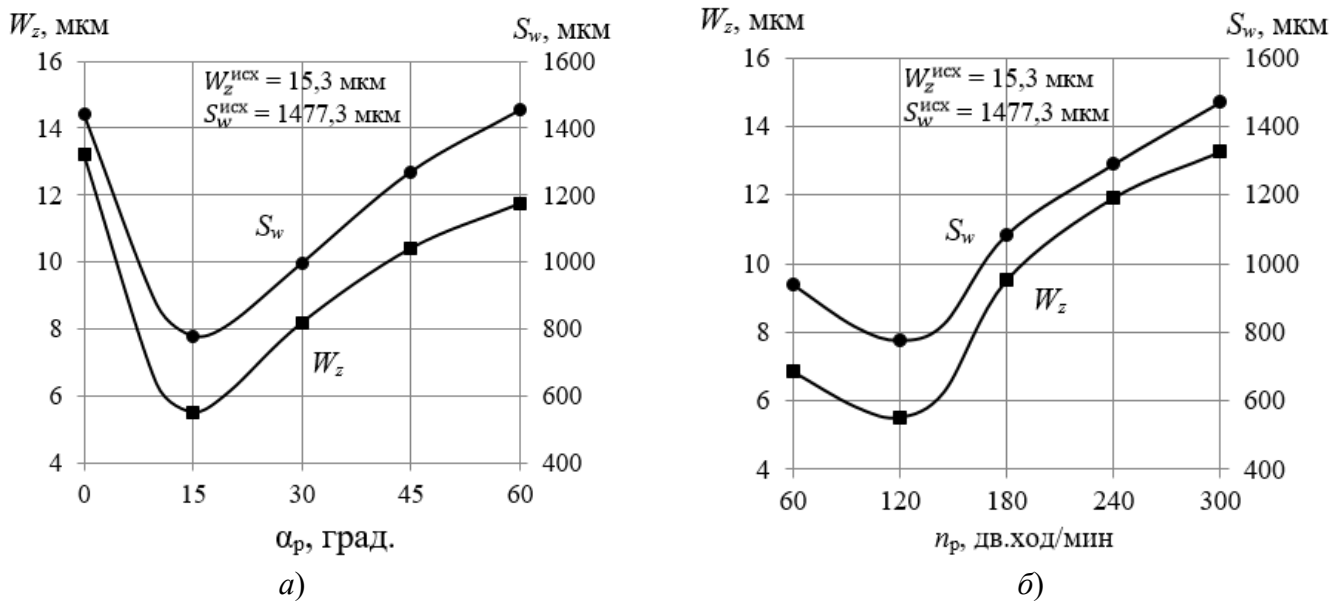


Рис. 9. Влияние амплитуды угла и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента на параметры волнистости после ППД

Наименьшие значения параметров волнистости после реверсивного ППД достигаются при  $\alpha_p = \pm 15^\circ$  и  $n_p = 120$  дв.ход./мин, что видно их рис. 9. При таких значениях параметров процесс деформирования происходит плавно, с полным сглаживанием микронеровностей обрабатываемой поверхности, вследствие чего образуется новый профиль поверхности с меньшей волнистостью.

Экспериментальные исследования показали, что не все параметры реверсивного ППД имеют оптимальные режимы, при которых высота волнистости достигает минимального значения. Некоторые параметры монотонно влияют на снижение или повышение высоты волнистости. Для поиска оптимальных режимов реверсивного ППД, обеспечивающих получение наименьшей высоты волнистости, использовали компьютерную программу

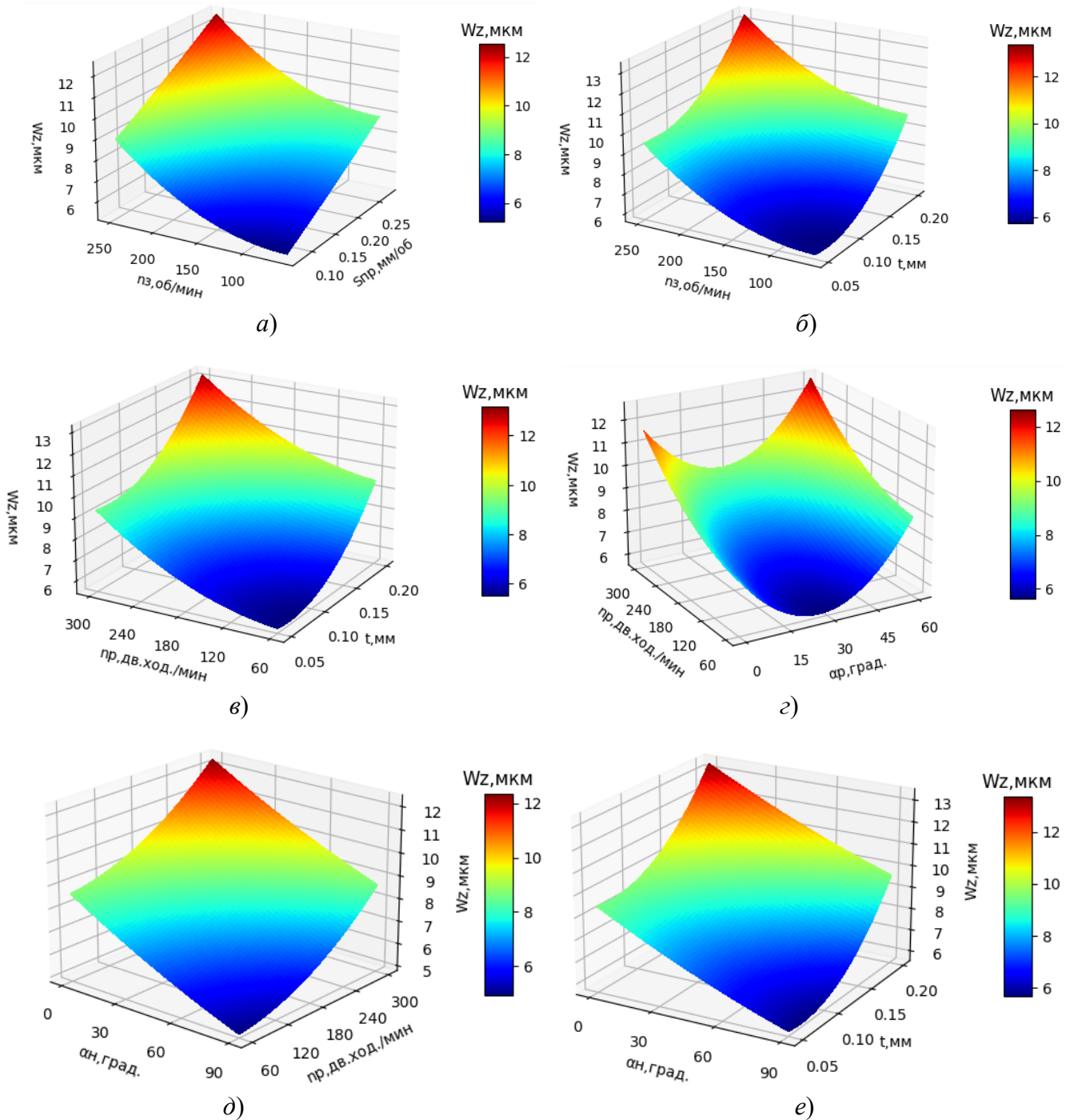
PyCharm с языком программирования Python [16 – 18]. Для определения наименьшей высоты волнистости использовали однофакторные уравнения (1), полученные при описании экспериментальных кривых (см. рис. 7, 8, 9) для обработки в программе PyCharm. При этом высота волнистости является параметром оптимизации, который можно представить в виде функции  $W_z = f(S_{np}, n_3, t, n_p, \alpha_p, \alpha_n) = \text{const}$ .

$$W_z = \begin{cases} 14S_{np}^2 + 31,24S_{np} + 2,8730 \\ 0,0002n_3^2 - 0,0234n_3 + 5,8977 \\ 449,34t^2 - 60,541t + 8,3266 \\ 0,0001n_p^2 - 0,0052n_p + 5,7421 \\ 0,0061\alpha_p^2 - 0,3315\alpha_p + 11,007 \\ 0,0002\alpha_n^2 - 0,1003\alpha_n + 12,5 \end{cases} \quad (1)$$



Результаты статистической обработки по определению оптимальных режимов упрочнения, обеспечивающих наименьшую высоту

волнистости после реверсивного ППД представлены на рис. 10.



**Рис. 10. Поверхности отклика высоты волнистости цилиндрической поверхности после реверсивного ППД в зависимости от:**

*a* – продольной подачи и частоты вращения заготовки; *б* – частоты вращения заготовки и величины радиального натяга; *в* – величины радиального натяга и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента; *г* – реверсивной частоты вращения и амплитуды угла реверсивного вращения рабочего инструмента; *д* – реверсивной частоты вращения и начального угла установки рабочего инструмента; *е* – величины радиального натяга и начального угла установки рабочего инструмента

В результате статистической обработки установлено, что минимальная высота

волнистости (около 5,5 мкм) достигается при следующих значениях технологических

параметров ППД: продольная подача  $0,075 \div 0,1$  мм/об; частота вращения заготовки  $60 \div 100$  об/мин; величина радиального натяга  $0,075 \div 0,1$  мм; реверсивная частота вращения РИ  $100 \div 120$  дв.ход./мин; начальный угол установки РИ  $90^\circ$  и величина угла реверсивного вращения РИ  $\pm 10^\circ \div \pm 20^\circ$ .

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований были установлены закономерности изменения параметров волнистости в зависимости от технологических параметров реверсивного ППД. Результаты исследования позволяют оценить эффективность предлагаемого способа упрочнения с точки зрения обеспечения качества поверхности цилиндрических деталей. Выбор оптимальных технологических режимов обработки позволяет достичь наименьшую высоту волнистости поверхности деталей при реверсивном ППД.

### Выводы

1. Для реализации реверсивного поверхностного пластического деформирования спроектировано и изготовлено устройство, использующее шаговый электродвигатель, движение которого программируется на персональном компьютере.

2. На основе экспериментальных исследований установлено влияние параметров и режимов реверсивного поверхностного пластического деформирования на параметры волнистости цилиндрических деталей типа валов и осей.

3. Для обеспечения минимальной высоты волнистости поверхности упрочненных деталей определены оптимальные режимы упрочнения: продольная подача  $0,075 \div 0,1$  мм/об; частота вращения заготовки  $60 \div 100$  об/мин; величина радиального натяга  $0,075 \div 0,1$  мм; реверсивная частота вращения РИ  $100 \div 120$  дв.ход./мин; начальный угол установки РИ  $90^\circ$  и величина угла реверсивного вращения РИ  $\pm 10^\circ \div \pm 20^\circ$ .

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей. М: Машиностроение, 1978. 136 с.

2. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

3. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

4. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

5. Гуров Р.В. Формирование качества поверхностного слоя при отделочных и отделочно-упрочняющих режимах отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 3 (31). С. 67–73.

6. Шнейдер Ю.Г. Регуляризация микрогеометрии поверхностей деталей // Вестник машиностроения. 1991. № 5. С. 12–15.

7. Вирт, А.Э. Влияние усилия деформирования при ППД на шероховатость обработанной поверхности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 12-1. С. 12–14.

8. Бутаков Б.И., Шебанин В.С., Марченко Д.Д., Артюх А.В. Поверхностное пластическое деформирование как метод повышения качества деталей машин // Труды Госнिति. 2011. Т. 107. № 2. С. 85–87.

9. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.

10. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние начальной ориентации рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Технология металлов. 2022. № 12. С. 11–20.

11. Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. № 5. С. 344–353.

12. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Влияние направления и геометрии рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при осциллирующем выглаживании цилиндрических деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 8 (701). С. 28–36.

13. Пат. 2758713 РФ. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай, заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021.

14. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние кинематики тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние при поверхностном пластическом деформировании // Металлообработка. 2022. № 2 (128). С. 40–48.

15. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние основных параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 7–15.

16. Francesco Farina, Andrea Camisa, Andrea Testa, Ivano Notarnicola, Giuseppe Notarstefano. DISROPT: a Python Framework for Distributed Optimization // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53. P. 2666–2671. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.382>

17. Ali Ahrari, Saber Elsayed, Ruhul Sarker, Daryl Essam, Carlos A. Coello Coello. PyDDRBG: A Python framework for benchmarking and evaluating static and dynamic multimodal optimization methods // SoftwareX. 2022. Vol. 17. P.100961. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100961>

18. Antonio Benítez-Hidalgo Antonio, J. Nebro, José García-Nieto, Izaskun Oregi, Javier Del Ser. jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics // Swarm and Evolutionary Computation. 2019. Vol. 51. P.100598. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100598>

## REFERENCES

1. Prilutskiy V.A. Processing surface waviness reduction technique. M: Mashinostroenie, 1978, 136 p.

2. Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts. M: Mashinostroeniye, 2000, 320 p.

3. Odintsov L.G. Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation. M: Mashinostroenie, 1987, 328 p.

4. Smelyansky V.M. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation. M: Mashinostroenie, 2002, 300 p.

5. Gurov R.V. Surface bed finish development in finishing and hardening modes of finishing-hardening treatment using surface plastic deformation technique. Bulletin of Bryansk State Technical University, 2011, no. 3 (31), pp. 67–73.

6. Schneider Yu.G. Regularization of microgeometry of parts surfaces. Vestnik mashinostroeniya, 1991, no. 5, pp. 12–15.

7. Wirth A.E. A deformation force effect under SPD on the roughness of the treated surface / International journal of applied and fundamental research, 2014, no. 12-1, pp. 12–14.

8. Butakov B.I., Shebanin V.S., Marchenko D.D., Artyukh A.V. Surface plastic deformation as a method of improving machine parts quality.

Proceedings of Gosniti, 2011, vol. 107, no. 2, pp. 85–87.

9. Demkin N.B., Ryzhov E.V. Surface quality and contact of machine parts. M: Mashinostroenie Publ., 1981, 244 p.

10. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Tool initial orientation effect on the elastic state under reversible surface plastic deformation / Technology of metals, 2022, no. 12. pp. 11–20.

11. Zaides S.A., Ho Minh Quan. Pendulum surface plastic deformation of cylindrical blanks. Proceedings of Higher Educational Institutions Ferrous Metallurgy, 2022, no.5, pp. 344–53 | Journal article, DOI: 10.17073/0368-0797-2022-5-344-353.

12. Zaides S. A., Nguyen Van Hin. The influence of the direction and geometry of the working tool on the stress-strain state of cylindrical parts in oscillating burnishing / Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical engineering, 2018. no. 8 (701). pp. 28–36. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-28-362018

13. Patent 2758713 RF: Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of revolution / Zaides S.A., Nguyen Huu Khai, application 14.01.2021; publ. 01.11.2021.

14. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of the kinematics of a toroidal roller on the stress-strain state under surface plastic deformation / Metalloobrabotka, 2022, no. 2, pp. 40–48, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2022.2.40>.

15. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of the main parameters of reversible surface plastic deformation on the stress-deformed state of cylindrical parts / Systems. Methods. Technologies, 2022, no. 3 (55), pp. 7–15.

16. Francesco Farina, Andrea Camisa, Andrea Testa, Ivano Notarnicola, Giuseppe Notarstefano. DISROPT: a Python Framework for Distributed Optimization // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53. P. 2666–2671. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.382>

17. Ali Ahrari, Saber Elsayed, Ruhul Sarker, Daryl Essam, Carlos A. Coello Coello. PyDDRBG: A Python framework for benchmarking and evaluating static and dynamic multimodal optimization methods // SoftwareX. 2022. Vol. 17. P.100961. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100961>

18. Antonio Benítez-Hidalgo Antonio, J. Nebro, José García-Nieto, Izaskun Oregi, Javier Del Ser. jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics // Swarm and Evolutionary Computation, 2019, vol. 51. P. 100598. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100598>

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена после рецензирования 19.01.2023; принята к публикации 30.02.2023.

The article was submitted 16.01.2023; approved after reviewing 19.01.2023; assepted for publication 30.02.2023.

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.04.2023. Выход в свет 30.04.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Брянский государственный технический университет» 241035,  
Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16