

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ГЕЛИКОИДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Ву Куанг Хай¹, Зайдес С.А.¹, Лэ Фьонг Май²

*¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск;*

²Хайфонский университет, Хайфон, Вьетнам

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, геликоидный рабочий инструмент, кинематика процесса упрочнения, временные напряжения, компьютерное моделирование, поверхностный слой, цилиндрическая деталь.

Аннотация. В работе рассматриваются 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 данного метода для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей, таких как валы и оси. В работе 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, величину результирующей скорости и ускорения, что позволяет целенаправленно управлять технологическими параметрами процесса и оптимизировать режимы обработки.

THEORETICAL INVESTIGATION OF KINEMATIC PATTERNS IN HELICOIDAL SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Vu Quang Khai¹, Zaides S.A.¹, Le Phuong Mai²

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk;

²Haiphong University, Haiphong City, Vietnam

Keywords: surface plastic deformation, helicoid working tool, kinematics of the hardening process, temporary stresses, computer modeling, surface layer, cylindrical part.

Abstract. This paper examines the kinematic characteristics of a helicoidal working tool during hardening treatment using surface plastic deformation. The process is implemented by rolling a helicoidal tool onto the workpiece surface in the contact zone between the deforming element and the workpiece. The study aims to predict 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 helicoidal surface plastic deformation process in a Cartesian coordinate system, including a study of the components of workpiece and tool motion (rotational and translational). Analytical relationships characterizing the length of the deformation trajectory, the magnitude of the resulting velocity, and acceleration are determined, enabling targeted control of process parameters and optimization of machining modes.

В технологической практике поверхностное пластическое деформирование (ППД) реализуется преимущественно по двум схемам обработки: качения и скольжения [1]. При обработке по схеме качения контакт между инструментом

(чаще всего – роликом или шариком) и деталью происходит без относительного проскальзывания, что обеспечивает равномерное распределение остаточных сжимающих напряжений, снижение шероховатости поверхности, а также повышение усталостной прочности. При схеме скольжения инструмент вращается в одном направлении с заготовкой, что предполагает большое трение между инструментом и обрабатываемой поверхностью, за счёт чего достигается более глубокое проникновение деформации в материал. При этом возможно более эффективное упрочнение, однако увеличивается риск локального перегрева и повышения шероховатости поверхности [2].

Авторами данной статьи разработан новый способ ППД, основанный на использовании рабочего инструмента геликоидной формы [3].

Исследование кинематики рабочего инструмента в процессе ППД является важной задачей, поскольку именно параметры движения инструмента и заготовки определяют интенсивность пластической деформации, глубину упрочненного слоя, а также стабильность технологического процесса.

Целью данной работы является определение кинематики процесса геликоидного ППД для оценки возможности применения нового способа упрочнения цилиндрических деталей типа валов и осей.

Схема геликоидного поверхностного пластического деформирования

Способ геликоидного поверхностного пластического деформирования осуществляется следующим образом: заготовке 2 придают вращательное движение с частотой $n_{\text{заг}}$ (об/мин). Рабочий инструмент прижимают к обрабатываемой поверхности с некоторым натягом t . Инструменту 1 одновременно сообщают продольную подачу $S_{\text{пр}}$, и вращательное движение $n_{\text{ин}}$ вокруг своей оси (рис. 1). Геликоидный инструмент выполнен в виде диска, рабочая поверхность которого представляет собой винтовую поверхность, состоящую из двух витков с профильным радиусом $r_{\text{пр}}$ и шагом h .

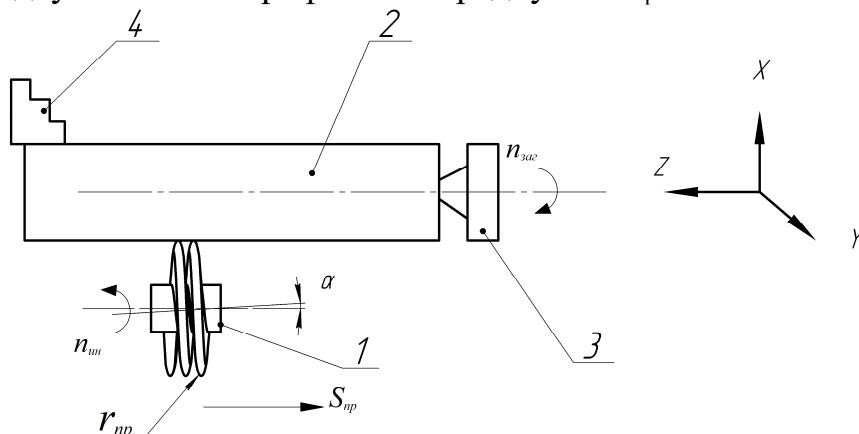


Рис. 1. Схема геликоидного поверхностного пластического деформирования:
1 – инструмент, 2 – заготовка, 3 – задняя бабка, 4 – трёхкулачковый патрон

Особенность новой кинематики деформирующего инструмента заключается в том, что при поверхностном пластическом деформировании инструмент упрочняет всю цилиндрическую поверхность детали не только за счет продольной подачи от станка, а еще за счет дополнительной подачи от шага рабочего инструмента. Следует отметить, что процесс деформирования осуществляется

одновременно двумя витками, что обеспечивает высокое качество обработки и производительность процесса. Для оценки эффективности нового способа упрочнения необходимо рассмотреть кинематику процессов, происходящих при геликоидном ППД.

Кинематическое исследование геликоидных схем ППД

Для оценки особенностей кинематики геликоидного инструмента, рассмотрена кинематика процесса при использовании тороидального ролика, что позволяет сравнить и оценить полученные результаты.

ППД по схеме качения тороидального ролика. Схема поверхностного пластического деформирования качением представляет собой процесс, при котором рабочий инструмент (обычно ролик или шарик) с определённым усилием прижимается к поверхности заготовки и катится по ней, вызывая пластическую деформацию поверхностного слоя (рис. 2). При движении рабочего инструмента и заготовки во взаимно противоположных направлениях, их частоты вращения удовлетворяют соотношению: $\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$, где n_1 и n_2 – частоты вращения

инструмента и заготовки соответственно, а d_1 и d_2 – их соответствующие диаметры. Так как диаметры инструмента и заготовки одинаковые, поэтому частоты вращения инструмента и заготовки также равны ($n_1 = n_2$). Проекции составляющих траекторий рабочего инструмента при ППД по схеме качения имеют следующий вид (рис. 2):

$$\begin{cases} L_x = \vec{V}_3 t + \vec{V}_и t, \\ L_y = 0, \\ L_z = \vec{V}_s t, \end{cases}$$

где L_x, L_y, L_z – перемещение по осям X, Y, Z ; V_3 – скорость заготовки; $V_и$ – скорость инструмента; V_s – скорость подачи; t – время обработки.

Результирующая скорость определяется по формуле:

$$V_{рез} = \sqrt{V_x^2 + V_z^2};$$

$$V_{рез} = \sqrt{(V_3 + V_и)^2 + V_s^2}.$$

где V_x, V_z – суммарная составляющая скорость по оси X и оси Z .

Так как диаметр инструмента и заготовки одинаковые значит $V_и = V_3$ тогда по оси X суммарная скорость равна $2V_и$. Следовательно, результирующая скорость равна:

$$V_{рез} = \sqrt{(2V_и)^2 + V_s^2}. \quad (1)$$

Ускорение направлен к центру заготовки

$$j = \frac{V_x^2}{R_2} = \frac{(V_и + V_3)^2}{R_2} = \frac{(2V_и)^2}{R_2}, \quad (2)$$

где R_2 – радиус детали.

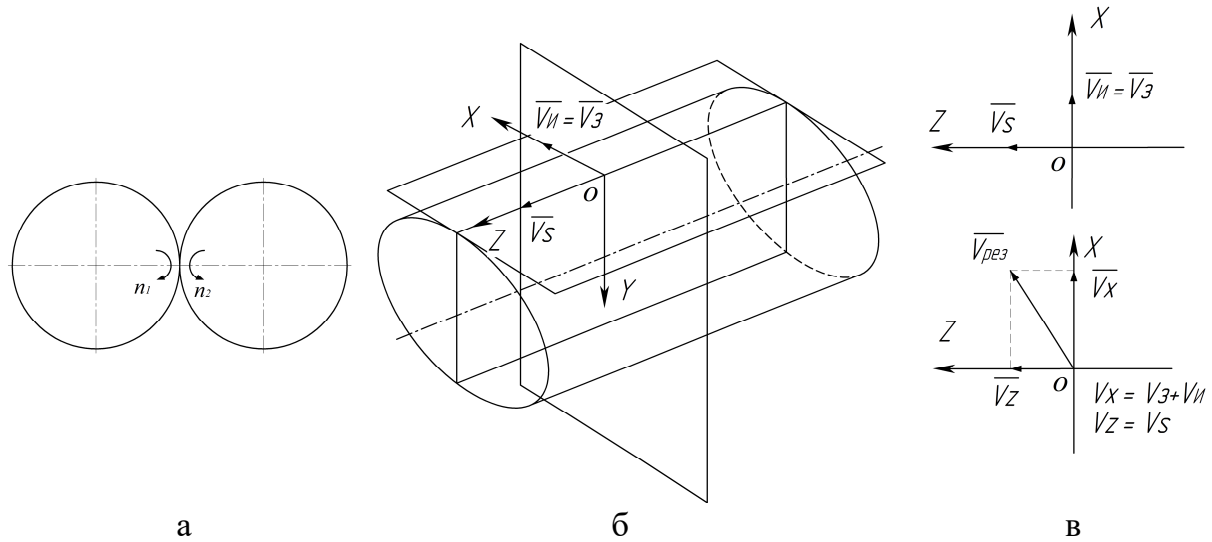


Рис. 2. Схема векторов скоростей при качении тороидального ролика:
а – схема качения, б – размещение векторов скоростей относительно точки контакта,
в – проекции векторов скоростей на выбранную систему координат

Кинематическая схема ППД геликоидным инструментом. На рисунке 3 представлена схема векторов скоростей при противоположном направлении вращения инструмента и заготовки.

Анализируя рис. 3 можно отметить, что составляющие траектория рабочего инструмента при ППД следующий вид:

$$\begin{cases} L_x = 2(\vec{V}_3 + \vec{V}_{ix})t, \\ L_y = 0, \\ L_z = 2(\vec{V}_s + \vec{V}_{iz})t, \end{cases}$$

где V_s – скорость подачи, $V_3 = \pi D_2 n_2$ – скорость заготовки, $V_{iz} = h n_1$, $V_{ix} = \pi D_1 n_1$ – скорость инструмента по оси X , n_1 – частота вращения инструмента, n_2 – частота вращения заготовки, D_1 – диаметр инструмента, D_2 – диаметр детали, h – шаг профиля инструмента.

Так как рабочий инструмент и заготовка вращаются в противоположном направлении (рис. 1), следовательно, сумма скорости по оси X равняется сумме от скоростей заготовки и окружной скорости инструмента $V_x = V_3 + V_{ix}$. А по оси Z вектор скорости $\vec{V}_z$ равняется сумма векторов скорости подачи и поступательной скорости инструмента по оси Z и $V_z = V_s + V_{iz}$. Следовательно, результирующая скорость будет равна:

$$\begin{aligned} V_{рез1} &= 2\sqrt{V_x^2 + V_z^2}; \\ V_{рез1} &= 2\sqrt{(V_3 + V_{ix})^2 + (V_s + V_{iz})^2}; \\ V_{рез1} &= 2\sqrt{(\pi D_2 n_2 + \pi D_1 n_1)^2 + (V_s + h n_1)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Нужно отметить, что результирующая скорость располагается на плоскости XOZ , это обеспечивает стабильность нормального составляющего давления и постоянный контакт рабочего инструмента с поверхностью обрабатываемой детали. Можно управлять результирующей скоростью по значениям компонентов n_1 , n_2 , V_s . Наличие вращательного движения и деталей 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

$$j_1 = \frac{2V_x^2}{R_2} = \frac{2(V_3 + V_{ix})^2}{R_2} = \frac{2(\pi D_2 n_2 + \pi D_1 n_1)^2}{R_2}. \quad (4)$$

где R_2 – радиус детали.

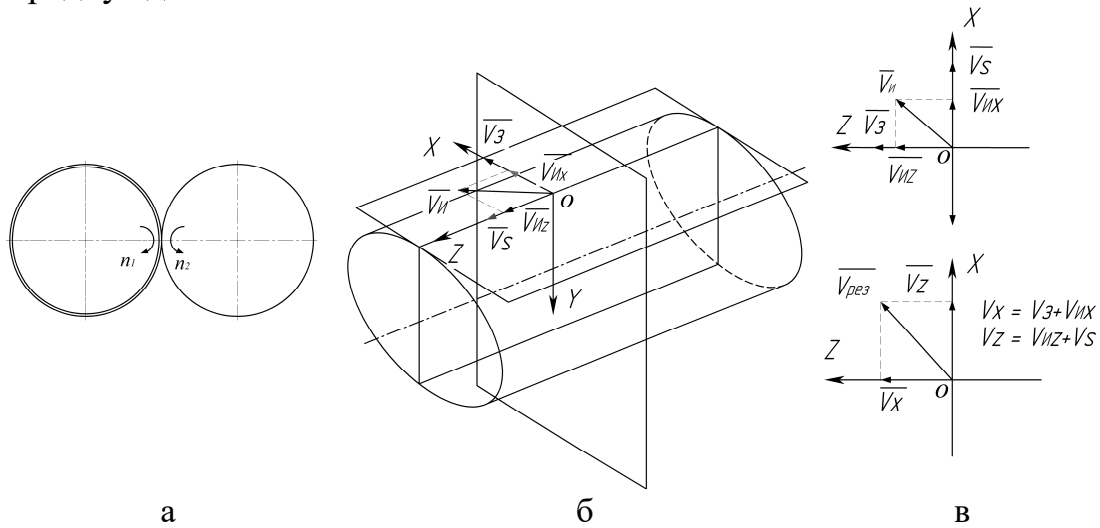


Рис. 3. Схема векторов скоростей при противоположном направлении вращения инструмента и заготовки: а – схема обработки, б – размещение векторов скоростей относительно точки контакта, в – проекции векторов скоростей на выбранную систему координат

Исходя из анализа кинематических схем, заметим, что при геликоидном ППД возникает горизонтальная составляющая сдвига $V_{из}$ вдоль оси вращения инструмента, в отличия от процесса ППД тороидальным роликом, где деформация идет почти строго нормально к поверхности. И не существует чистого ППД качением при геликоидном ППД, за счет горизонтального сдвига инструмента. Этот сдвиг может ориентировать зерна материала вдоль поверхности детали, тем самым увеличивает степень измельчения структуры.

Из (1), (2), (3), (4) можно заметить, что при ППД геликоидным инструментом результирующая скорость $V_{рез1}$ и ускорение j_1 получаются выше результирующей скорости $V_{рез}$ и ускорения j при ППД тороидальным роликом.

Заключение

В работе проведено теоретическое исследование кинематических схем поверхностного пластического деформирования с использованием геликоидного инструмента. Установлено, что при использовании геликоидного инструмента в процессе ППД возникает дополнительная составляющая движения вдоль оси вращения инструмента, вызывающая горизонтальный сдвиг поверхностного слоя материала. Данный эффект способствует более интенсивному измельчению структуры материала и может положительно влиять на упрочнение поверхности. Показано, что при противоположном направлении вращения геликоидного инструмента и заготовки формируются наибольшие значения результирующей скорости и центростремительного ускорения по сравнению с традиционной схемой ППД тороидальным роликом.

Полученные результаты позволяют более точно управлять кинематическими параметрами процесса и подтверждают перспективность применения геликоидного ППД для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей, таких как валы и оси.

Список литературы

1. Chi Ma, Sergey Suslov, Chang Ye, Yalin Dong. Improving plasticity of metallic glass by electropulsing-assisted surface severe plastic deformation // Materials & Design. 2019, vol. 165, pp. 123-132. doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107581.
2. 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: 10/36652/1813-1336-2020-16-5-200-204.
3. Зайдес С.А., Хай В.К. Влияние ориентации геликоидного инструмента на напряженно-деформированное состояние упрочненных деталей из углеродистой стали // Черные металлы. – 2026. – №1. – С. 39-45. – DOI: 10.17580/chm.2026.01.04.

Сведение об авторе:

Зайдес Семен Азикович – д.т.н., профессор;

Ву Куанг Хай – аспирант;

Лэ Фыонг Май – студент.