

Научная статья

УДК 621.9.048.6

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-24-34>

## Кинематические характеристики процесса ультразвуковой поверхностной обработки

Артём Геннадьевич Самуль<sup>1✉</sup><sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия<sup>1</sup>[samul.2012@corp.nstu.ru](mailto:samul.2012@corp.nstu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6021-7154>

**Резюме.** Цель – исследование кинематических характеристик процесса ультразвукового поверхностно-пластического деформирования с направлением ввода колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности для прогнозирования возможности его применения на деталях из металлов и сплавов различной твердости. Описание кинематических параметров (траектория, скорость, ускорение) процесса ультразвукового поверхностно-пластического деформирования рассматривалось в прямоугольной системе координат. Получены аналитические зависимости, определяющие длину траектории, величины результирующей скорости и ускорения как функции от составляющих видов движений (вращательного, поступательного, колебательного). На основании полученных уравнений и их графических решений установлено, что при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании перемещение индентора осуществляется по сложной траектории с переменной по величине скоростью и ускорением. Показано, что сообщение ультразвуковых колебаний индентору обуславливает сложный характер его движения, существенно отличающийся от метода алмазного выглаживания. При этом наблюдается изменение параметров процесса (скорости и ускорения) по циклическому (синусоидальному) закону, периодичность которого зависит от частоты ультразвуковых колебаний, что должно сказаться на итоговом состоянии обработанной поверхности. Анализ полученных результатов позволил установить, что смена направления ввода ультразвуковых колебаний (с нормального на касательное) дает возможность изменить условие контактирования с циклического на постоянное, что оказывает влияние на значение деформирующего усилия, возникающего в процессе обработки. Выявлено, что угол ввода колебаний относительно вектора главной скорости является технологическим параметром, существенно влияющим на кинематические характеристики. Проведенные исследования позволили сделать предположение о возможности применения ультразвукового поверхностно-пластического деформирования по касательной схеме для деталей, выполненных из металлов и сплавов различной твердости.

**Ключевые слова:** ультразвуковая обработка, колебания, кинематика процесса, поверхностное пластическое деформирование, траектория движения инструмента, параметры обработки

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90059.

**Для цитирования:** Самуль А. Г. Кинематические характеристики процесса ультразвуковой поверхностной обработки // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 24–34. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-24-34>.

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

## Kinematic characteristics of ultrasonic surface treatment

Artyom G. Samul<sup>1✉</sup><sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia<sup>1</sup>[samul.2012@corp.nstu.ru](mailto:samul.2012@corp.nstu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6021-7154>

**Abstract.** We investigate the kinematic characteristics of ultrasonic surface-plastic deformation when the oscillations are introduced in the direction tangential to the treated surface in order to assess the potential of this method for treating parts made of metals and alloys of various hardness. The kinematic parameters (trajectory, velocity, acceleration) of ultrasonic surface-plastic deformation were calculated in a rectangular coordinate system. Analytical dependencies were

obtained for the trajectory length, resulting velocity, and acceleration as functions of the constituent types of motion (rotational, translational, oscillatory). The obtained equations and their graphical solutions allowed us to establish that, under ultrasonic surface-plastic deformation, the indenter moves along a complex trajectory with a variable velocity and acceleration. It is shown that the translation of ultrasonic oscillations to the indenter determines the complex nature of its movement, which differs significantly from that in the diamond burnishing method. In this case, the process parameters (velocity and acceleration) change according to a cyclic (sinusoidal) law, the periodicity of which depends on the frequency of ultrasonic oscillations and determines the final state of the treated surface. According to the obtained results, the change in the input direction of ultrasonic oscillations (from normal to tangential) ensures the possibility of changing the contact condition from cyclic to constant, thereby affecting the deforming force during processing. It was found that the angle of oscillation input relative to the main velocity vector is a technological parameter significantly affecting the kinematic characteristics. An assumption is made about the possibility of using the tangential pattern of ultrasonic surface-plastic deformation for parts made of metals and alloys of various hardness.

**Keywords:** ultrasonic surface machining, vibrations, process kinematics, surface plastic deformation, toolpath, processing parameters

**Funding:** the study was funded by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the research project no. 20-31-90059.

**For citation:** Samul A. G. Kinematic characteristics of ultrasonic surface treatment. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):24-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-24-34>.

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно возрастающие требования к качеству выпускаемых машин и приборов связаны с необходимостью повышения их точности и надежности, производительности и коэффициента полезного действия, которые в значительной мере определяют их функциональные характеристики.

Эксплуатационные свойства в значительной степени зависят от микрогеометрического (макроотклонение, волнистость, шероховатость) и физико-механического состояния (микротвердость, остаточные напряжения) поверхностного слоя (ПС) деталей. Чаще всего достижение итогового состояния ПС реализуется с помощью лезвийных методов обработки. Недостатком данных методов является ограниченность влияния на формирование физико-механических характеристик обрабатываемых поверхностей. При этом процессы резания характеризуются формированием остаточных растягивающих напряжений, негативно сказывающихся на износостойкости деталей. Наиболее рациональными в отношении обеспечения итогового состояния рабочих поверхностей являются методы поверхностного пластического деформирования. Их применение позволяет формировать поверхностный слой деталей с оптимальными микрогеометрическими и физи-

ко-механическими параметрами.

Среди большого разнообразия способов поверхностно-пластического деформирования (ППД)<sup>2</sup> [1] выделяются методы, связанные с использованием энергии ультразвуковых колебаний, в частности ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование. Первые упоминания о применении и реализации ультразвукового поверхностно-пластического деформирования (УЗПД) были приведены в исследовании И. И. Муханова [2]. В данной работе показано, что применение этого метода приводит к снижению шероховатости, повышению микротвердости и формированию сжимающих остаточных напряжений.

Анализ литературных источников [3–16] показал, что развитие методов УЗПД связано с применением различных схем реализации данного процесса. При этом каждый из этих методов обладает своими особенностями и рациональной областью применения. Наиболее распространенной является схема с вводом колебаний к нормали к обрабатываемой поверхности [3–13]. При использовании данного метода имеет место дробный контакт индентора с упрочняемой деталью, что обеспечивает реализацию высокой степени деформации. В связи с этим рациональной областью применения УЗПД с вводом колеба-

---

<sup>2</sup> Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Изд-во «Машиностроение», 1987. 328 с.

ний по нормали является обработка деталей из материалов высокой твердости. В работах [14–16] рассматривается применение амплитудно-модулированных и крутильных УЗК. Реализация данных методов позволяет снизить усилие деформирования (по сравнению с нормальной схемой) и способствует проведению обработки деталей из металлов и сплавов средней и низкой твердости. Недостатком данных методов является сложность их реализации.

Также известен метод УЗПД по схеме с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности, особенности которого в литературных источниках практически не раскрыты. Определение основных параметров этого процесса позволит сделать предположение о рациональной области его применения и представляет научный и практический интерес.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ПОВЕРХНОСТНО- ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Изучение кинематики и динамики применяемых методов ППД позволяет выявить их основные различия и сходства, а также установить основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование качества поверхностного слоя деталей. Характер взаимного движения инструмента и детали определяется кинематическими факторами, такими как перемещение, скорость и ускорение, которые существенно влияют и на силовые параметры процесса. Поэтому понимание данных особенностей процесса УЗПД необходимо для прогнозирования состояния поверхностного слоя обрабатываемых изделий.

Для изучения кинематических особенностей различных методов ППД проведены анализ и сравнение схем обработки УЗПД с вводом колебаний по нормали и по касательной, а также путем применения широко практикуемого метода алмазного выглаживания, близкого по своим параметрам к ультразвуковому поверхностно-пластическому деформированию. Описание кинематических параметров процесса обработки тел вращения рассмотрено в прямоугольной системе координат, при этом выбрано следующее направление осей –

ось  $X$  совпадает с направлением главного движения, ось  $Y$  имеет радиальное направление, ось  $Z$  находится в направлении подачи. Анализ проводился при условии, что деталь неподвижна, а все виды движения (вращательное, поступательное, колебательное) совершает инструмент.

В процессе УЗПД по схеме с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности (рис. 1) инструмент [17–19] за время обработки  $t$  оставляет на поверхности след, проекции которого на оси координат равны [17]:

$$\begin{cases} L_x = V_v t + A \sin(2\pi f t) \cos \beta \\ L_y = 0 \\ L_z = V_s t + A \sin(2\pi f t) \sin \beta \end{cases}, \quad (1)$$

где  $V_v = \pi D n$  – скорость главного движения;  $V_s = S n$  – скорость подачи;  $f$  – частота колебаний инструмента;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\beta$  – угол между векторами главной и колебательной скорости (угол ввода колебаний);  $S$  – подача;  $n$  – обороты;  $D$  – диаметр детали.

Поскольку инструменту одновременно сообщается несколько видов движения, то его результирующая скорость вычисляется следующим образом [17]:

$$V_{рез} = \sqrt{(V_v + V_K \cos \beta)^2 + (V_s + V_K \sin \beta)^2}, \quad (2)$$

где  $V_K = 2\pi f A \cos(2\pi f t)$ .

Из уравнения (2) видно, что результирующая скорость является переменной величиной, на значение которой оказывают существенное влияние колебательная скорость инструмента и угол  $\beta$ . Наличие колебательной скорости обуславливает одновременное изменение составляющих  $\overline{V_x}$  и  $\overline{V_z}$ , обеспечивая широкий диапазон варьирования величиной и направлением скорости  $\overline{V_{рез}}$ . Графическое решение уравнения (2) при фиксированных значениях  $\overline{V_v}$ ,  $\overline{V_K}$ ,  $\overline{V_s}$  приведено на рис. 2 ( $\beta = \text{const}$ ).

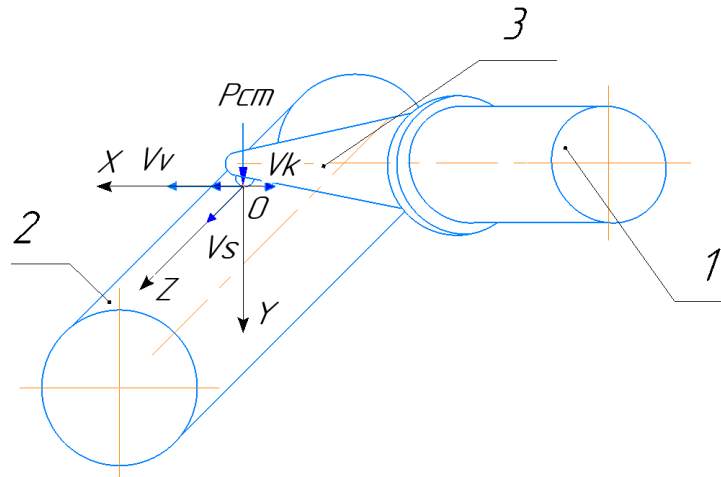


Рис. 1. Ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование по тангенциальной схеме (1 – ультразвуковой преобразователь, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – волновод;  $P_{cm}$  – статическая нагрузка,  $V_s$  – вектор скорости подачи инструмента,  $V_v$  – вектор главной скорости инструмента,  $V_k$  – вектор колебательной скорости инструмента)

Fig. 1. Ultrasonic surface-plastic deformation according to the tangential scheme (1 – ultrasonic transducer, 2 – processed part, 3 – waveguide;  $P_{cm}$  – static load,  $V_s$  – vector of the tool feed rate,  $V_v$  – vector of the main tool velocity,  $V_k$  – vector of the tool oscillating velocity)

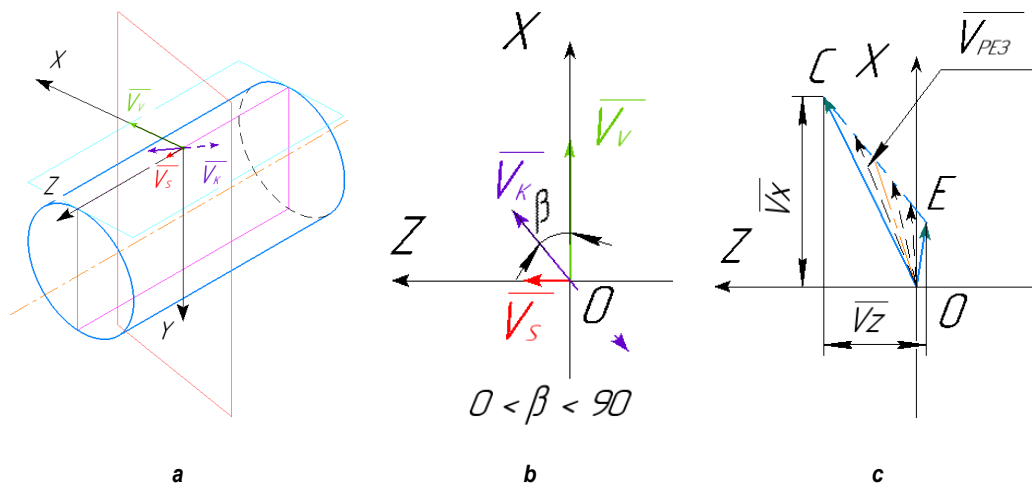


Рис. 2. Схема направления скоростей движений инструмента при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании (колебания – в касательной плоскости  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ): а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента;

б – пространственное расположение векторов скоростей обработки;

с – диапазон варьирования результирующей скорости

Fig. 2. Diagram of the tool movement velocity directions at ultrasonic surface-plastic deformation (vibrations are in the tangent plane  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ): а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors; с – variation range of resultant velocity

Диапазон изменения результирующей скорости характеризуется областью ОСЕ. Расположение вектора  $\overline{V_{PE3}}$  в плоскости  $XOZ$  обеспечивает непрерывный контакт индентора с деталью и постоянство значения нор-

мальной составляющей статического нагружения.

Переменный характер результирующей скорости обусловлен наличием ускорения, которое определяется уравнением (3):

$$j = \frac{dV_{PE3}}{dt} = \frac{-2\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft) ((2V_s + V_{KS}) \sin \beta + (2V_v + V_{KC}) \cos \beta)}{\sqrt{(V_s + V_{KS})^2 + (V_v + V_{KC})^2}}, \quad (3)$$

где  $V_{KS} = V_K \sin(\beta)$ ;  $V_{KC} = V_K \cos(\beta)$ .

Как следует из уравнения (2), величина результирующей скорости зависит не только от значений  $\overline{V_V}$ ,  $\overline{V_K}$ ,  $\overline{V_S}$ , но и от угла ввода колебаний  $\beta$ , значение которого может варьироваться от 0 до 180°. Стоит отметить, что методу УЗПД с вводом колебаний по касательной характерны два частных случая –  $\beta = 0^\circ$  и  $\beta = 90^\circ$ . При  $\beta = 0^\circ$  (рис. 3) имеем:

$$\begin{cases} L_X = V_V t + A \sin(2\pi ft) \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t \end{cases} \quad (4)$$

При скорости, результирующей перемещения:

$$V_{рез} = \sqrt{(V_V + V_K)^2 + V_S^2}. \quad (5)$$

Из рис. 3 видно, что в случае с  $\beta = 0^\circ$  только составляющая результирующей скорости  $\overline{V_X}$  имеет переменный характер, диапазон изменения которой зависит от величин  $\overline{V_V}$  и  $\overline{V_K}$ .

Другая картина наблюдается при значе-

нии угла  $\beta = 90^\circ$  (рис. 4). Составляющие траектории перемещения определяются:

$$\begin{cases} L_X = V_V t \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t + A \sin(2\pi ft) \end{cases}, \quad (6)$$

а результирующая скорость

$$V_{рез} = \sqrt{V_V^2 + (V_S + V_K)^2}. \quad (7)$$

При  $\beta = 90^\circ$  составляющая результирующей скорости  $\overline{V_Z}$  становится переменной величиной, а  $\overline{V_X}$  – постоянной.

Из представленных схем рис. 2–4 видно, что применение УЗПД с вводом колебаний по касательной позволяет варьировать значение и направление результирующей скорости в широком диапазоне. Переменный характер  $\overline{V_{рез}}$  и  $j$  инструмента при УЗПД будет оказывать влияние на интенсивность и направление течения материала в очаге деформирования, что приведет к изменению физико-механического и микрогеометрического состояния ПС.

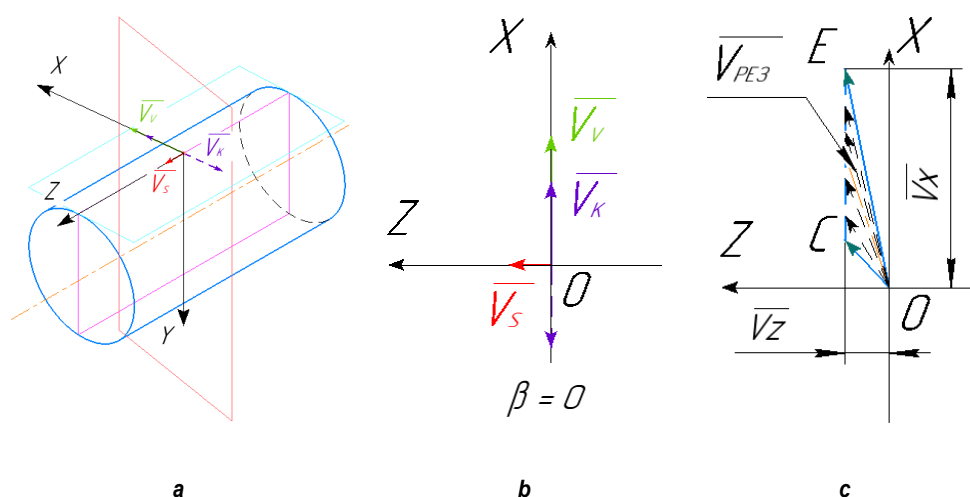


Рис. 3. Схема направления скоростей движений инструмента при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании (колебания – в касательной плоскости, угол  $\beta = 0^\circ$ ): а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента; б – пространственное расположение векторов скоростей обработки; с – диапазон варьирования результирующей скорости

Fig. 3. Diagram of the tool movement velocity direction at ultrasonic surface-plastic deformation (vibrations are in the tangent plane, angle  $\beta = 0^\circ$ ): а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors; с – variation range of resultant velocity

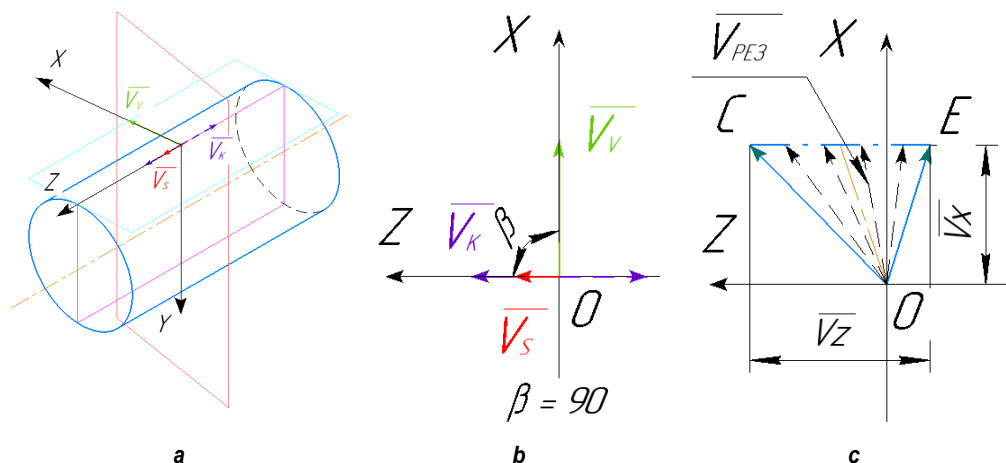


Рис. 4. Схема направления скоростей движений инструмента при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании (колебания – в касательной плоскости, угол  $\beta = 90^\circ$ ): а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента; б – пространственное расположение векторов скоростей обработки; с – диапазон варьирования результирующей скорости

Fig. 4. Diagram of the tool movement velocity direction at ultrasonic surface-plastic deformation (vibrations are in the tangent plane, angle  $\beta = 90^\circ$ ): а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors; с – variation range of resultant velocity

Поскольку значения компонентов результирующей скорости  $\overline{V}_V$ ,  $\overline{V}_K$ ,  $\overline{V}_S$  определяют режимами обработки, то их варьирование позволяет управлять параметрами  $\overline{V}_{PE3}$  в широком диапазоне.

При рассмотрении метода УЗПД с вводом колебаний по нормали компоненты траектории движения инструмента в направлении осей координат описывается уравнениями:

$$\begin{cases} L_X = V_V t \\ L_Y = A \sin(2\pi f t) \\ L_Z = V_S t \end{cases} \quad (8)$$

При этом результирующая скорость перемещения деформатора результирующей обрабатываемой поверхности описывается выражением:

$$V_{PE3} = \sqrt{V_V^2 + V_K^2 + V_S^2}. \quad (9)$$

Ускорение:

$$\begin{aligned} j &= \frac{dV_{PE3}}{dt} = \\ &= -\frac{4\pi^2 f^2 A V_K \sin(2\pi f t)}{\sqrt{V_S^2 + V_V^2 + V_K^2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Кроме величины результирующей скорости (в течение периода колебания инструмента), изменяется и ее направление относительно плоскости  $XOZ$ , которую можно характеризовать углом  $\alpha$  (рис. 5 с). При этом тангенс этого угла определяется отношением:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{V}_K}{V_S + \overline{V}_V}. \quad (11)$$

Из анализа кинематики видно, что инструмент совершает сложное движение в пространстве, составляющие которого расположены в 3-х плоскостях. Из данной схемы (см. рис. 5) становится понятным наличие дробности контакта обрабатываемой детали и инструмента. Часть времени обработки, составляющая результирующей скорости  $\overline{V}_Y$ , будет совпадать с положительным направлением оси  $Y$  (к оси обрабатываемой детали), обеспечивая внедрение индентора в деформируемую поверхность. Оставшееся время ее направления изменится на противоположное (от оси изделия), что приведет к потере контакта инструмента с деталью.

Также необходимо отметить, что величина и направление результирующей скорости обработки в значительной степени зависят от скорости колебательного движения  $V_K$ .



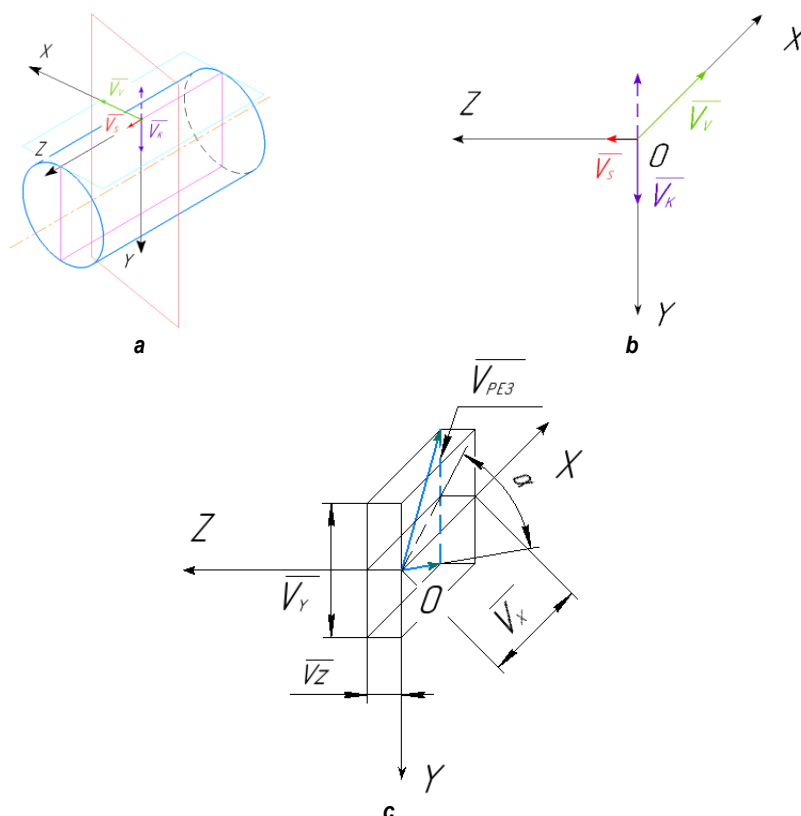


Рис. 5. Схема направления скоростей движений инструмента при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании (колебания – по нормали): а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента; б – пространственное расположение векторов скоростей обработки; с – диапазон варьирования результирующей скорости

Fig. 5. Diagram of the tool movement velocity direction at ultrasonic surface-plastic deformation (vibrations are along the normal): а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors; с – variation range of the resultant velocity

Путь, пройденный индентором за время  $t$ , будет описываться выражением:

$$L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2}. \quad (12)$$

Наличие дробности контакта инструмента с обрабатываемой деталью приводит к тому, что проходимый инструментом путь не равен длине следа, оставляемого инструментом на детали. Длина следа  $L$  будет определяться только перемещениями по осям  $X$  и  $Z$ .

Наиболее близким к УЗПД с вводом колебаний по касательной является метод алмазного выравнивания (АВ) (рис. 6). Известно, что алмазное выравнивание позволяет повышать качество поверхностного слоя деталей, выполненных из материалов широкого диапазона твердости [5, 16, 20]. Составляющие траектории перемещения инструмента при АВ описываются:

$$\begin{cases} L_x = V_v t \\ L_y = 0 \\ L_z = V_s t \end{cases}, \quad (13)$$

а результирующая скорость равна

$$V_{pez} = \sqrt{V_v^2 + V_s^2}. \quad (14)$$

Ускорение:

$$j = \frac{dV_{PE3}}{dt} = 0. \quad (15)$$

В связи с постоянством величин  $\overline{V_v}$ ,  $\overline{V_s}$  при АВ результирующая скорость является также постоянной величиной, как по значению, так и по направлению, и является неизменной на протяжении всего процесса. Это

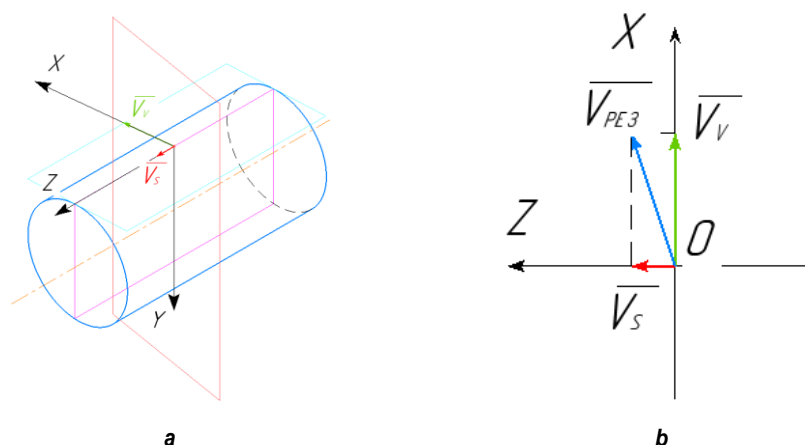


Рис. 6. Схема скоростей при выглаживании: а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента; б – пространственное расположение векторов скоростей обработки  
 Fig. 6. Diagram of velocities under burnishing: а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors

обуславливает сохранение условия контактирования деформатора с обрабатываемой деталью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа рассматриваемых методов ППД видно, что при сообщении инструменту УЗК наблюдаются следующие особенности обработки:

- сложная траектория движения инструмента относительно обрабатываемой детали;
- переменные по величине и направлению скорость и ускорение деформатора в процессе УЗПД;
- высокочастотное изменение кинематических параметров обработки;
- изменение угла ввода колебаний ( $\beta$ ) позволяет варьировать скоростью и ускорением инструмента, изменяя как их величину, так и направление.

Управление кинематическими и динамическими параметрами процесса обеспечивается за счет варьирования технологических параметров обработки. Как известно, любой метод обработки характеризуется технологическими параметрами, влияющими на параметры качества поверхностного слоя. Увеличение их числа расширяет возможности по управлению состоянием поверхностного слоя. Из анализа рассматриваемых методов технологическими параметрами являются:

АВ:  $V_V$ ,  $S$ ,  $r_q$ ,  $P_{CT}$ .

УЗПД по нормали:  $V_V$ ,  $S$ ,  $r_q$ ,  $P_{CT}$ ,  $f$ ,  $A$ .

УЗПД по касательной:  $V_V$ ,  $S$ ,  $r_q$ ,  $P_{CT}$ ,  $f$ ,  $A$ ,  $\beta$ , где  $P_{CT}$  – статическая нагрузка.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что каждый из приведенных методов обладает различным набором технологических параметров и разным характером движения деформирующего инструмента относительно обрабатываемой поверхности. При этом их наибольшее количество имеет УЗПД с вводом колебаний по касательной, что позволяет (путем варьирования условий обработки) управлять микрогеометрическим и физико-механическим состоянием поверхностного слоя в более широком диапазоне.

Дополнительно на основе кинематического анализа можно говорить о том, что изменение схемы ввода колебаний влияет на условия контактирования инструмента с деталью и позволяет изменять его с постоянно-го на циклический.

Наличие постоянного контакта деформатора с обрабатываемой деталью при УЗПД с вводом колебаний по касательной (аналогично и для АВ) позволяет сделать предположение о том, что данный метод применим для обработки металлов и сплавов различной твердости.

Поскольку технологические возможности УЗПД с вводом колебаний по касательной к



обрабатываемой поверхности недостаточно изучены, то их установление представляет научный и практический интерес. Дальнейшие исследования необходимы для опреде-

ления влияния процесса на итоговое состояние деформируемой детали и определения рациональной области применения данного метода.

### Список источников

1. Лещинский В. М., Рябичева Л. А., Механические свойства деформированной инструментальной стали // Вестник машиностроения. 1993. № 3. С. 88–94.
2. Муханов И. И. Ультразвуковая упрочняющая обработка стали и чугуна // Вестник машиностроения. 1968. № 6. С. 51–54.
3. Хлыбов А. А., Кувшинов М. О. Исследование влияния ультразвуковой обработки на структуру и свойства поверхностного слоя конструкционной стали 30ХГСА // Технология металлов. 2021. № 1. С. 12–16. <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-1-12-16>.
4. Хлыбов А. А., Кувшинов М. О. Исследование структуры поверхностного слоя стали 03Н18К9М5Т после ультразвуковой обработки // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 6. С. 100–106. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2019-16009>.
5. Rakhimyanov K. M., Semenova I. S. Surface state control by ultrasonic plastic deformation at the final machining stage // Materials and Manufacturing Processes. 2016. Vol. 31. Iss. 6. P. 764–769. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1058948>.
6. Семенова Ю. С., Самуль А. Г., Мажуга С. В. Применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования при модификации поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 5. С. 200–204.
7. Li Meiyan, Zhang Qi, Han Bin, Song Lixin, Li Jianlong, Yang Jie. Investigation on microstructure and properties of  $\text{Al}_x\text{CoCrFeMnNi}$  high entropy alloys by ultrasonic impact treatment // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 816. P. 152626. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152626>.
8. Kumar S., Wu C. S., Padhy G. K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review // Journal of Manufacturing Processes. 2017. Vol. 26. P. 295–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027>.
9. Zhou Changping, Jiang Fengchun, Xu De, Guo Chunhuan, Zhao Chengzhi, Wang Zhenqiang, et al. 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. P. 116599. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>.
10. Gujba A. K., Ren Zhencheng, Dong Yalin, Ye Chang, Medraj Mamoun. Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti–6Al–4V // Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 307. Part A. P. 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.054>.
11. Zhao Jingyi, Dong Yalin, Ye Chang. Optimization of residual stresses generated by ultrasonic nanocrystalline surface modification through analytical modeling and data-driven prediction // International Journal of Mechanical Sciences. 2021. Vol. 197. P. 106307. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106307>.
12. Kim Min-seob, Oh Wook-jin, Baek Gyeong-yoon, Jo Yeong-kwan, Lee Ki-yong, Park Sang-hu, et al. Ultrasonic nanocrystal surface modification of high-speed tool steel (AISI M4) layered via direct energy deposition // Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 277. P. 116420. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116420>.
13. Zhao Weidong, Liu Daoxin, Chiang Richard, Qin Haifeng, Zhang Xiao Hua, Zhang Hao, et al. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the surface integrity, microstructure, and wear resistance of 300M martensitic ultra-high strength steel // Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 285. P. 116767. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116767>.
14. Пегашкин В. Ф., Осипенкова Г. А. Выглаживание поверхности отверстий с использованием УЗ крутильных колебаний // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 4. С. 69–72.
15. Пегашкин В. Ф., Осипенкова Г. А., Кузнецов М. С. Модификации поверхности деталей из сплавов цветных металлов // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 7. С. 51–53.
16. Киселев Е. С., Степчева З. В. Эффективность касательно-осевых наложений ультразвуковых колебаний в процессе алмазного выглаживания стальных заготовок // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 7(31). С. 34–38.
17. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 971. No. 2. P. 022054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022054>.
18. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Ultrasonic surface hardening of low carbon steels and non-ferrous alloys // Innovations in Mechanical Engineering: X International Scientific and Practical MATEC Web Conference. 2019. Vol. 297. P. 05005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705005>.
19. Рахимьянов 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.
20. Одинцов Л. Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием. М.: Изд-во «Машиностроение», 1981. 160 с.

### References

1. Leshchinskij V. M., Ryabicheva L. A. Mechanical properties of deformed tool steel. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 1993;3:88-94. (In Russ.).
2. Mukhanov I. I. Ultrasonic hardening and finishing treatment of steel and cast iron. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 1968;6:51-54. (In Russ.).
3. Khlybov A. A., Kuvshinov M. O. Investigation of effect of ultrasonic treatment on structure and properties of surface layer of structural steel 30ХГСА. *Tekhnologiya metallov = Russian Metallurgy (Metally)*. 2021;1:12-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-1-12-16>.
4. Khlybov A. A., Kuvshinov M. O. Structural study of the surface layer of steel 03N18CO9MO5TI after ultrasonic treatment. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*. 2019;22(6):100-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2019-16009>.
5. Rakhimyanov K. M., Semenova I. S. Surface state control by ultrasonic plastic deformation at the final machining stage. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016;31(6):764-769. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1058948>.
6. Semenova Yu. S., Samul' A. G., Mazhuga S. V. Use of ultrasonic surface hardening in modification of surface layer. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2020;16(5):200-204. (In Russ.).
7. Li Meiyang, Zhang Qi, Han Bin, Song Lixin, Li Jianlong, Yang Jie. Investigation on microstructure and properties of Al<sub>x</sub>CoCrFeMnNi high entropy alloys by ultrasonic impact treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;816:152626. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152626>.
8. Kumar S., Wu C. S., Padhy G. K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;26:295-322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027>.
9. Zhou Changping, Jiang Fengchun, Xu De, Guo Chunhuan, Zhao Chengzhi, Wang Zhenqiang, et al. 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;280:116599. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>.
10. Gujba A. K., Ren Zhencheng, Dong Yalin, Ye Chang, Medraj Mamoun. Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti-6Al-4V. *Surface and Coatings Technology*. 2016;307(A):157-170. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.054>.
11. Zhao Jingyi, Dong Yalin, Ye Chang. Optimization of residual stresses generated by ultrasonic nanocrystalline surface modification through analytical modeling and data-driven prediction. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;197:106307. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106307>.
12. Kim Min-seob, Oh Wook-jin, Baek Gyeong-yoon, Jo Yeong-kwan, Lee Ki-yong, Park Sang-hu, et al. Ultrasonic nanocrystal surface modification of high-speed tool steel (AISI M4) layered via direct energy deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;277:116420. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116420>.
13. Zhao Weidong, Liu Daoxin, Chiang Richard, Qin Haifeng, Zhang Xiao Hua, Zhang Hao, et al. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the surface integrity, microstructure, and wear resistance of 300M martensitic ultra-high strength steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;285:116767. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116767>.
14. Pegashkin V. F., Osipenkova G. A. Surface drilling using ultrasonic torsional vibrations. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019;4:69-72. (In Russ.).
15. Pegashkin V. F., Osipenkova G. A., Kuznetsov M. S. Surface modification of non-ferrous metal alloy parts. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019;7:51-53. (In Russ.).
16. Kiselev E. S., Stepcheva Z. V. The efficiency of using the tangent-axial direction of ultrasonic fluctuations in process diamond burnishing. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2007;7(31):34-38. (In Russ.).
17. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;971(2):022054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022054>.
18. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Ultrasonic surface hardening of low carbon steels and non-ferrous alloys. In: *Innovations in Mechanical Engineering: X International Scientific and Practical MATEC Web Conference*. 2019;297:05005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705005>.
19. Rakhimyanov Kh. M., Gileta V. P., Samul A. G. Assurance of microgeometric state of parts surface made of plastic materials by ultrasonic machining. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2020;16(6):256-259. (In Russ.).
20. Odintsov L. G. *Finishing machining of parts with diamond burnishing*. Moscow: Mashinostroenie; 1981, 160 p. (In Russ.).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Самуль Артём Геннадьевич,**  
ассистент кафедры технологии  
машиностроения,  
Новосибирский государственный  
технический университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20, Россия

**Заявленный вклад автора**

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 30.11.2021; одобрена после рецензирования 26.01.2022; принята к публикации 20.02.2022.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Artyom G. Samul,**  
Assistant Professor of the Department  
of Mechanical Engineering Technology,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

**Contribution of the author**

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

**Conflict of interests**

The author declares no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by the author.*

**Information about the article**

The article was submitted 30.11.2021; approved after reviewing 26.01.2022; accepted for publication 20.02.2022.