### МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ / METALLURGICAL TECHNOLOGIES



#### Оригинальная статья

**YJK** 621.787.4 **DOI** 10.17073/0368-0797-2022-5-344-353 https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2309



# Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок

### С. А. Зайдес, Хо Минь Куан

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

Аннотация. В статье рассматриваются особенности кинематики рабочего инструмента в виде кругового сектора при упрочнении маятниковым поверхностным пластическим деформированием (ППД), которое осуществляется за счет поочередных двух процессов – качение и скольжение в зоне контакта деформирующего элемента с заготовкой. Представлено прогнозирование возможности его применения для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей типа валов и осей, описаны кинематические параметры процесса маятникового ППД в прямоугольной системе координат. На основе анализа составляющих видов движения (вращательное, поступательное, колебательное) заготовки и инструмента определены функции длины траектории, величины результирующей скорости и ускорения, позволяющие управлять технологическими параметрами и режимами процесса маятникового ППД. Достоверность кинематического анализа подтверждена результатами моделирования компьютерной программой ANSYS 19.1. Результатами динамического моделирования установлено, что в одинаковых условиях упрочнения при неподвижном положении рабочего инструмента и его противоположном вращении с заготовкой интенсивность временных напряжений увеличивается соответственно на 10 и 17 % по сравнению со схемой качения. При маятниковом ППЛ интенсивность временных напряжений резко увеличивается и достигает максимального значения (485 МПа). Следует отметить, что распределение временных напряжений в случае маятникового ППД носит более равномерный характер по сравнению с остальными способами. Кроме того, показана закономерность распределения интенсивности временных напряжений по глубине цилиндра, где видно, что что при ППД скольжением глубина пластической деформации *h* имеет большее значение по сравнению с ППД качением (1,5 – 2,3 раза). В одинаковых условиях упрочнения наибольшее значение глубины упрочненных зон получается при маятниковом  $\Pi\Pi\Pi$  (h = 2.8 мм), которое приводит к изменению физико-механических и эксплуатационных свойств более глубокого поверхностного слоя заготовки.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, секториальный рабочий инструмент, кинематика процесса упрочнения, временные напряжения, компьютерное моделирование, поверхностный слой, цилиндрическая деталь, глубина пластической деформации

Для цитирования: Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 5. С. 344–353. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353

**Original** article

# PENDULUM SURFACE PLASTIC DEFORMATION OF CYLINDRICAL BLANKS

### S. A. Zaides, Ho Minh Quan

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

*Abstract.* The article discusses the features of kinematics of the working tool in form of circular sector during hardening by pendulum surface plastic deformation (SPD), which is carried out due to two successive processes – rolling and sliding in the contact zone of the deforming element with the blank. Forecasting of the possibility of its application for finishing and hardening processing of cylindrical parts such as shafts and axles is presented; the kinematic parameters of the pendulum SPD process in a rectangular coordinate system are described. Based on analysis of the components of motion types (rotational, translational, oscillatory) of the blank and tool, functions of the trajectory length, magnitude of the resulting velocity and acceleration were determined, which make it possible to control the technological parameters and modes of the pendulum SPD process. Reliability of the kinematic analysis is confirmed by the results of simulation with ANSYS 19.1 computer program. The results of dynamic modeling showed that under the same hardening conditions with a stationary position of the working tool and its opposite rotation with the blank, the intensity of temporary stresses increases by 10 % and 17 %, respectively, compared to the rolling scheme. With pendulum SPD, the intensity of temporary stresses increases sharply and reaches a maximum value (485 MPa), the distribution of which is uniform in comparison with other methods. In addition, regularity of the intensity distribution of temporary stresses over the cylinder depth is shown, where it is clear that in the case of SPD by sliding, the depth of plastic deformation *h* has a higher value compared to the SPD by rolling (by 1.5 - 2.3 times). Under the same hardening conditions, the highest value of the depth of the hardened zones is obtained with pendulum SPD (*h* = 2.8 mm), which leads to changes in the physical, mechanical and operational properties of the blank deeper surface layer.

*Keywords:* surface plastic deformation, sectorial working tool, kinematics of hardening process, temporary stresses, computer modeling, surface layer, cylindrical part, plastic deformation depth

For citation: Zaides S.A., Ho Minh Quan. Pendulum surface plastic deformation of cylindrical blanks. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2022, vol. 65, no. 5, pp. 344–353. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353

### Введение

Среди продукции черной металлургии одно из ведущих мест занимает сортовой прокат круглого поперечного сечения. Горячекатаные и холоднотянутые прутки широко используют в металлообрабатывающих отраслях машиностроения в качестве заготовки для изготовления деталей типа валов, осей, штоков, штанг и др. Особо эффективным является сортовой прокат для изготовления длинномерных нежестких валов и осей [1, 2]

При механической обработке сортового проката резанием получают качественные детали с высокой степенью точности. Однако обработка резанием, основанная на отделении материала в виде стружки, не позволяет получить качественный поверхностной слой, который в первую очередь воспринимает эксплуатационные нагрузки.

Срез и микроотрыв металла при образовании стружки непосредственным образом влияет на формирование качества поверхностного слоя. Отрыв материала в зоне образования стружки приводит к разрушению на кристаллическом уровне, что естественно влияет на механические свойства поверхностного слоя [3 – 7].

Для повышения качества поверхностного слоя, непосредственно связанного с эксплуатационными характеристиками изделий, широко применяют отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД), которая не только снижает шероховатость поверхности, но повышает твердость и формирует сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое [8].

Среди статических методов упрочнения можно выделить два процесса, основанные на качении и скольжении рабочего инструмента [9]. Процесс качения осуществляется обычно шариком или роликом, угловая частота вращения которых практически совпадает с угловой частотой вращения заготовки. При этом достигается высокое качество поверхности за счет сглаживания микронеровностей, однако степень упрочнения, как и остаточные напряжения, при этом невысокие.

Обкатка скольжением осуществляется в том случае, когда угловые частоты вращения детали и инструмента не одинаковые. Обычно это происходит, когда рабочий инструмент перемещается в направлении подачи, но не вращается относительно собственной центральной оси. Например, алмазное выглаживание или обкатка не вращающимся шариком. В этом случае удается получить гораздо большую степень упрочнения и более высокий уровень остаточных напряжений сжатия, но стойкость рабочего инструмента при этом невысокая [10].

Целью данной работы является определение напряженно-деформированного состояния в очаге упругопластической деформации при качении, скольжении и комбинированном движении рабочего инструмента для оценки возможности применения нового способа упрочнения цилиндрических деталей типа валов и осей.

# Способ маятникового поверхностного пластического деформирования

На взгляд авторов, наиболее перспективным направлением считается такой метод комбинированного ППД, при котором упрочение деталей осуществляется за счет и качения и скольжения рабочего инструмента. Авторами статьи разработан способ для упрочняющей обработки наружной поверхности цилиндрических деталей, сущность которого основана на использовании маятникового движения рабочего инструмента в виде кругового сектора [11 – 12].

При маятниковом поверхностном пластическом деформировании (МППД) наружной поверхности деталей в виде тел вращения (рис. 1) детали *l* сообщают вращательное движение относительно центральной оси, рабочий инструмент прижимают к обрабатываемой поверхности с некоторым натягом *t* и сообщают инструменту продольную подачу в направлении, парал-



Рис. 1. Схема маятникового поверхностного пластического деформирования: 1 – заготовка; 2 – деформирующий элемент; 3 – рабочий сектор инструмента

1 -blank, 2 -deforming element, 3 -working sector of the tool

Fig. 1. Scheme of pendulum SPD:

лельном 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 α.

Особенность новой кинематики деформирующего инструмента заключается в том, что поверхностное пластическое деформирование осуществляется за счет поочередных процессов качения и скольжения рабочего инструмента. Для оценки эффективности нового способа упрочнения необходимо рассмотреть кинематику процессов, происходящих при маятниковом ППД.

### ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ППД

Анализ кинематики традиционных способов ППД является первоначальной задачей, решение которой позволяет выяснить их сравнительные характеристики, теоретически прогнозировать влияние основных факторов на эффективность процесса упрочнения и на формирование напряженно-деформированного состояния обработанных поверхностей деталей. Характер контактного воздействия рабочего инструмента на заготовку различных схем ППД определяется кинематическими показателями, такими как различные виды перемещения, скоростей и ускорений, которые возникают в процессе обработки и составляют общую кинематическую систему. Анализ кинематической системы позволяет не только определить изменение силовых параметров процесса упрочнения, но и корректировать результирующие факторы, влияющие на качество деталей [13, 14].

Для изучения кинематики способа маятникового ППД, который включает процессы качения и скольжения, проведен сравнительный анализ традиционных и широко применяемых методов: обкатывание и алмазное выглаживание. Для наглядного описания кинематических показателей процесса ППД деталей в виде тела вращения была выбрана прямоугольная система координат со следующими направлениями осей: ось X – совпадает с направлением вращения обрабатываемой заготовки, ось Y – имеет радиальное направление, ось Z – в направлении продольной подачи.

В процессе ППД различными способами с вводом дополнительных колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности смещение рабочего инструмента за время всего процесса упрочнения t оставляет на поверхностном слое заготовки след. Его проекции на соответственных осях координат имеют следующий вид [15 - 17]:

$$\begin{cases} L_X = V_V t + A \sin(2\pi f t) \cos \beta \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t + A \sin(2\pi f t) \sin \beta, \end{cases}$$
(1)

где  $V_V = \frac{\pi Dn}{1000 \cdot 60}$  – линейная скорость вращательного движения заготовки, м/с;  $V_S = \frac{Sn}{1000 \cdot 60}$  – скорость в направлении продольной подачи, м/с; f – частота колебаний рабочего инструмента, rad/c; A – амплитуда колебаний, град;  $\beta$  – угол между векторами линейной скорости заготовки и колебательной скорости рабочего инструмента (угол ввода колебаний); S – продольная подача, мм/об; n – число оборотов детали; D – диаметр детали, мм.

### 🗧 ППД по схеме качения

При движении рабочего инструмента и заготовки в одну сторону с одинаковыми угловыми скоростями процесс упрочнения осуществляется за счет плавного качения. Такая схема ППД наиболее известна среди способов обкатывания, когда в качестве деформирующего инструмента применяют, как правило, шарик или ролик. Они перемещаются вдоль обрабатываемой поверхности заготовки, совершая при этом вращение вокруг своей оси, которое совпадает с частотой вращения заготовки. Проекции составляющих траекторий рабочего инструмента при ППД по схеме качения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} L_X = V_V t + V_{\mu} t \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t. \end{cases}$$
(2)

Поскольку рабочий инструмент и заготовка имеют одинаковую частоту вращения (см. рис. 2, *a*), то их проекции  $V_V$  и  $V_{\mu}$  на ось *OX* располагаются в противоложных направлениях, следовательно, сумма  $\overline{V_X} = 0$ , а результирующая скорость  $V_{\text{pes}}$  определяется в основном значением продольной скорости  $V_S$  ( $V_{\text{pes}} = V_S$ ) (см. рис. 2, *б*, *в*).

В связи с неизменной величиной  $V_s$  при ППД по схеме качения, результирующая скорость также является постоянной как по величине, так и по направлению в течение всего процесса упрочнения. Ускорение в данном случае определяется как

$$j = \frac{dV_{\text{pes}}}{dt} = 0.$$
(3)

В связи с постоянством результирующей скорости (ускорение равно нулю) при ППД по схеме качения можно сделать вывод о том, что возможности управления процессом упругопластической деформации в зоне контакта инструмента с заготовкой, оказывающей непосредственное влияние на последующее формирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя, существенно ограничиваются. Это не обеспечивает необходимой степени упрочнения при решении определенных производственных задач.



Рис. 2. Схема векторов скоростей при ППД по схеме качения:

*а* – размещение векторов скоростей относительно точки контакта; *б* – проекции векторов скоростей на выбранную систему координат; *в* – диапазон изменения результирующей скорости

Fig. 2. Scheme of velocity vectors during SPD according to the rolling scheme:

a – placement of velocity vectors relative to the contact point;  $\delta$  – projections of velocity vectors onto the selected coordinate system; e – range of changes in the resulting velocity

### ППД по схеме скольжения

Для четкого представления особенностей кинематики процесса маятникового ППД, необходимо проанализировать еще один процесс, сущность которого основана на упрочнении ППД по схеме скольжения. Одним из наиболее распространенных способов ППД скольжением является алмазное выглаживание, характерной особенностью кинематики которого является неподвижность рабочего инструмента (см. рис. 3, *a*).

Составляющие траектории инструмента при ППД скольжением:

$$\begin{cases} L_X = V_V t \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t. \end{cases}$$
(4)

В связи с тем, что при ППД скольжением выглаживатель неподвижный ( $V_{\mu} = 0$ ), результирующая скорость равна (см. рис. 3,  $a, \delta$ ):

$$V_{\rm pes} = \sqrt{V_V^2 + V_S^2};$$
 (5)

ускорение:

$$j = \frac{dV_{\text{pes}}}{dt} = 0.$$
 (6)

Из уравнения (5) следует отметить, что значение результирующей скорости изменяется в более широком диапазоне по сравнению со схемой качения, так как оно определяется не только  $V_s$ , но и значением главного движения заготовки  $V_v$  (рис. 3, *e*). Это увеличивает возможность управления качеством обра-



Рис. 3. Схема векторов скоростей при ППД скольжением: *a* – размещение векторов скоростей; *б* – проекции векторов скоростей на систему координат; *в* – диапазон изменения результирующей скорости рабочего инструмента

Fig. 3. Scheme of velocity vectors during sliding SPD:

a – placement of velocity vectors;  $\delta$  – projections of velocity vectors onto the coordinate system; e – range of changes in the resulting velocity

батываемой поверхности, процессом формирования временных и остаточных напряжений путем регулирования технологических параметров и режимов обработки. Данная информация известна на производстве, что при одинаковых условиях упрочнения ППД скольжением позволяет получить более качественную поверхность с высоким значением интенсивности напряжений сжатия по сравнению с ППД качением.

Однако результирующая скорость при ППД скольжением обладает характером, близким к случаю ППД качением (является постоянной величиной по значению и направлению), что вызывает определенные ограничения при управлении качеством поверхностного слоя данным способом упрочнения.

### ППД маятниковым воздействием

В процессе маятникового ППД секториальный рабочий инструмент совершает круговое колебание в плоскости главного движения заготовки ( $\beta = 0$ ) и уравнение (1) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L_X = V_V t + A \sin(2\pi f t) \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t. \end{cases}$$
(7)

Поскольку рабочий инструмент при маятниковом ППД совершает несколько видов движений (рис. 4), результирующая скорость равна:

$$V_{\rm pe3} = \sqrt{(V_V + V_{\rm H})^2 + V_S^2},$$
 (8)

где  $V_{\mu} = 2\pi f A \cos(2\pi f t)$  – колебательная скорость инструмента.

Результирующая скорость в процессе маятникового ППД обладает переменным характером, обусловленным наличием ускорения, которое определяется следующим выражением:

$$j = \frac{dV_{\rm pe3}}{dt} = \frac{-2\pi^2 f^2 A \sin(2\pi f t) (V_V + V_{\rm \mu}) + V_S}{\sqrt{(V_V + V_{\rm \mu})^2 + V_S^2}}.$$
 (9)

Из уравнений (8) и (9) очевидно, что результирующие скорость и ускорение являются переменными величинами, значения которых находятся в тесной зависимости от линейной скорости заготовки, колебательной скорости рабочего инструмента и величины продольной подачи. Кроме этого, наличие колебательного движения рабочего инструмента обуславливает одновременное изменение составляющих  $\overline{V_X}$  и  $\overline{V_Z}$ , которые значительно расширяют диапазон варьирования результирующей скорости. Это позволяет управлять кинематическими параметрами процесса упрочнения, влияющими на параметры качества поверхностного слоя.

Следует отметить, что при вводе колебания в плоскость главного движения заготовки, вектор результирующей скорости  $\overline{V_{\text{рез}}}$  также располагается в плоскости контакта *XOZ*. Это обеспечивает стабильность нормального составляющего давления и постоянный контакт рабочего инструмента с поверхностью обрабатываемой детали.

Таким образом, при маятниковом ППД сохраняется условие постоянного контакта рабочего инструмента с заготовкой. Увеличение числа факторов, влияющих на характер кинематического процесса упрочнения, расширяет возможности по усилению напряженно-деформированного состояния обрабатываемой поверхности по сравнению со схемой скольжения и качения. Кроме



Рис. 4. Схема векторов скоростей при маятниковым ППД: *a* – размещение векторов скоростей; *б* – проекции векторов скоростей на систему координат; *в* – размещение составляющей скорости скольжения и качения; *г* – диапазон изменения результирующей скорости

Fig. 4. Scheme of velocity vectors during pendulum SPD:

a – placement of velocity vectors;  $\delta$  – projections of velocity vectors onto the coordinate system;

g – placement of the sliding and rolling velocity components; c – range of changes in the resulting velocity

того, широкий диапазон выбора условий обработки при применении маятникового ППД позволяет управлять микрогеометрическими и физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

Для подтверждения результатов векторного анализа кинематических характеристик схем поверхностного упрочнения ниже рассматривается конечно-элементное моделирование, позволяющее определить напряженнодеформированное состояние (НДС) в поверхностном слое упрочненных деталей [18, 19].

## Компьютерное моделирование процесса маятникового ППД

Для определения НДС поверхностного слоя заготовки в результате процессов упрочнения, происходящих при маятниковом ППД, использовали компьютерное моделирование в программе Ansys Workbench 19.1, которая является одной из наиболее эффективных программ, реализующих метод конечных элементов [20, 21].

Для проведения моделирования при динамическом нагружении построены геометрические модели (рис. 5), выполненные в виде цилиндра диаметром  $D_{3ar}$ . В качестве рабочего инструмента применяли круговой сектор  $R_{cek}$  с радиусом скругления  $r_{ин}$  на цилиндрической поверхности (рис. 5, *a*). Для выяснения закономерности распределения временных напряжений в поверхностном слое в случаях ППД по схемам качения и скольжения рабочий инструмент выполнен с удлиненным круговым сектором, представляющим собой окружность (рис. 5, *б*).

Характеристики образца: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром  $D_{3ar} = 20$  мм; материал (сталь 45) упругопластический, упрочняющийся, модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; диаграмма деформирования материала – билинейная (предел текучести  $\sigma_{T} = 360$  МПа, предел прочности  $\sigma_{B} = 600$  МПа, модуль упрочнения  $E_{T} = 1,45 \cdot 10^3$  МПа).

Характеристики инструмента: круговой сектор  $R_{cek}$  с радиусом скругления  $r_{uh}$  на цилиндрической поверхности (рабочий радиус инструмента  $r_u = 5$  мм, секториальный радиус рабочего инструмента  $R_{cek} = 25$  мм); материал – ВК8; модуль упругости  $E = 6 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; коэффициент трения в зоне контакта рабочего инструмента с образцом f = 0,1.

Для определения напряженно-деформированного состояния заготовки были использованы режимы упрочнения, представленные в таблице.

Для подтверждения вышеизложенных результатов векторного анализа кинематических характеристик схем поверхностного упрочнения моделируются следующие процессы (см. рис. 5,  $\delta$ ): ППД качением при  $n_{\rm заr} = n_{\rm ин} = 50$  об/мин (движение *II*); ППД скольжением с неподвижным деформирующим инструментом (движение *I*); ППД скольжением с вращающимся деформи-

рующим инструментом (движение *III*); ППД маятниковым воздействием (см. рис. 5, *a*).

На рис. 6 показаны поля распределения временных напряжений по поперечному сечению в результате ППД с разными схемами упрочнения.



Рис. 5. Конечно-элементные модели при ППД: *а* – маятниковым воздействием; *б* – качением, скольжением; *1* – рабочий инструмент; *2* – цилиндр диаметром *D*<sub>заг</sub>

Fig. 5. Finite element models for SPD pendulum action (*a*); rolling, sliding (δ):

1 - working tool; 2 - cylinder with diameter  $D_{3ar}$ 

Необходимо отметить, что в результате ППД при одинаковой величине натяга t по схеме качения (см. рис. 6, a) значение интенсивности максимальных временных напряжений наименьшее (391 МПа). В одинаковых условиях упрочнения при неподвижном положении рабочего инструмента и его противоположном вращении с заготовкой (рис. 6,  $\delta$ , e) интенсивность временных напряжений увеличивается соответственно на 10 и 17 % по сравнению со схемой качения.

При введении колебания по касательной к обрабатываемой поверхности (при маятниковом ППД) интенсивность временных напряжений резко увеличивается и достигает значения 485 МПа (рис. 6, *г*). Следует отметить, что распределение временных напряжений в случае маятникового ППД носит более равномерный характер по сравнению с остальными способами.

На рис. 7 показано распределение интенсивности временных напряжений по глубине цилиндра, где на-

глядно отображается, что интенсивность напряжений уменьшается в направлении центральной зоны цилиндра. При этом в случае ППД по схеме качения и скольжения пластическая деформация происходит только до глубины 0,8 – 1,9 мм, а при маятниковом ППД до 2,8 – 2,9 мм от поверхностного слоя (см. рис. 7).

На рис. 8 показана максимальная величина пластической деформации при разных процессах деформирования. Следует отметить, что при ППД скольжением глубина пластической деформации h имеет большее значение по сравнению с ППД качением (1,5 – 2,3 раза). В одинаковых условиях упрочнения наибольшее значение глубины упрочненных зон получается при маятниковом ППД (h = 2,8 мм), которое приводит к изменению физико-механических и эксплуатационных свойств более глубокого поверхностного слоя заготовки.

Проведенные исследования показали, что значение интенсивности временных напряжений, формирую-

### Значения базовых режимов и параметров упрочнения



Values of basic modes and hardening parameters

Рис. 6. Распределение временных напряжений по поперечному сечению цилиндра: *a* – при качении; *б* – при скольжении с неподвижным рабочим инструментом; *в* – при скольжении с вращением рабочего инструмента; *г* – при маятниковом ППД

Fig. 6. Distribution of temporary stresses over the cross section of the cylinder:

e – with pendulum SPD

a – when rolling;  $\delta$  – when sliding with a fixed working tool; s – when sliding with rotation of the working tool;



Рис. 7. Распределение интенсивности временных напряжений по глубине цилиндра

Fig. 7. Distribution of the temporary stresses intensity over the cylinder depth

щихся непосредственно в результате обработки ППД, находятся в тесной зависимости от кинематики рабочего инструмента. При этом маятниковое ППД, при котором рабочий инструмент в виде кругового сектора совершает наиболее сложную кинематику при воздействии на обрабатываемую поверхность цилиндра, создает наибольшее значение интенсивности временных напряжений.

### Выводы

Проведенный теоретический и кинематический анализ схемы маятникового ППД, составлявших ее процессов (качение и скольжение) и результаты компьютерного моделирования позволяют сделать следующие выводы.

Характерной чертой кинематики маятникового ППД является наличие двух процессов – качение и скольжение рабочего инструмента, которые создают в зоне контакта с заготовкой переменные по величине и направлению векторы скорости и ускорения, что дает воз-

on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel //



Рис. 8. Глубина пластической деформации при ППД: *a* – при качении; *б* – при скольжении с неподвижным рабочим инструментом; *в* – при скольжении с вращением рабочего инструмента; *г* – при маятниковом ППД



можность управления технологическими параметрами обработки. Наличие регулируемых параметров и режимов рабочего инструмента увеличивает технологические возможности по регулированию напряженным состоянием поверхностного слоя.

Достоверность кинематического анализа подтверждается результатами конечно-элементного моделирования, по которым видно, что интенсивность временных напряжений зависит от сложности кинематики рабочего инструмента. Наиболее сложную кинематику рабочего инструмента имеет способ маятникового ППД, который обеспечивает необходимую степень упрочения без повышения величины натяга.

При одинаковых условиях упрочнения интенсивность временных напряжений при маятниковом ППД имеет наибольшее значение (485 МПа), которое больше в 1,05 – 1,25 раза по сравнению с ППД скольжением и качением. Глубина пластической зоны h составляет 2,8 мм, что больше в 2,8 – 3,5 раза по сравнению с упрочнением по схеме качения и скольжения.

rage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel.

	Список литературы References				
1.	Сталь качественная и высококачественная, сортовой и фасон- ный прокат и калиброванная сталь. В 2-х частях. Москва: Из- дательство стандартов, 1985. 600 с.	1.	Quality and High-Quality Steel, Sectional and Shaped Rolled Stock and Calibrated Steel. In 2 parts. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1985, 600 p. (In Russ.).		
2.	Хорольский Д.Ю. Справочник по сортовому прокату. Харьков: Металлика, 2004. 300 с.	2.	Khorol'skii D.Yu. <i>Reference Book on Sectional Rolled Stock</i> . Kharkiv: Metallika, 2004, 300 p. (In Russ.).		
3.	Nie N., Su L., Deng G., Li H., Yu H., Tieu A.K. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15. P. 6574–6607. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087	3.	Nie N., Su L., Deng G., Li H., Yu H., Tieu A.K. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metal- lic materials. <i>Journal of Materials Research and Technology</i> . 2021, vol. 15, pp. 6574–6607. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087		
4.	Отений Я.Н., Привалов Н.И., Щеголев Н.Г., Муравьев О.П., Ткачева Ю.О. Особенности формирования глубины упроч- нения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12(3). С. 452–455.	4.	Otenii Ya.N., Privalov N.I., Shchegolev N.G., Murav'ev O.P., Tkacheva Yu.O. Peculiarities of hardening depth formation in the processing of parts by surface plastic deformation. <i>Mezhdunarod- nyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii</i> . 2016, no. 12(3), pp. 452–455. (In Russ.).		
5.	Wu I., Liu H., Wei P., Lin Q., Zhou S. Effect of shot peening coverage	5.	Wu I., Liu H., Wei P., Lin Q., Zhou S. Effect of shot peening cove-		

International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 183. Article 105785. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785

- Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. Москва: Машиностроение, 2007. 399 с.
- Parasiz S.A., Kutucu Y.K., Karadag O. On the utilization of Sachs model in modeling deformation of surface grains, for micro/meso scale deformation processes // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 68. P. 1086–1099.

https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033

- Кабатов А.А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2013. № 58. С. 49–54.
- Ежелев А.В., Бобровский И.Н., Лукьянов А.А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием // Фундаментальные исследования. 2012. № 6. Ч. 3. С. 642–646.
- 10. Li S., Kim D.K., Benson S. The influence of residual stress on the ultimate strength of longitudinally compressed stiffened panels // Ocean Engineering. 2021. Vol. 231. Article 108839. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108839
- Пат. 2757643 RU. Способ поверхностно-пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения / Зайдес С.А., Хо Минь Куан; заяв. 04.02.2021; опубл. 19.10.2021.
- 12. Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование при отделочно-упрочняющей обработке цилиндрических деталей транспортной техники // Международный сборник научных трудов. Якутск, 2021. С. 152–157.
- 13. Zhou C., Jiang F., Xu D., Guo C., Zhao C., Wang Z., Wang J. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment // Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 280. Article 116599. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599
- Ma C., Suslov S., Ye C., Dong Y. Improving plasticity of metallic glass by electropulsing-assisted surface severe plastic deformation // Materials & Design. 2019. Vol. 165. Article 107581. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107581
- Rakhimyanov Kh., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processingu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971. Article 022054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022054
- 16. Семенова Ю.С., Самуль А.Г., Мажуга А.Г. Применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования при модификации поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 5. С. 200–204.
- https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-5-200-204
  17. Рахимянов Х.М., Гилета В.П, Самуль А.Г. Обеспечение микрогеометрического состояния поверхности деталей, выполненных из пластичных материалов, ультразвуковой обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 6. С. 256–259. https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-6-256-259
- Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes// IOP Conference Series: Material Science and Engineering. 2016. Vol. 126. No. 1. Article 012004. https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004
- Ablieieva I., Plyatsuk L., Roi I., Chekh O., Gabbassova S., Zaitseva K., Lutsenko S. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 287. Article 112347. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347

International Journal of Mechanical Sciences. 2020, vol.183, article 105785. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785

- 6. Blyumenshtein V.Yu., Smelyanskii V.M. *Mechanics of Technological Inheritance at the Stages of Processing and Operation of Machine Parts*. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 399 p. (In Russ.).
- Parasiz S.A., Kutucu Y.K., Karadag O. On the utilization of Sachs model in modeling deformation of surface grains, for micro/meso scale deformation processes. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, vol. 68, pp. 1086–1099. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033
- 8. Kabatov A.A. Analysis of finishing methods of processing by surface plastic deformation. *Otkrytye informatsionnye i komp 'yuternye integrirovannye tekhnologii*. 2013, no. 58, pp. 49–54. (In Russ.).
- 9. Ezhelev A.V., Bobrovskii I.N., Luk'yanov A.A. Analysis of methods of processing by surface-plastic deformation. *Fundamental 'nye issledovaniya*. 2012, no. 6, part 3, pp. 642–646. (In Russ.).
- Li S., Kim D.K., Benson S. The influence of residual stress on the ultimate strength of longitudinally compressed stiffened panels. *Ocean Engineering*. 2021, vol. 231, article 108839. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108839
- Zaides S.A., Ho Minh Quan. Method for surface plastic deformation of outer surface of a part in form of rotation body. Paten RF no 2757643. MPK B24B 39/04. Bulleten' izobretenii. 2021. (In Russ.).
- Zaides S.A., Ho Minh Quan. Pendulum surface plastic deformation during finishing and hardening treatment of cylindrical parts of transport equipment. In: *Coll. of Sci. Papers*. Yakutsk, 2021, pp. 152–157. (In Russ.).
- Zhou C., Jiang F., Xu D., Guo C., Zhao C., Wang Z., Wang J. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020, vol. 280, article 116599. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599
- Ma C., Suslov S., Ye C., Dong Y. Improving plasticity of metallic glass by electropulsing-assisted surface severe plastic deformation. *Materials & Design*. 2019, vol. 165, article 2019. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107581
- Rakhimyanov Kh., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 971, article 022054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022054
- Semenova Yu.S., Samul' A.G., Mazhuga A.G. The use of ultrasonic surface plastic deformation in the modification of the surface layer. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2020, vol. 16, no. 5, pp. 200–204. (In Russ.).

https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-5-200-204

- Rakhimyanov Kh.M., Gileta V.P, Samul' A.G. Ensuring the microgeometric state of the surface of parts made of plastic materials by ultrasonic treatment. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2020, vol. 16, no. 6. pp. 256–259. (In Russ.). https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-6-256-259
- Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering.* 2016, vol. 126, no. 1, article 012004. https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004
- 19. Ablieieva I., Plyatsuk L., Roi I., Chekh O., Gabbassova S., Zaitseva K., Lutsenko S. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling. *Journal of Environmental Management*. 2021, vol. 287, article 112347. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347

- 20. Rayhan S.B., Rahman M.M. Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using ANSYS Material Designer // Procedia Structural Integrity. 2020. Vol. 28. P. 1892–1900. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012
- Qiu P., Meng B., Xu S., Rong Y., Yan J. Evolution and control of deformation mechanisms in micro-grooving of Zr-based metallic glass // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 68. Part A. P. 923–931. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.012
- Rayhan S.B., Rahman M.M. Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using ANSYS Material Designer. *Procedia Structural Integrity*. 2020, vol. 28, pp. 1892–1900. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012
- 21. Qiu P., Meng B., Xu S., Rong Y., Yan J. Evolution and control of deformation mechanisms in micro-grooving of Zr-based metallic glass. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, vol. 68, part A, pp. 923–931. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.012

Сведения об авторах	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	
<i>Семен Азикович Зайдес,</i> д.т.н., профессор, заведующий кафедрой	Semen A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair "Engineering	
машиностроительных технологий и материалов, Иркутский на-	Technology and Materials", Irkutsk National Research Technical Uni-	
циональный исследовательский технический университет	versity	
<i>E-mail:</i> zsa@istu.edu	E-mail: zsa@istu.edu	
Хо Минь Куан, аспирант кафедры материаловедения, сварочных	Ho Minh Quan, Postgraduate of the Chair of Materials Science, Welding	
и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследова-	and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical Univer-	
тельский технический университет	sity	
ORCID: 0000-0002-0488-0290	ORCID: 0000-0002-0488-0290	
E-mail: minhquanho2605@gmail.com	E-mail: minhquanho2605@gmail.com	
Поступила в редакцию 24.02.2022	Received 24.02.2022	
После доработки 20.04.2022	Revised 20.04.2022	
Принята к публикации 25.04.2022	Accepted 25.04.2022	