

УДК 621.787.4

Анализ кинематики процесса упрочнения цилиндрических деталей геликоидным инструментом

С.А. Зайдес, Куанг Хай Ву

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Analysis of the kinematics of the process of hardening cylindrical parts with a helicoid tool

S.A. Zaides, Quang Khai Vu

Irkutsk National Research Technical University

Рассмотрены особенности кинематических характеристик рабочего инструмента геликоидной формы при проведении упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования. Процесс реализуется посредством обкатывания геликоидным инструментом поверхности заготовки в зоне контактного взаимодействия деформирующего элемента с обрабатываемой деталью. Исследование направлено на прогнозирование применимости этого метода для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей, таких как валы и оси. Проведен анализ кинематических параметров процесса геликоидного поверхностного пластического деформирования в декартовой системе координат, включая исследование составляющих движений заготовки и инструмента (вращательное, поступательное). Определены аналитические зависимости, характеризующие длину траектории деформации, значения результирующей скорости и ускорения, что позволяет целенаправленно управлять технологическими параметрами процесса и оптимизировать режимы обработки. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методов упрочняющей обработки и повышения эксплуатационных характеристик деталей машин.

EDN: GDAJGR, <https://elibrary/gdajgr>**Ключевые слова:** поверхностное пластическое деформирование, геликоидный инструмент, кинематика процесса упрочнения, поверхностный слой, цилиндрическая деталь

This paper considers the features of the kinematic characteristics of a helicoid working tool during hardening treatment by the helicoid surface plastic deformation method. The process is implemented by rolling the workpiece surface in the contact zone of the deforming element with the workpiece with a helicoid tool. The study is aimed at predicting the applicability of this method for finishing and hardening treatment of cylindrical parts, such as shafts and axles. The paper analyzes the kinematic parameters of the helicoid surface plastic deformation process in a Cartesian coordinate system, including a study of the components of the workpiece and tool movements (rotational, translational). Analytical dependencies characterizing the length of the deformation trajectory, the magnitude of the resulting velocity and acceleration are determined, which allows for targeted control of the process parameters and optimization of processing modes. The results can be used to improve the methods of hardening treatment and increase the performance characteristics of mechanical engineering parts.

EDN: GDAJGR, <https://elibrary/gdajgr>**Keywords:** surface plastic deformation, helicoid working tool, kinematics of the hardening process, surface layer, cylindrical part

Методы поверхностного пластического деформирования (ППД), такие как обкатывание, вибрационная, ультразвуковая, дробеметная и статико-импульсная обработка [1, 2], применяются для улучшения эксплуатационных свойств деталей машин путем упрочнения поверхностного слоя без изменения химического состава материала. К достоинствам ППД относятся повышение твердости и износостойкости, снижение шероховатости поверхности, улучшение усталостной прочности и формирование благоприятных остаточных напряжений [3–5]. Кроме того, они экологичны и сравнительно недороги.

Напряженно-деформированное состояние и качество упрочненного слоя во многом зависят от геометрических параметров рабочих инструментов (РИ). РИ с использованием шариков обеспечивают упрочнение и сглаживание поверхности за счет вдавливания свободно катящегося шарика. Шариковые инструменты получили широкое распространение при обработке отверстий, сложных внутренних и наружных поверхностей, включая гильзы, штоки, элементы гидравлических и пневматических систем [6, 7]. Однако традиционные шариковые инструменты имеют и недостатки. Это ограниченная глубина упрочненного слоя (обычно 0,5...2,0 мм), которой может быть недостаточно для деталей, работающих под действием высокой нагрузки, а также изменение их размеров и геометрических параметров, особенно при упрочнении нежестких цилиндрических изделий [8–10].

Роликовые устройства, относящиеся к эффективным РИ для ППД, обеспечивают упрочнение и сглаживание поверхности за счет контролируемого давления вращающихся элементов, что приводит к уплотнению структуры, снижению шероховатости и формированию благоприятных остаточных напряжений [11, 12].

Тороидальные ролики достаточно просты по конструкции, но эффективность упрочнения зависит от их диаметра и профильного радиуса. Малый профильный радиус обеспечивает более эффективное упрочнение поверхностного слоя, а большой радиус благоприятно сказывается на процессе сглаживания микронеровностей поверхности [13].

На практике ППД реализуют преимущественно по двум схемам обработки: качения и скольжения [14, 15]. При обработке по схеме

качения контакт между РИ (чаще всего роликом или шариком) и заготовкой происходит без относительного проскальзывания, что обеспечивает равномерное распределение остаточных напряжений сжатия, снижение шероховатости поверхности, а также повышение усталостной прочности. Если РИ вращается в одном направлении с заготовкой, то возникает большое трение между ним и обрабатываемой поверхностью, благодаря чему достигается более глубокое проникновение деформации в материал. При этом эффективность упрочнения растет, однако увеличивается риск локального перегрева и повышения шероховатости поверхности [16–18].

Исследование кинематики РИ в процессе ППД является важной задачей, так как именно параметры движения РИ и заготовки определяют интенсивность пластической деформации, глубину упрочненного слоя и стабильность технологического процесса.

Фундаментальное исследование кинематических схем механической обработки резанием было выполнено Г.И. Грановским. В области ППД кинематика процессов рассмотрена в работе [19]. Для интеграции процессов качения и скольжения разработан способ ППД, основанный на маятниковом движении секторального РИ [20]. Однако такие процессы при упрочнении происходят циклически, что не позволяет обеспечить однородность механических свойств поверхностного слоя.

Для устранения указанного недостатка разработан новый способ ППД, основанный на использовании РИ геликоидной формы [21]. Такой РИ реализует при обработке ППД процессы качения и скольжения непрерывно, что обеспечивает однородность механических свойств поверхностного слоя.

Цель работы — определение кинематики процесса при различных схемах реализации геликоидного ППД для оценки возможности применения нового способа упрочнения цилиндрических деталей типа вала и оси.

Схема геликоидного ППД. Такая схема представляет собой перспективный способ обработки металлических деталей, направленный на упрочнение поверхностного слоя воздействием деформирующего инструмента, движущегося по винтовой (геликоидной) траектории. Сущность способа заключается в том, что РИ с заданным контактным усилием обка-

тывает цилиндрическую заготовку и воздействует на ее поверхность, вызывая пластическую деформацию.

Геликоидное ППД осуществляется следующим образом. Заготовке 2 придают вращательное движение с частотой n_3 . РИ 4 прижимают к обрабатываемой поверхности с некоторым натягом t и одновременно сообщают продольную подачу $S_{пр}$ и вращательное движение $n_и$ вокруг своей оси (рис. 1).

Геликоидный инструмент выполнен в виде диска, винтовая рабочая поверхность которого состоит из двух витков с профильным радиусом $r_{пр}$ и шагом h .

Важная особенность геликоидного инструмента заключается в направлении витка. При вращении РИ возникает дополнительная составляющая сдвига из-за касательного движения относительно поверхности заготовки. Вектор сдвига будет направлен вдоль оси вращения РИ. Вследствие изменения направления витка изменяется направление дополнительной составляющей сдвига. При левом направлении витка и вращении РИ по ходу часовой стрелки вектор сдвига направлен влево, а при вращении РИ против хода часовой стрелки — вправо. При правом направлении витка и вращении по ходу часовой стрелки вектор сдвига направлен вправо, а при обратном направлении вращения РИ — влево.

Особенность новой кинематики деформирующего инструмента заключается в том, что при ППД геликоидный инструмент упрочняет всю цилиндрическую поверхность детали не только за счет продольной подачи от станка, но и за счет дополнительной подачи от шага РИ. Процесс деформирования осуществляется одновременно 2–3 витками, что обеспечивает высокое качество обработки и его производитель-

ность. Для оценки эффективности нового способа упрочнения необходимо рассмотреть кинематику процессов, происходящих при геликоидном ППД.

Кинематическое исследование геликоидных схем ППД. Анализ кинематических характеристик процессов ППД представляет собой важный этап при разработке и оптимизации технологии упрочняющей обработки. Он включает в себя изучение видов и параметров движения РИ и заготовки: скорости, подачи, траектории и характера взаимодействия между ними. Правильный выбор кинематической схемы позволяет обеспечить равномерное распределение деформаций, минимизировать шероховатость поверхности, повысить точность и снизить вероятность появления дефектов. Кроме того, анализ кинематики способствует увеличению эффективности процесса, обеспечивая требуемый уровень упрочнения при минимальных затратах времени и ресурса. Следовательно, понимание кинематических особенностей процесса геликоидного ППД является необходимым условием для прогнозирования состояния поверхностного слоя обрабатываемых изделий [22].

В целях изучения кинематики геликоидного ППД выполнены анализ и сравнение схем обработки. Для описания кинематических параметров процесса обработки тел вращения выбрана прямоугольная система координат (см. рис. 1), где ось x совпадает с направлением главного движения, ось z — с направлением движения подачи, а ось y имеет радиальное направление. Анализ проведен при условии, что РИ вращается и совершает подачу вдоль заготовки, которая вращается вокруг центральной оси. Диаметры РИ и заготовки приняты одинаковыми.

Для определения кинематических особенностей геликоидного инструмента рассмотрена кинематика процесса при использовании тороидального ролика, что позволило сравнить и оценить полученные результаты.

ППД по схеме качения тороидального ролика. Схема ППД качением представляет собой процесс, при котором РИ (обычно ролик или шарик) с определенным усилием прижимается к поверхности заготовки и катится по ней, вызывая пластическую деформацию поверхностного слоя (рис. 2). При движении РИ и заготовки в противоположных направлени-

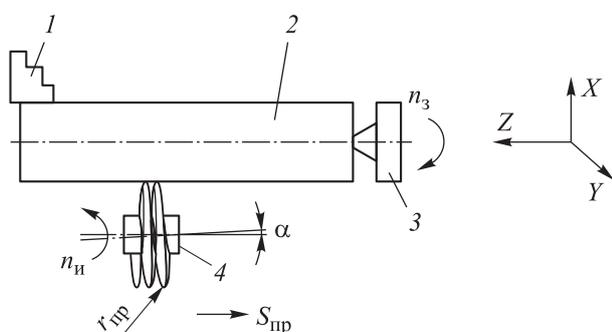


Рис. 1. Схема геликоидного ППД:

1 — трехкулачковый патрон; 2 — заготовка;
3 — задняя бабка; 4 — РИ

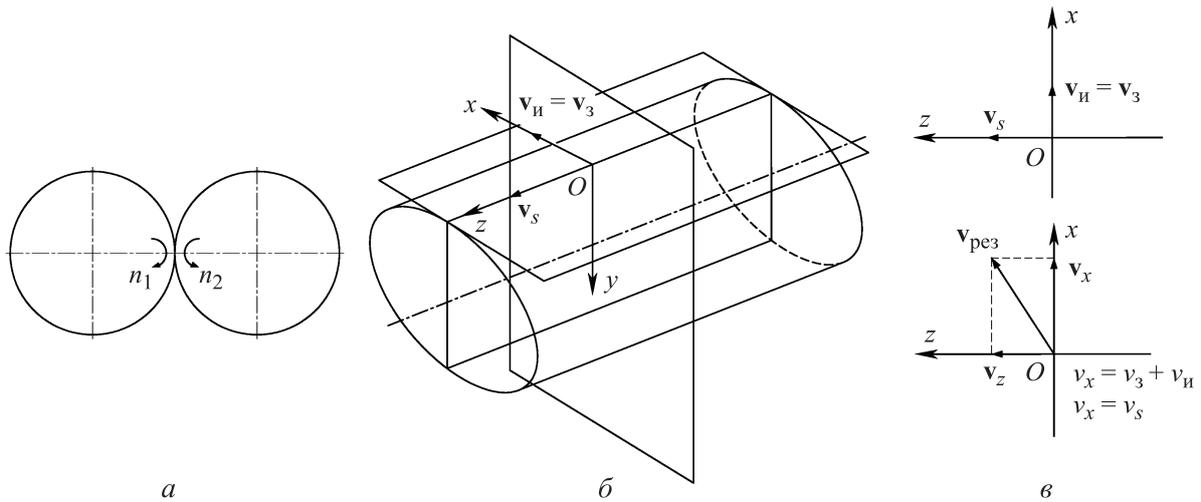


Рис. 2. Результаты кинематического исследования ППД по схеме качения тороидального ролика: а — схема качения; б — схема расположения векторов скоростей относительно точки контакта; в — проекции векторов скоростей на выбранную систему координат

ях их частоты вращения удовлетворяют соотношению

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1},$$

где n_1 , n_2 и D_1 , D_2 — частоты вращения и диаметры РИ и заготовки соответственно.

Так как диаметры РИ и заготовки одинаковые, их частоты вращения также равны ($n_1 = n_2$). Проекции составляющих траекторий РИ при ППД по схеме качения имеют следующий вид (см. рис. 2):

$$\begin{cases} L_x = v_3 t + v_n t; \\ L_y = 0; \\ L_z = v_s t, \end{cases}$$

где L_x , L_y и L_z — перемещение по осям x , y и z соответственно; v_3 и v_n — скорости заготовки и РИ; v_s — скорость подачи стола; t — время обработки.

Результирующая скорость определяется выражением

$$v_{\text{рез}} = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} = \sqrt{(v_3 + v_n)^2 + v_s^2},$$

где v_x и v_z — суммарные составляющие результирующей скорости по осям x и z .

Диаметры РИ и заготовки одинаковые, поэтому $v_n = v_3$. Тогда по оси x суммарная скорость равна $2v_n$, следовательно, результирующая скорость

$$v_{\text{рез}} = \sqrt{(2v_n)^2 + v_s^2}.$$

Ускорение направлено к центру заготовки и определяется как

$$j = \frac{v_x^2}{R_2} = \frac{(v_n + v_3)^2}{R_2} = \frac{(2v_n)^2}{R_2},$$

где R_2 — радиус заготовки.

ППД по схеме скольжения тороидального ролика. Схема ППД скольжением представляет собой процесс, при котором поверхность заготовки подвергается пластической деформации под действием усилия РИ, движущегося по поверхности с относительным скользящим движением. РИ вращается в том же направлении, что и заготовка. В отличие от ППД качением, где контакт имеет точечный или линейный характер, при ППД скольжением деформация происходит по более широкой зоне контакта вследствие трения, что оказывает влияние на распределение напряжений. При скольжении напряжения распределяются более равномерно, но поверхность подвергается большому трению, что может вызывать поверхностный износ.

Согласно рис. 3, результирующая скорость

$$v_{\text{рез}} = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} = \sqrt{(v_n - v_3)^2 + v_s^2}.$$

При одинаковых частотах вращения РИ и заготовки справедливы соотношения

$$v_3 = v_{ix}; \quad v_{\text{рез}} = v_s,$$

где v_{ix} — скорость поступательного движения РИ вдоль оси x .

Ускорение направлено к центру заготовки

$$j = \frac{v_x^2}{R_2} = \frac{(v_n - v_3)^2}{R_2}. \quad (1)$$

Так как $v_3 = v_{ix}$, ускорение $j = 0$.

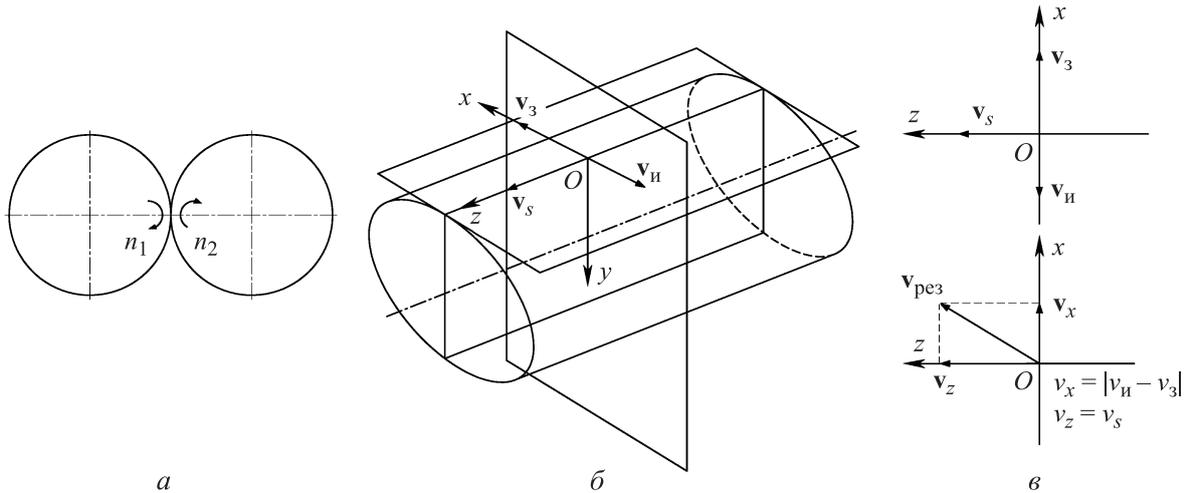


Рис. 3. Результаты кинематического исследования ППД по схеме скольжения тороидального ролика: а — схема скольжения; б — схема расположения векторов скоростей относительно точки контакта; в — проекции векторов скоростей на выбранную систему координат

По сравнению со схемой ППД качением при ППД скольжением результирующая скорость меньше по значению и зависит от составляющих v_s , $v_{и}$ и v_3 , которые определяются режимами обработки. Варьируя их можно управлять параметрами $v_{рез}$ в более широком диапазоне. Результирующая скорость $v_{рез}$ и ускорение j будут оказывать влияние на интенсивность и направление течения материала в очаге деформации, что приведет к изменению физико-механических свойств и микронеровности поверхности заготовки.

Таким образом, при ППД по схеме скольжения, результирующая скорость и ускорение меньше, чем при ППД по схеме качения.

В то же время эффективность упрочняющего воздействия существенно зависит от возможности формирования не только радиального давления, но и направленного сдвига по касательной к поверхности детали. Рассмотрим особенности кинематики деформирования при различных направлениях витка РИ и соотношениях направлений вращения РИ и заготовки, что позволит детально оценить влияние каждого параметра на кинематическую характеристику процесса упрочнения.

ППД при левом направлении рабочего витка РИ. Одним из важных параметров геликоидного инструмента является направление деформирующего витка. Правое направление витка принято по ходу часовой стрелки, левое — против ее хода. Вследствие винтовой конфигурации РИ при ППД контакт между РИ и заготовкой происходит не в одном месте,

а постоянно движется вдоль оси вращения РИ.

Направления вращения РИ и заготовки одинаковые. Согласно рис. 4, проекции составляющих траектории РИ на оси координат x , y и z при ППД имеют следующий вид:

$$\begin{cases} L_x = 2(v_3 + v_{иx})t; \\ L_y = 0; \\ L_z = 2(v_s + v_{иz})t, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$v_3 = \pi D_2 n_2; \quad v_{иx} = \pi D_1 n_1;$$

$v_{иz}$ — скорость поступательного движения РИ вдоль оси z ,

$$v_{иz} = hn_1.$$

Геликоидный инструмент создает вдоль оси вращения дополнительную составляющую сдвига, скоростью которой является составляющая скорости РИ вдоль оси вращения Oz $v_{иz}$ (рис. 4, б). Соотношение направлений сдвига и подачи будет оказывать немалое влияние на физико-механические свойства материала и микронеровности поверхности заготовки.

Движение точки по геликоиду представляет собой сочетание вращательного и поступательного движений. По мере того как точка контакта перемещается вдоль оси z , она одновременно вращается вокруг оси геликоида z . Точка описывает окружность в вертикальной плоскости, поднимаясь или опускаясь по горизонтали. Проекция вектора скорости РИ на оси Ox и Oz соответствуют окружной и поступательной

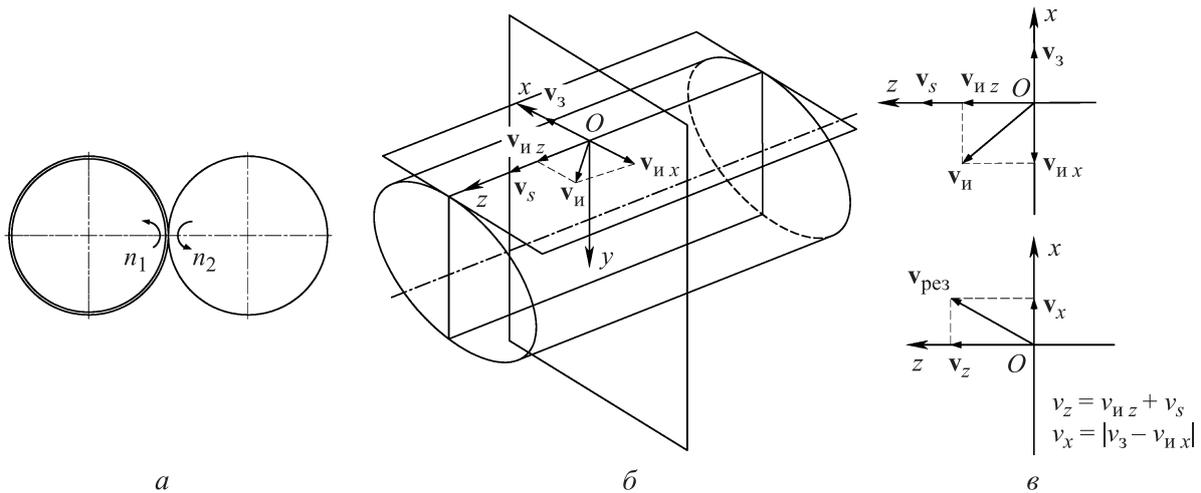


Рис. 4. Результаты кинематического исследования ППД при левом направлении витка РИ и одинаковых направлениях вращения РИ и заготовки:
 а — схема обработки; б — схема расположения векторов скоростей относительно точки контакта; в — проекции векторов скоростей на выбранную систему координат

(осевой) составляющей скорости. Суммарная скорость

по оси z

$$v_z = v_s + v_{nz} = v_s + hn_1;$$

по оси x

$$v_x = |v_3 - v_{nx}|.$$

Тогда результирующая скорость

$$v_{рез1} = 2\sqrt{v_x^2 + v_z^2} = 2\sqrt{(v_3 - v_{nx})^2 + (v_s + v_{nz})^2}. \quad (3)$$

При одинаковых частотах вращения РИ и заготовки ($v_3 = v_{nx}$), выражение (3) приобретает вид

$$v_{рез} = 2(v_s + v_{nz}).$$

Сравнивая выражения (1) и (2), можно заметить, что при одинаковых частотах вращения результирующая скорость имеет наименьшее значение. Ускорение

$$j_1 = \frac{dv_{рез}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}.$$

Ускорение обусловлено вращательным движением и определяется как

$$j_1 = 2 \frac{v_x^2}{R_2} = 2 \frac{(v_3 - v_{nx})^2}{R_2}.$$

Так как $v_3 = v_{nx}$, ускорение $j_1 = 0$.

Направления вращения РИ и заготовки противоположны. При геликоидном ППД вращение РИ относительно оси z выполняет функцию дополнительной подачи. Известно, что направление поступательного движения РИ

зависит от направления его вращения. При изменении направлении вращения РИ вектор скорости поступательного движения v_{nz} направлен в обратную сторону (рис. 5), т. е. направление дополнительной подачи противоположно направлению подачи от станка.

Вектор скорости поступательного движения РИ по оси x v_{nx} имеет одинаковое направление с вектором скорости заготовки, поэтому суммарная скорость движения РИ по оси x

$$v_x = v_3 + v_{nx},$$

а по оси z

$$v_z = |v_s - v_{nz}|.$$

Следовательно, результирующая скорость

$$v_{рез2} = 2\sqrt{v_x^2 + v_z^2} = 2\sqrt{(v_3 + v_{nx})^2 + (v_s - v_{nz})^2}, \quad (4)$$

а ускорение

$$j_2 = \frac{dv_{рез}}{dt}.$$

Так как по оси z движение равномерное, ускорение по оси z равно нулю, а наличие вращательного движения обусловлено ускорением

$$j_2 = \frac{dv_x}{dt} = \frac{2(v_3 + v_{nx})^2}{R_2} = \frac{2(v_3 + \pi D_1 n_1)^2}{R_2}.$$

Отсюда следует, что ускорение зависит от частоты вращения заготовки, диаметра и частоты вращения РИ. Сравнение ускорений j_1 и j_2 показывает, что при противоположных

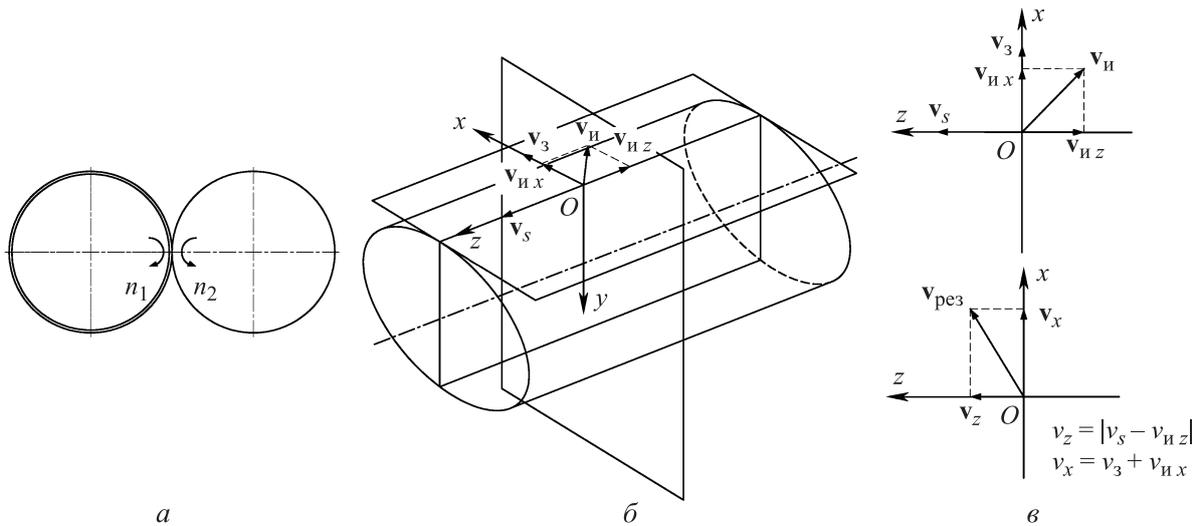


Рис. 5. Результаты кинематического исследования ППД при левом направлении витка РИ и противоположных направлениях вращения РИ и заготовки:
 а — схема обработки; б — схема расположения векторов скоростей относительно точки контакта; в — проекции векторов скоростей на выбранную систему координат

направлениях вращения заготовки и РИ ускорение j_2 больше j_1 .

Следует отметить, что направление вращения РИ оказывает влияние на результирующую скорость, ускорение и направление дополнительной подачи, а следовательно, и на напряженно-деформированное состояние детали.

ППД при правом направлении витка РИ.
 Направления вращения РИ и заготовки противоположные. Согласно рис. 6, составляющие траектории РИ при ППД определяются выражениями

$$\begin{cases} L_x = 2(v_3 + v_{Иx})t; \\ L_y = 0; \\ L_z = 2(v_s + v_{Иz})t. \end{cases}$$

Так как РИ и заготовка вращаются в противоположных направлениях, суммарная скорость движения по оси x

$$v_x = v_3 + v_{Иx},$$

а по оси z

$$v_z = v_s + v_{Иz}.$$

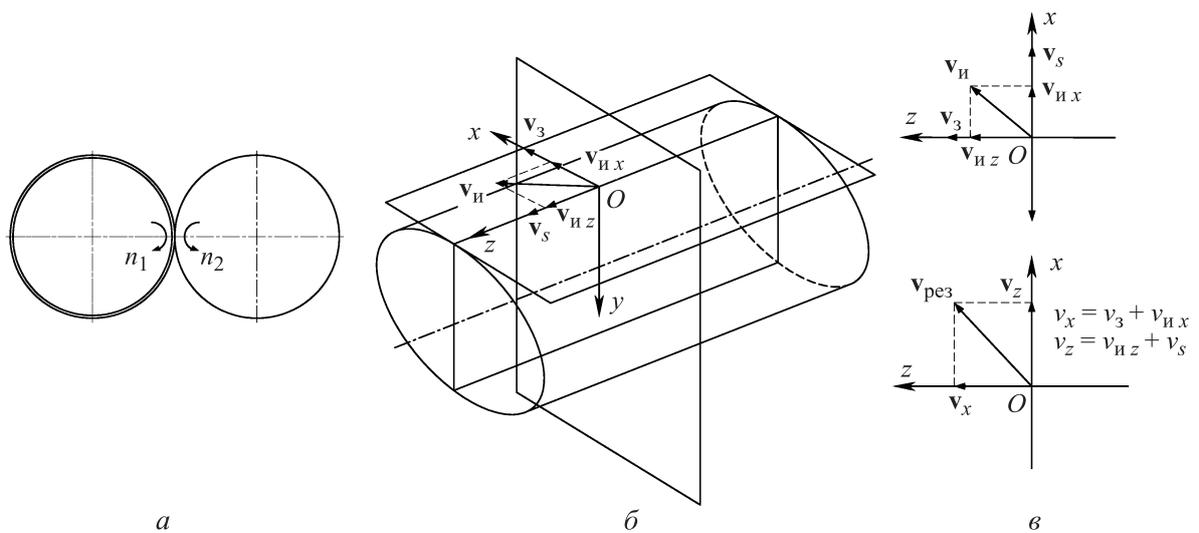


Рис. 6. Результаты кинематического исследования ППД при правом направлении витка РИ и противоположных направлениях вращения РИ и заготовки:
 а — схема обработки; б — схема расположения векторов скоростей относительно точки контакта; в — проекции векторов скоростей на выбранную систему координат

Следовательно, результирующая скорость

$$\begin{aligned} v_{\text{рез3}} &= 2\sqrt{v_x^2 + v_z^2} = 2\sqrt{(v_3 + v_{\text{иx}})^2 + (v_s + v_{\text{иz}})^2} = \\ &= 2\sqrt{(\pi D_2 n_2 + \pi D_1 n_1)^2 + (v_s + h n_1)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Результирующая скорость расположена на плоскости xOz , что обеспечивает стабильность нормального составляющего давления и постоянный контакт РИ с поверхностью обрабатываемой детали. Можно управлять результирующей скоростью по значениям параметров n_1 , n_2 и v_s . Вращательное движение заготовки обусловлено наличием ускорения, которое направлено к центру окружности (радиальное ускорение), т. е. возникает центростремительное ускорение. По оси z ускорения нет, потому что движение равномерное. Ускорение определяется уравнением

$$j_3 = \frac{2v_x^2}{R_2} = \frac{2(v_3 + v_{\text{иx}})^2}{R_2} = \frac{2(\pi D_2 n_2 + \pi D_1 n_1)^2}{R_2}.$$

Направления вращения РИ и заготовки одинаковы. При одинаковых направлениях вращения РИ и заготовки (рис. 7) суммарные скорости движения имеют вид

$$v_z = |v_s - v_{\text{иz}}|; \quad v_x = |v_3 - v_{\text{иx}}|.$$

Тогда результирующая скорость

$$\begin{aligned} v_{\text{рез4}} &= 2\sqrt{v_x^2 + v_z^2} = 2\sqrt{(v_3 - v_{\text{иx}})^2 + (v_s - v_{\text{иz}})^2} = \\ &= 2\sqrt{(\pi D_2 n_2 - \pi D_1 n_1)^2 + (v_s - h n_1)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Так как движение равномерное, по оси z ускорение отсутствует, а следовательно, ускорение

$$j_4 = \frac{2v_x^2}{R_2} = \frac{2(v_3 - v_{\text{иx}})^2}{R_2} = \frac{2(\pi D_2 n_2 - \pi D_1 n_1)^2}{R_2}.$$

При одинаковых частотах вращения РИ и заготовки ($v_3 = v_{\text{иx}}$) результирующая скорость

$$v_{\text{рез4}} = 2|v_s - h n_1|,$$

а ускорение

$$j_4 = 0.$$

Анализ кинематических схем показывает, что при геликоидном ППД возникает горизонтальная составляющая сдвига $v_{\text{иz}}$ вдоль оси вращения РИ, в отличие от процесса ППД тороидальным роликом, где деформация идет почти строго нормально к поверхности. Вследствие горизонтального сдвига РИ не существует чистого ППД качением при геликоидном ППД. Этот сдвиг может ориентировать зерна материала вдоль поверхности заготовки, тем самым увеличивая степень измельчения структуры.

Сравнение ускорений показывает, что $j_1 = j_4$ и $j_2 = j_3$, т. е. независимо от направления витка РИ ускорения будут одинаковыми при одинаковой кинематике. Из выражений (3)–(6) следует, что при ППД с правым направлением витка РИ и противоположными направлениями вращения РИ и заготовки (см. рис. 6) результирующая скорость имеет наибольшее значение, а при ППД с одинаковыми направлениями РИ и заготовки —

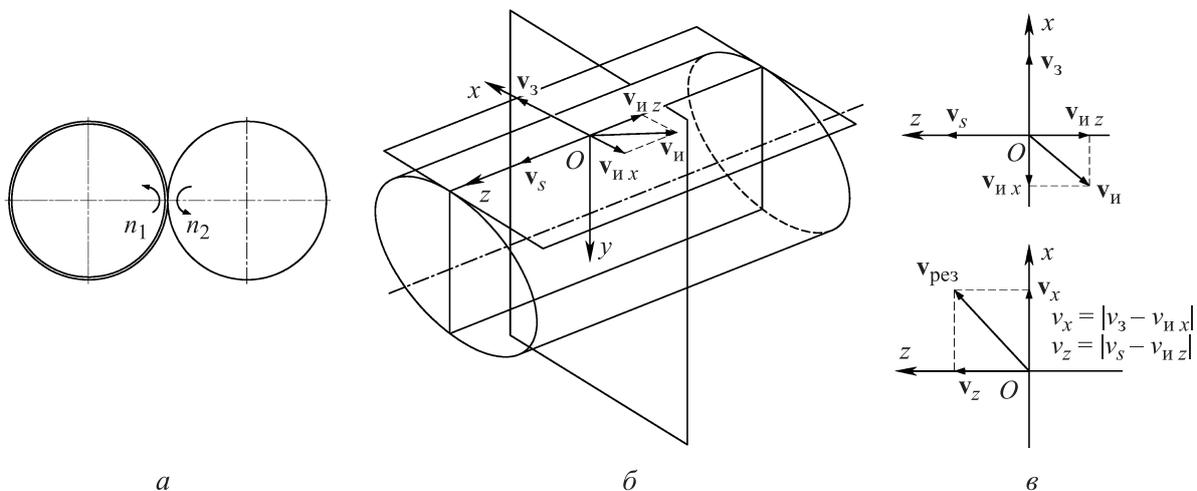


Рис. 7. Результаты кинематического исследования ППД при правом направлении витка РИ и одинаковых направлениях вращения РИ и заготовки:

a — схема обработки; *б* — схема расположения векторов скоростей относительно точки контакта; *в* — проекции векторов скоростей на выбранную систему координат

наименьшее. Поэтому при геликоидном ППД рационально выбрать правое направление витка РИ и противоположные направления вращения РИ и заготовки.

Выводы

1. Установлено, что при геликоидном ППД возникает горизонтальная составляющая сдвига вдоль поверхности заготовки. Это позволяет сделать предположение о том, что геликоидное ППД способствует достижению более интенсивного упрочнения, равномерного накопления деформаций и интенсивного измельчения зеренной структуры материала.

2. Определено, что результирующую скорость и ускорение процесса упрочнения можно регулировать технологическими параметрами обработки. При ППД по схеме качения тороидальным роликом можно управлять процессом упрочнения двумя скоростями: РИ и подачи, а при ППД по схеме скольжения тороидальным

роликом — тремя скоростями: РИ, заготовки и подачи. А при геликоидном ППД можно управлять процессом упрочнения по четырем скоростям: РИ по осям x и z , заготовки и подачи.

3. В зависимости от направлений витка и вращения геликоидного инструмента происходят разные движения деформирующего инструмента относительно обрабатываемой поверхности и направления горизонтального сдвига. Выявлено, что геликоидный инструмент с правым направлением витка при вращении в противоположную сторону с заготовкой создаст наибольшие значения результирующей скорости и центростремительного ускорения, а при вращении в одну сторону с заготовкой — наименьшие. Рациональными технологическими параметрами при геликоидном ППД являются правое направление витка при противоположных направлениях вращения РИ и заготовки. Причем заготовка вращается против хода часовой стрелки, а РИ — по ее ходу.

Литература

- [1] Зайдес С.А., ред. *Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования*. Т. 1. Иркутск, Изд-во ИРНИТУ, 2021. 504 с.
- [2] Суслов А.Г., ред. *Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2014. 478 с.
- [3] Nie N., Su L., Deng G. et al. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials. *J. Mater. Res. Technol.*, 2021, vol. 15, pp. 6574–6607, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087>
- [4] Отений Я.Н., Привалов Н.И., Щеголев Н.Г. и др. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2016, № 12–3, с. 452–455.
- [5] Wu I., Liu H., Wei P. et al. Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel. *Int. J. Mech. Sci.*, 2020, vol. 183, art. 105785, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785>
- [6] Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. *Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2007. 399 с.
- [7] 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. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 68-A, pp. 1086–1099, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033>
- [8] Кабатов А.А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, 2013, № 58, с. 49–54
- [9] Ежелев А.В., Бобровский И.Н., Лукьянов А.А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием. *Фундаментальные исследования*, 2012, № 6–3, 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 Eng.*, 2021, vol. 231, art. 108839, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108839>

- [11] Отений Я.Н. Влияние параметров деформирующих роликов на геометрию контакта и глубину упрочнения при обработке ППД валов и отверстий. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2006, № 4, с. 8–10.
- [12] Кокорева О.Г. Оценка напряженного состояния при упрочнении поверхностно-пластической деформацией. *Журнал передовых исследований в области естествознания*, 2021, № 12, с. 4–6, doi: <https://doi.org/10.26160/2572-4347-2021-12-4-6>
- [13] Zhou C., Jiang F., Xu D. 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. *J. Mater. Process. Technol.*, 2020, vol. 280, art. 116599, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>
- [14] Ma C., Suslov S., Ye C. et al. Improving plasticity of metallic glass by electropulsing-assisted surface severe plastic deformation. *Mater. Des.*, 2019, vol. 165, art. 107581, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107581>
- [15] Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 971, art. 022054, doi: <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, doi: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-5-200-204>
- [17] 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.
- [18] Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 126, no. 1, art. 012004, pp. 120–123, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004>
- [19] 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>
- [20] Зайдес С.А., Хо М.К. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2022, т. 65, № 5, с. 344–353, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353>
- [21] Зайдес С.А., Ву К.Х. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения. Патент РФ 2824641. Заявл. 15.03.2024, опубл. 12.08.2024.
- [22] Qiu P., Meng B., Xu S. et al. Evolution and control of deformation mechanisms in micro-grooving of Zr-based metallic glass. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 68-A, pp. 923–931, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.012>

References

- [1] Zaydes S.A., ed. *Spravochnik po protsessam poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya*. T. 1 [Handbook of surface plastic deformation processes. Vol. 1]. Irkutsk, Izd-vo IRNITU Publ., 2021. 504 p. (In Russ.).
- [2] Suslov A.G., ed. *Tekhnologiya i instrumenty otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem*. T. 1 [Technology and tools of finishing and strengthening machining of parts by surface plastic deformation. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 478 p. (In Russ.).
- [3] Nie N., Su L., Deng G. et al. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials. *J. Mater. Res. Technol.*, 2021, vol. 15, pp. 6574–6607, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087>
- [4] Otений Ya.N., Privalov N.I., Shchegolev N.G. et al. Features of the formation of the depth of hardening during the machining of parts by surface plastic deformation. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2016, no. 12–3, pp. 452–455. (In Russ.).

- [5] Wu I., Liu H., Wei P. et al. Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel. *Int. J. Mech. Sci.*, 2020, vol. 183, art. 105785, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785>
- [6] Blyumenshteyn V.Yu., Smelyanskiy V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin* [Mechanics of technological inheritance at the stages of machining and operation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 399 p. (In Russ.).
- [7] 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. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 68-A, pp. 1086–1099, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033>
- [8] Kabatov A.A. Analysis of surface plastic deformation finishing methods. *Otkrytye informatsionnye i kompyuternye integrirovannye tekhnologii* [Open Information and Computer Integrated Technologies], 2013, no. 58, pp. 49–54. (In Russ.).
- [9] Ezhelev A.V., Bobrovskiy I.N., Lukyanov A.A. Analysis of processing ways by superficial and plastic deformation. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Researches], 2012, no. 6–3, pp. 642–646. (In Russ.).
- [10] Li S., Kim D.K., Benson S. The influence of residual stress on the ultimate strength of longitudinally compressed stiffened panels. *Ocean Eng.*, 2021, vol. 231, art. 108839, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108839>
- [11] Oteniy Ya.N. Influence of parameters of deformation rollers on geometry of contact and depth of strengthening at handling shafts and holes by surface plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2006, no. 4, pp. 8–10. (In Russ.).
- [12] Kokoreva O.G. Estimation of the stress state during strengthening by surface-plastic deformation. *Zhurnal peredovykh issledovaniy v oblasti estestvoznaniya* [Journal of Advanced Research in Natural Science], 2021, no. 12, pp. 4–6, doi: <https://doi.org/10.26160/2572-4347-2021-12-4-6> (In Russ.).
- [13] Zhou C., Jiang F., Xu D. 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. *J. Mater. Process. Technol.*, 2020, vol. 280, art. 116599, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>
- [14] Ma C., Suslov S., Ye C. et al. Improving plasticity of metallic glass by electropulsing-assisted surface severe plastic deformation. *Mater. Des.*, 2019, vol. 165, art. 107581, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107581>
- [15] Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 971, art. 022054, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022054>
- [16] Semenova Yu.S., Samul A.G., Mazhuga A.G. Use of ultrasonic surface hardening in modification of surface layer. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2020, vol. 16, no. 5, pp. 200–204, doi: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-5-200-204> (In Russ.).
- [17] 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, vol. 16, no. 6, pp. 256–259. (In Russ.).
- [18] Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 126, no. 1, art. 012004, pp. 120–123, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004>
- [19] 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>
- [20] Zaydes S.A., Kho M.K. Pendulum surface plastic deformation of cylindrical blanks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2022, vol. 65, no. 5, pp. 344–353, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353> (in Russ.).

- [21] Zaydes S.A., Vu K.Kh. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya naruzhnykh poverkhnostey tel vrashcheniya* [Method of surface plastic deformation of external surfaces of solids of revolution]. Patent RU 2824641. Appl. 15.03.2024, publ. 12.08.2024. (In Russ.).
- [22] Qiu P., Meng B., Xu S. et al. Evolution and control of deformation mechanisms in micro-grooving of Zr-based metallic glass. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 68-A, pp. 923–931, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.012>

Статья поступила в редакцию 16.05.2025

Информация об авторах

ЗАЙДЕС Семен Азикович — доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: zsa@ex.istu.edu).

ВУ Куанг Хай — аспирант кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: vuquangkhai98hp@gmail.com).

Information about the authors

ZAIDES Semyon Azikovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: zsa@ex.istu.edu).

VU Quang Khai — Postgraduate, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: vuquangkhai98hp@gmail.com).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Ву Куанг Хай. Анализ кинематики процесса упрочнения цилиндрических деталей геликоидным инструментом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 2, с. 41–52.

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Vu Quang Khai. Analysis of the kinematics of the process of hardening cylindrical parts with a helicoid tool. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 2, pp. 41–52.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Проектирование непрерывных технологических процессов»

Авторы: В.В. Стулов, А.Г. Колесников

Приведен состав оборудования машины непрерывного литья заготовок и литейно-прокатного агрегата, рассмотрено моделирование затвердевания непрерывнолитой заготовки и моделирование охлаждения кристаллизатора, описаны печи для выплавки стали и для ее обработки, а также основное и вспомогательное оборудование.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» (уровень магистратуры). Может быть использовано при курсовом и дипломном проектировании, а также при выполнении домашних заданий.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>