

УДК 621.787.4.07:534.8

## ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРОДОЛЬНО-КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2018 Н.А. Крылова, В.Г. Шуваев

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 25.06.2018

В работе раскрыты вопросы упрочнения поверхностного слоя детали с помощью ультразвуковых колебаний. Описывается разработанное устройство для формирования ультразвуковых продольно-крутильных колебаний, дающее возможность существенно модифицировать свойства поверхностных слоев деталей.

*Ключевые слова:* отделочно-упрочняющая обработка, поверхность детали, качество, ультразвук, сложные колебательные воздействия.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что разрушение деталей в процессе эксплуатации, чаще всего начинается с поверхности. Поверхностные слои, находящиеся на границе раздела фаз, подвергаются активному воздействию внешней среды, оказываясь наиболее напряженными. В связи с чем возникает необходимость улучшения физико-механических характеристик и геометрии рабочих поверхностей деталей. Состояние рабочей поверхности детали оказывает влияние на такие ее эксплуатационные свойства, как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость и др.

К одному из наиболее эффективных и экономичных видов упрочнения относится поверхностное пластическое деформирование (ППД), дающее возможность более полно реализовать потенциальные свойства конструкционных материалов в реальных деталях, особенно в деталях сложной формы с концентраторами напряжений [1]. Одним из эффективных методов решения задач, возникающих при ППД, является наложение ультразвуковых колебаний, дающих возможность существенно модифицировать свойства поверхностных слоев деталей путем высокоэнергетического воздействия гармоническими колебаниями ультразвуковой частоты, управлять в некоторых пределах микрогеометрией формируемой поверхности, её твёрдостью, степенью деформационного упрочнения, а также получать регулярный микрорельеф [2]. При воздействии инструмента (индентора) статической силой под постоянным давлением с одновременным наложением ультразвуковых колебаний с частотой 18-24 кГц подвергается

выглаживанию. Основные преимущества ультразвуковой ППД определяются высокой производительностью и простотой процесса обработки, а также незначительным постоянным давлением на обрабатываемую поверхность, возможностью использования универсальных металлорежущих станков.

Введение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в металл в твердом состоянии вызывает увеличение плотности структурных несовершенств (дислокаций, вакансий), что приводит к изменению физико-механических свойств подвергаемого обработке металла и оказывает влияние на процесс пластической деформации. На границе раздела твердая фаза – твердая фаза ультразвуковые колебания приводят к изменению состояния поверхностного слоя, уменьшают силы граничного трения при перемещении одного тела по другому. Анализ результатов исследований показывает, что независимо от состава и исходных механических свойств металлов при ультразвуковом нагружении происходит снижение условного предела текучести в 3,5÷4 раза и коэффициента трения в 2÷4 раза.

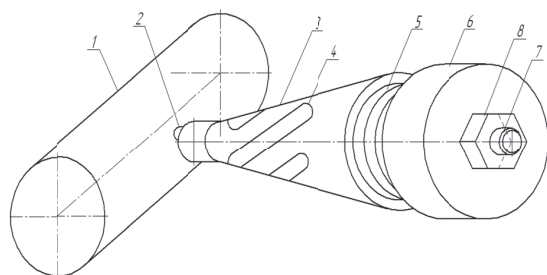
В процессе ультразвукового поверхностного пластического деформирования имеет место одновременное статическое и динамическое нагружение, периодически повторяющееся с частотой колебаний и распространяющееся на сравнительно малую площадь деформирования поверхности детали. Ультразвуковая обработка снижает исходную шероховатость поверхности детали и формирует остаточные напряжения сжатия, повышает микротвердость поверхности и обеспечивает благоприятное ее распределение по глубине модифицированного слоя, способствует образованию оптимального микрорельефа для масляных карманов, что в конечном итоге обеспечивает повышение износостойкости, циклической прочности, долговечности и надежности деталей машин [3].

*Крылова Надежда Андреевна, аспирант.*

*Шуваев Вячеслав Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы». E-mail: ask@samgtu.ru*

Известны устройства для ультразвуковой обработки поверхностей [4], недостатки которых заключаются в сложности конструкции, в необходимости использования двух преобразователей колебаний для формирования сложной траектории перемещения деформирующего элемента, кроме того отсутствуют средства, позволяющие изменять формируемый регулярный микрорельеф поверхности.

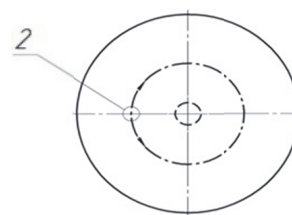
На рис. 1 представлено разработанное авторами ультразвуковое устройство для формирования микрорельефа поверхностей. Устройство содержит концентратор 3, на выходном конце которого размещается деформирующий элемент – шарик 2, который воздействует на обрабатываемую поверхность 1. Для возбуждения ультразвуковых колебаний применен пакетный пьезокерамический преобразователь 5, зажатый при помощи шпильки 7 и гайки 8 между концентратором 3 и противовесом 6. На боковой поверхности концентратора выполнены наклонные пазы 4, позволяющие возбуждать продольно-крутильные колебания деформирующего элемента. Кроме того, деформирующий элемент смещен относительно оси концентратора, что приводит к формированию сложной траектории вибрационного воздействия на поверхность обрабатываемой детали.



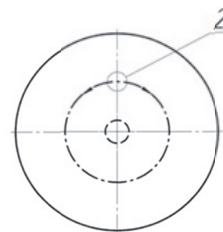
**Рис. 1.** Схема устройства для ультразвуковой обработки поверхностей

Устройство работает следующим образом.

Преобразователь 5 возбуждает продольные ультразвуковые колебания с частотой 18000-23000 Гц и амплитудой до 10-20 мкм. Преобразователь колебаний 5 может быть выполнен, например, на основе пакетного пьезокерамического преобразователя из шайб пьезокерамики осевой поляризации типа ЦТС-19. При подаче с генератора электрического напряжения синусоидальной формы и резонансной частоты (на чертеже не показан) на обкладки пакетного пьезокерамического преобразователя, он, изменяя вследствие обратного пьезоэффекта свои геометрические размеры, возбуждает механические колебания концентратора 3 и, соответственно, деформирующего элемента 2. Ультразвуковые продольные колебания, создаваемые преобразователем колебаний 5, передаются концентратору 3.



**Рис. 2.** Смещение деформирующего элемента относительно центра выходного конца концентратора перпендикулярно осевой линии обрабатываемой цилиндрической детали



**Рис. 3.** Смещение деформирующего элемента относительно центра выходного конца концентратора параллельно осевой линии обрабатываемой цилиндрической детали

Возможно смещение деформирующего элемента относительно центра выходного конца концентратора перпендикулярно осевой линии обрабатываемой цилиндрической детали. На рис. 2 показан вариант со смещением деформирующего элемента относительно центра выходного конца концентратора перпендикулярно осевой линии обрабатываемой цилиндрической детали.

Так же деформирующий элемент может быть смещен относительно центра выходного конца концентратора параллельно осевой линии обрабатываемой цилиндрической детали. На рис. 3 показан вариант со смещением деформирующего элемента относительно центра выходного конца концентратора параллельно осевой линии обрабатываемой цилиндрической детали.

Смещение деформирующего элемента относительно центра выходного конца концентратора перпендикулярно или параллельно осевой линии обрабатываемой цилиндрической детали позволяет формировать различные виды регулярных микрорельефов поверхности. Выполнение наклонных пазов на наружной поверхности концентратора приводит к формированию продольно-крутильных колебаний, упрощению конструкции, снижению стоимости устройства для ультразвуковой финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей деталей.

В процессе ультразвуковых вибрационных воздействий на поверхность обрабатываемой детали в ней возникают быстропотекающие деформации, приводящие к возбуждению упругих и пластических волн напряжений, причем возникающие в процессе ультразвуковой обработки силы изменяются по гармоническому за-

кону с учетом постоянной составляющей, определяемой силой прижима индентора к детали.

Формирование сложных вибрационных полей в процессе ультразвуковой обработки повышает эффективность применения и расширяет возможности управления ультразвуковой обработкой, а смещение деформирующего элемента от оси концентратора на различное расстояние и под различными углами относительно оси обрабатываемой детали существенно расширяет виды формируемых регулярных микрорельефов поверхности. Наложение ультразвуковых колебаний приводит к импульсному воздействию индентора на поверхность детали, вращательно-поступательное движение инструмента, а также линейное перемещение инструмента вдоль оси детали обеспечивает регулярный микрорельеф поверхности. Рисунок, полученный в результате наложения колебаний, меняется в зависимости от следующих составляющих: частота колебаний, угол смещения наконечника (относительно центра), скорость движения инструмента вдоль тела детали, скорость вращения самой детали.

К изменяемым параметрам процесса обработки относятся частота вращения детали  $n$  (об/мин), подача  $s$  (мм/об), статическая сила прижима деформирующего элемента к обрабатываемой поверхности  $P$  (Н). Изменяемыми параметрами ультразвуковой колебательной системы являются рабочая частота  $f = 18-23$  кГц, амплитуда ультразвуковых колебательных воздействий  $A = 2-20$  мкм. Диаметр деформирующего элемента - индентора может изменяться в зависимости от требований к параметрам поверхности детали и условий обработки  $d = 4-10$  мм.

Результатом сложения поперечного, продольного перемещения инструмента, а так же продольно – крутильные колебания деформирующего элемента является сложное колебательное воздействие на обрабатываемую поверхность.

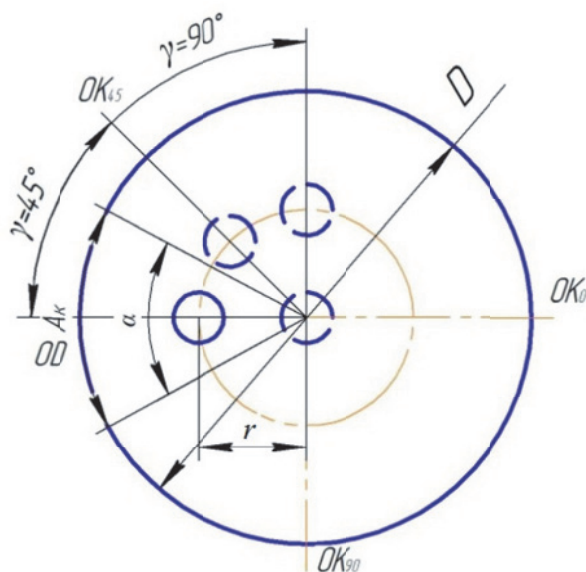
Траектория крутильных колебаний на поверхности обрабатываемой детали зависит от расположения деформирующего элемента смещенного относительно оси концентратора. Рассмотрим три варианта расположения оси колебания деформирующего элемента относительно оси детали:

$\gamma = 90^\circ$  (перпендикулярно оси детали)

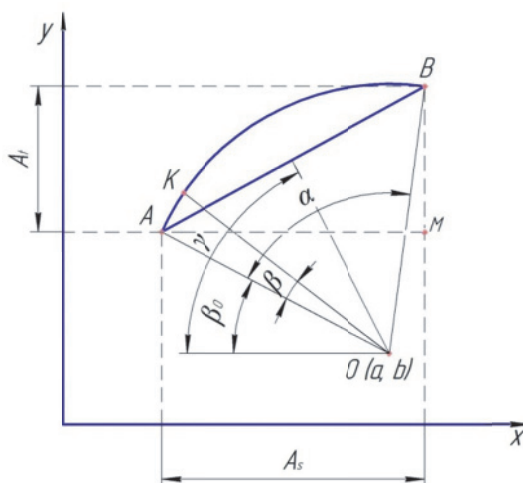
$\gamma = 0^\circ$  (параллельно оси детали)

$0^\circ < \gamma < 90^\circ$  (общий случай)

Одним из движений обрабатываемого инструмента являются крутильные колебания. Как известно, при совершении данных колебаний, траектория движения точки, а в данном случае – деформирующего элемента, представляет собой дугу окружности радиусом  $r$ .  $AB$  – хорда образованного сегмента, в результате перемещения точки из точки  $A$  в точку  $B$ ,  $\alpha$  – угол образованного сегмента, зависящий от амплитуды колеба-



**Рис. 4.** Общая схема расположения индентора на выходном торце концентратора:  $OK$  – ось деформирующего элемента,  $OD$  – ось детали,  $e$  – смещение деформирующего элемента относительно оси концентратора,  $A_k$  – амплитуда крутильных колебаний инструмента (деформирующего элемента),  $\gamma$  – угол смещения деформирующего элемента относительно оси детали,  $\beta$  – угол, на который перемещается инструмент за единицу времени  $t$ ,  $\beta_0$  – угол от оси абсцисс детали до крайней левой точки смещения относительно оси траектории вращательного движения.  $A$  амплитуда крутильных колебаний  $A$ , выражена амплитудой в продольном  $A_s$  и тангенциальном  $A_t$  направлениях.



**Рис. 5.** Траектория перемещения индентора из точки  $A$  в точку  $B$

Для описания перемещения точки от  $A$  на угол  $\beta$  воспользуемся параметрическим уравнением окружности вида:

$$\begin{cases} x = a + r \cdot \cos(\beta_0 + \beta), \\ y = b + r \cdot \sin(\beta_0 + \beta); \end{cases}$$

где  $\beta_0 = \gamma - \frac{\alpha}{2}$ .

Разложим крутильные колебания на продольную и тангенциальную составляющие, тогда колебания в продольном и тангенциальном направлениях будут выражены через соотношения сторон в образовавшемся треугольнике *ABM* на рис. 5:

$$A_t = AB \cdot \sin(90 - \gamma) = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \sin(90 - \gamma),$$

$$A_s = AB \cdot \cos(90 - \gamma) = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cos(90 - \gamma).$$

Причем выражения для определения  $A_t$  и  $A_s$  справедливы для любой величины угла  $\gamma$ .

Для частных случаев, когда  $\gamma = 0^\circ$ , то

$$A_{t\gamma=0^\circ} = 0,$$

$$A_{s\gamma=0^\circ} = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Для общих случаев, когда  $0^\circ < \gamma < 90^\circ$  (рассмотрим  $\gamma = 45^\circ$ ), то

$$A_{t\gamma=45^\circ} = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin 45 = \sqrt{2} \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2},$$

$$A_{s\gamma=45^\circ} = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos 45 = \sqrt{2} \cdot r \cdot \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Для частных случаев, когда  $\gamma = 90^\circ$ , то

$$A_{t\gamma=90^\circ} = 0,$$

$$A_{s\gamma=90^\circ} = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Для описания поперечного перемещения инструмента  $S_y$  относительно оси детали, необходимо учитывать вращение детали, выраженное через её скорость за единицу времени:

$$S_y = V \cdot t,$$

$V$  – скорость вращения детали.

$$V = 2\pi \cdot R \cdot n,$$

где  $R$  – радиус детали,

$n$  – частота вращения детали.

Следовательно, при движении индентора от точки *A* к точке *B* он пройдет путь:

$$S_y^{AB} = \pi \cdot R \frac{\beta \cdot n}{\alpha \cdot N}.$$

При движении индентора от точки *B* к точке *A* пройденный путь определится как:

$$S_y^{BA} = \pi \cdot R \frac{(2\alpha - \beta)n}{\alpha \cdot N}.$$

Перемещение инструмента в продольном направлении  $S_x$ , обусловлено подачей инструмента в продольном направлении, откуда перемещение  $S_x$  при движении индентора от точки *A* к точке *B* с учетом угла поворота равно:

$$S_x^{AB} = S \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{n}{2N}.$$

При движении индентора от точки *B* к точке *A* перемещение определится как

$$S_x^{BA} = S \frac{(2\alpha - \beta)}{\alpha} \cdot \frac{n}{2N}.$$

Результирующее уравнение траектории движения индентора по поверхности детали с учётом вышеприведенных выражений определится следующим образом:

$$\begin{cases} X^{AB} = A_s \pm S_x, \\ Y^{AB} = A_t \pm S_y. \end{cases}$$

Причем при прямом ходе от точки *A* к точке *B* принимается знак «-», при обратном ходе от точки *B* к точке *A* – знак «+».

Технический результат предлагаемой разработки заключается в повышении эффективности и расширении технологических возможностей ультразвуковой финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей деталей с целью повышения их эксплуатационных характеристик, улучшении качества обработанной поверхности, повышения надежности и долговечности ее работы, сокращения длительности приработки. Простота конструкции данного устройства позволяет использовать стандартные элементы и применять его без дополнительных затрат на переналадку оборудования и использовать универсальные токарные станки. Устройство может быть размещено на суппорте токарного станка, причем обрабатываемая деталь может быть установлена в патроне или центрах. Формирование сложных вибрационных полей в процессе ультразвуковой обработки повышает эффективность применения и расширяет возможности управления ультразвуковой обработкой, а смещение деформирующего элемента от оси концентратора на различное расстояние и под различными углами относительно оси обрабатываемой детали существенно расширяет виды формируемых регулярных микрорельефов поверхности.

Проведенные лабораторные испытания разработанного ультразвукового устройства показали высокую эффективность отделочно-упрочняющей обработки деталей типа тел вращения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
2. Шуваев В.Г., Папшев В.А., Шуваев И.В. Инструмент для формирования параметров качества поверхностного слоя деталей при ультразвуковой финишной обработке // СТИН. 2012. № 10. С. 37-40.
3. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Технология и режимы упрочнения статико-импульсной обработкой // Справочник. Инженерный журнал. 2003. № 2. С. 17-19.
4. Зайцев К.В., Аралкин А.С. Применение ультразвука при обработке углеродистых сталей и титановых сплавов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3.
5. Осипенкова Г.А., Пегашкин В.Ф. Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний; М-во образования и

- науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (фил.). 2-е изд., перераб. и доп. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2015. 179 с.
6. Шуваев В.Г., Крылова Н.А. Влияние режимов ультразвуковой обработки на свойства цилиндрических поверхностей // Международный симпозиум «Надежность и качество», 2016. № 2 С.185-186.
7. Патент РФ на полезную модель № 143794. Устройство для ультразвуковой финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей вращающихся деталей / В.Г. Шуваев, М.С. Горобец // 27.07.2014. Бюл. № 21.

## FINISHING-STRENGTHENING PROCESSING OF SURFACES OF CYLINDRICAL PARTS WITH THE USE OF ULTRASONIC LONGITUDINAL-TORSIONAL VIBRATIONS

© 2018 N.A. Krylova, V.G. Shuvaev

Samara State Technical University

The work reveals the issues of hardening of the surface layer of the part through ultrasonic vibrations. Describes developed device for the formation of ultrasonic longitudinal-torsional vibrations, giving you the opportunity to significantly modify the properties of the surface layers of parts.

*Keywords:* finishing-strengthening treatment, the surface of the part, quality, ultrasound, complex vibrational effects.