

## НЕКОТОРЫЕ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВЫГЛАЖИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ РАДИАЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ИНДЕНТОРА

Хачатрян Н.Г., Аршакян А.Л., Баласанян А.Б., Баласанян Б.С. (НПФА, Ереван, Армения)

Tel.: +374 10 235-465; E-mail: [n.h.khachatryan@mail.ru](mailto:n.h.khachatryan@mail.ru), [a.l.arshakyan@mail.ru](mailto:a.l.arshakyan@mail.ru),  
[arambalasan@yahoo.com](mailto:arambalasan@yahoo.com), [bbalasanian@yahoo.com](mailto:bbalasanian@yahoo.com)

**Abstract:** Investigations is devoted to theoretical studies of the kinematics and force loading of the tool in the process of surface plastic deformation (SPD) with the imposition of the indenter ultrasonic vibrations (USV) in the radial direction, on the basis of which found that in the SPD machine parts with radial USV due to periodic changes in the height of the deformation segment of a spherical indenter in the machining plane arise seeming transverse and amplified USV, which amplitude independent of the radius of the spherical indenter, the amplitude of radial USV and the depth of penetration of the indenter under the action of static forces. It is proposed the coefficient the conversion of radial in transverse USV and the dependence of its definition. At the same time, under certain processing conditions and USV amplitude over a period of time segment of the deforming of a spherical indenter comes out of contact with the material being processed, which creates favorable conditions for the implementation of the SPD.

**Keywords:** smoothing, plastic deformation, ultrasonic vibrations, a spherical indenter, kinematics, contact.

**Введение.** Научно-технический прогресс во всех отраслях современного машиностроения требует от разработчиков и конструкторов постоянного улучшения технико-экономических показателей проектируемых ими машин и оборудования, что, как правило, сопровождается повышением режимов их работы. Это налагает серьезные требования к надежности и долговечности, и связанные с ними, все более ужесточающиеся требования к качеству поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин. Для обеспечения необходимого качества поверхностного слоя деталей машин в технологии машиностроения применяют различные финишные методы обработки, к числу которых относятся различные методы абразивной и термической обработки, легированием и нанесением на рабочие поверхности деталей машин износостойких покрытий, а также их упрочнением поверхностным пластическим деформированием (ППД).

В настоящее время наиболее прогрессивными методами ППД, направленными на повышение качества и эксплуатационных свойств деталей машин, являются технологии выглаживания их поверхностей с наложением на инструмент высокочастотных ультразвуковых колебаний (УЗК) вдоль нормали к обрабатываемой поверхности применением. Они совмещают в себе лучшие показатели традиционных способов обработки: исходная шероховатость обработанных поверхностей деталей машин из термообработанных сталей и сталей в состоянии поставки, чугуна, сплавов цветных металлов, высокопрочных, коррозионностойких, нержавеющих сталей и сплавов снижается до Ra 0,2; микротвердость поверхностного слоя в зависимости от обрабатываемого материала увеличивается на 20-270%; улучшаются эксплуатационные характеристики деталей машин за счет повышения предела контактной выносливости на 15-25%; повышение износостойкости и возможность изготовления деталей машин для пищевой промышленности в связи с отсутствием шаржированных в рабочую поверхность зерен абразивных частиц и наличием на нем регулярных карманчиков для удержания смазки и т.д. [1-9 и др.].

В последнее время, вместо традиционных схем ультразвукового выглаживания с наложением на индентор радиальных УЗК, авторы начинают исследовать и предлагать новые методы с применением тангенциально-осевых, в том числе и амплитудно модулированных [10] или крутильных УЗК [11,12]. К числу таких методов можно отнести и разработанный в НПУА метод ППД деталей машин с наложением на индентор УЗК в направлении результирующей силы выглаживания [13], который можно назвать ППД с радиально-тангенциально-осевыми или пространственными УЗК индентора.

Таким образом, задача повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин остается одной из важнейших и актуальных задач машиностроения, которое успешно решается внедрением в производство технологий выглаживания рабочих поверхностей с наложением на индентор радиальных, тангенциально-осевых, крутильных или пространственных УЗК.

Следует отметить, что основным объектом известных исследований являлись вопросы изучения влияния технологических параметров процесса ППД рабочих поверхностей деталей машин с применением УЗК на параметры шероховатости, микротвердости, степени и глубины упрочнения, контактной выносливости, износостойкости и другие показатели упрочненных поверхностей, на которое существенное влияние может оказать продолжительность полного выхода индентора из контакта с обрабатываемым материалом в течение одного периода УЗК.

**Цель исследований.** Целью работы является установление условий полного выхода индентора из контакта с обрабатываемым материалом в течение одного периода УЗК и возможностей управления продолжительностью этого контакта в процессе выглаживания рабочих поверхностей деталей машин с применением радиальных УЗК.

**Теоретические исследования кинематики ППД с применением радиальных УЗК индентора.** Анализ известных методов [10-12] осуществления ППД с применением тангенциально-осевых или крутильных УЗК показал, что в этих процессах, в определенные промежутки времени, передний и боковой фронт сферического индентора при определенных режимах обработки находятся в отрыве от обрабатываемой заготовки, улучшая тем самым условия ультразвукового выглаживания. Околовершинная задняя поверхности индентора, которая является наиболее нагруженной частью поверхности индентора, по направлению нормали к поверхности обрабатываемого материала на ее определенной глубине находится с ним в постоянном контакте, что способствует увеличению длины траектории ее относительного движения и соответствующему увеличению износа инструмента.

Это явление отсутствует в случаях осуществления ППД с применением радиальных УЗК, при котором задняя поверхность индентора по направлению нормали к поверхности обрабатываемого материала в определенные промежутки времени периодически отрывается от него, вследствие которого улучшаются условия работы этой поверхности. К сожалению, до настоящего времени отсутствуют сведения о наличии контакта по переднему и боковому фронтам сферического индентора в случаях осуществления ППД с применением радиальных УЗК. Для восполнения этого пробела снова рассмотрим методику ППД деталей машин с применением радиальных УЗК, схема осуществления которого приведена на рис.1.

За исходное положение примем (рис.1):

- точка  $C$  - точка контакта сферического сектора индентора с точкой контакта выглаживаемой поверхности детали в момент времени, когда индентор под действием статической силы  $P_{ст}$  внедрен в обрабатываемый материал на наибольшую глубину  $h_{max}$ ;

- индентор совершает радиальные УЗК от своей нулевой линии на глубине  $h_0$  от выглаживаемой поверхности детали с амплитудой  $A_y$  по нормали к этой поверхности, то есть вдоль оси Y;
- точки  $K_0$ ,  $K_1$  и  $K_2$  – положения центра сферического индентора в моменты времени, когда его вершина находится соответственно на глубинах  $h_0$ ,  $h_{\min}$  и  $h_{\max}$  от выглаживаемой поверхности детали;
- $r_{\max}$  и  $r_{\min}$  соответственно радиусы основания сферического сектора в моменты времени, когда вершина индентора находится соответственно на шлубинах  $h_{\max}$  и  $h_{\min}$  от выглаживаемой поверхности детали;

В процессе УЗК плоскостью XOZ системы координат (ось X показана на рис.2) от сферического индентора отсекается шаровой сектор высотой  $h_i$ , радиус основания которого можно определить из выражения:

$$r_i = \sqrt{R^2 - (R - h_i)^2} = \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_y \cos \omega t))^2}, \quad (1)$$

где  $r_i$  радиус основания шарового сектора высотой  $h_i$ .

Учитывая, что  $M_1 M_0 = M_0 M_2 = \mp A_y$  из (1) можно записать величины  $r_0$ ,  $r_{\max}$  и  $r_{\min}$  в виде зависимостей:

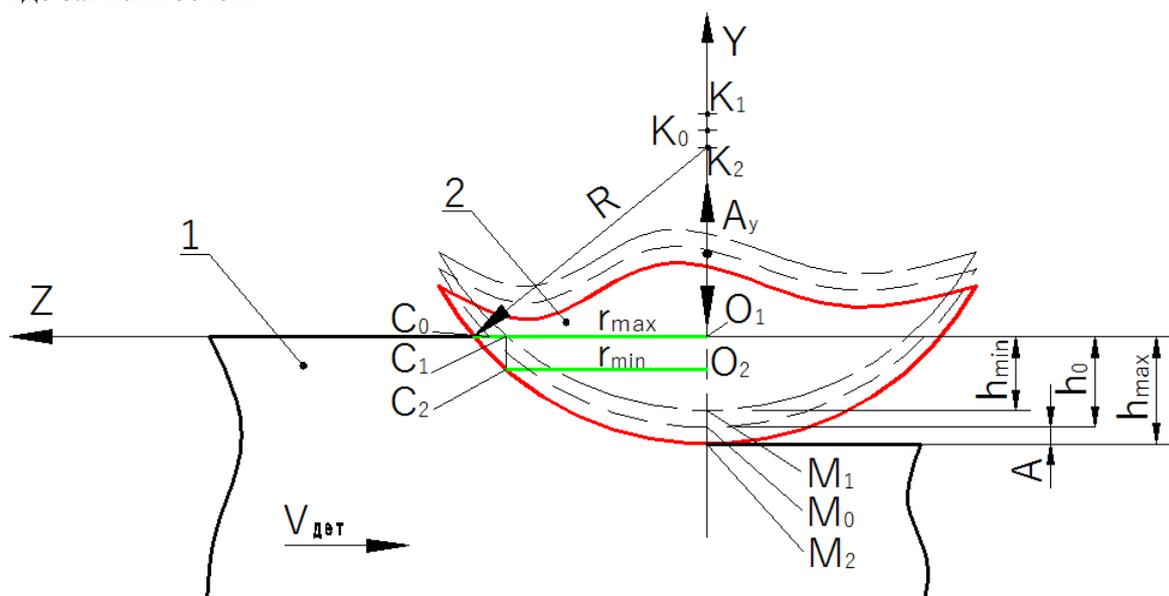


Рис. 1. Схема переднего фронта процесса ППД деталей машин с применением радиальных УЗК: 1-обрабатываемая деталь, 2 – сферический индентор с радиусом R

$$r_0 = \sqrt{R^2 - (R - h_0)^2}, \quad (2)$$

$$r_{\max} = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2} = \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_y))^2}, \quad (3)$$

$$r_{\min} = \sqrt{R^2 - (R - h_{\min})^2} = \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_y))^2}. \quad (4)$$

Изменение радиуса основания шарового сектора в течение первой и третьей четвертей периода УЗК индентора зависит от текущего положения индентора, которое с учетом (1)-(2) можно определить по формуле:

$$\Delta r_i = r_i - r_0 = \pm \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_y \cos \omega t))^2} \mp \sqrt{R^2 - (R - h_0)^2}, \quad (5)$$

а в течение второй и четвертой четвертей периода УЗК индентора по формуле:

$$\Delta r_i = r_0 - r_i = \mp \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_y \cos \omega t))^2} \pm \sqrt{R^2 - (R - h_0)^2}. \quad (6)$$

В конце первой и второй четвертой периода УЗК индентора с учетом выражений (3)-(6) соответствующие наибольшие изменения радиусов  $\Delta r_1$  и  $\Delta r_2$  основания шарового сектора можно определить с помощью выражений:

$$\Delta r_1 = r_{\max} - r_0 = \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} - \sqrt{R^2 - (R - h_0)^2} \quad (7)$$

$$\Delta r_2 = r_0 - r_{\min} = \sqrt{R^2 - (R - h_0)^2} + \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2} \quad (8)$$

Следовательно, наибольшее изменение радиуса основания шарового сектора равно  $\Delta r = \Delta r_1 + \Delta r_2$ , которое с учетом (7)-(8) можно записать в виде:

$$\Delta r = \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} + \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2} \quad (9)$$

Заметим, что наибольшее изменение радиуса основания шарового сектора в плоскости XOZ имеет место в течение каждого полупериода УЗК, когда текущая амплитуда радиальных колебаний изменяется от  $A_Y$  до  $-A_Y$ , в итоге перемещаясь при этом на величину  $2A_Y$ . В результате этого, как показали расчеты, изменение радиуса основания шарового сектора в течение каждого полупериода колебаний оказывается в несколько раз больше, чем двойная амплитуда радиальных УЗК. Например, при радиусе сферы  $R = 10$  мм, двойной амплитуде радиальных УЗК  $2A_Y = 20$  мкм, изменение радиуса основания шарового сектора в течение одного полупериода УЗК составляет  $\Delta r = 148$  мкм, что в 7,4 раза больше двойной амплитуды УЗК. Можно сказать, что под действием радиальных УЗК в плоскостях, параллельных плоскости XOZ возникают кажущиеся поперечные и усиленные УЗК, то есть радиальные колебания с некоторым коэффициентом  $K_Y$  преобразуются в поперечные УЗК.

Величину усиления  $K_Y$  можно определить из очевидного соотношения:

$$K_Y = \frac{\Delta r}{2A_Y} = \frac{\sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} + \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2}}{2A_Y} \quad (10)$$

С учетом сказанного посредством формулы (10) были построены зависимости коэффициента преобразования  $K_Y$  радиальных в поперечные УЗК от радиуса сферического индентора для различных значений  $h_0$ , которые приведены на рис.2. Видно (рис. 2), что с увеличением радиуса сферического индентора от 1...20 мм, при  $h_0 = 30$  мкм  $K_Y$  увеличивается в 4...18,3 раза, а при  $h_0 = 200$  мкм  $K_Y$  - в 1.3...7 раза.

Примем, что в течение первого 0,5T полупериода УЗК индентора в плоскости XOZ системы координат за счет уменьшения радиуса основания шарового сектора поверхности индентора в этой плоскости уменьшается на величину  $\Delta r$ . Перемещение точки С детали в течение этого промежутка времени, обусловленное скоростью его движения относительно индентора, равно  $\Delta L_C = 0,5V_{\text{оem}}T$ . В итоге, перемещение точки С детали относительно поверхности сферического сектора на уровне плоскости XOZ системы координат в направлении оси OZ будет равно:

$$\Delta L_Z = \Delta L_C - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2} = 0,5V_{\text{оem}}T - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2} \quad (11)$$

Аналогично, теми же рассуждениями, можно получить, что перемещение точки G (рис.3) детали относительно поверхности сферического сектора на уровне плоскости XOZ системы координат в направлении оси OX будет равно:

$$\Delta L_X = \Delta L_C - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2} = 0,5S_{\text{min}}T - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2} \quad (12)$$

Очевидно, что от знаков величин  $\Delta L_z$  и  $\Delta L_x$  зависит наличие или отсутствие контакта между передним и боковым поверхностями индентора и обработанной поверхностью детали: при  $\Delta L_z \geq 0, \Delta L_x \geq 0$  этот контакт существует, а при  $\Delta L_z < 0, \Delta L_x < 0$  образуется зазор между отмеченными поверхностями индентора и обработанной поверхностью детали.

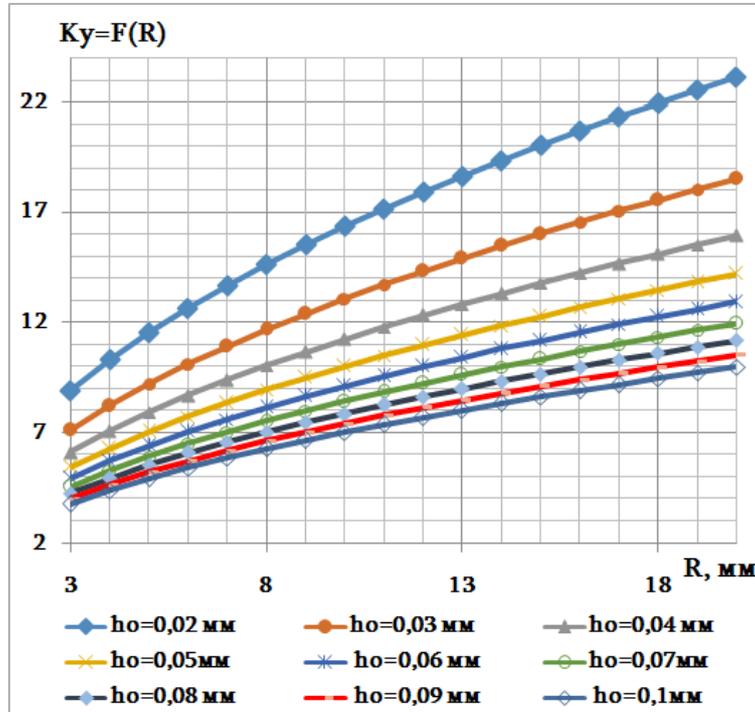


Рис.2. Зависимости коэффициента преобразования  $K_y$  радиальных УЗК в поперечные от радиуса сферического индентора

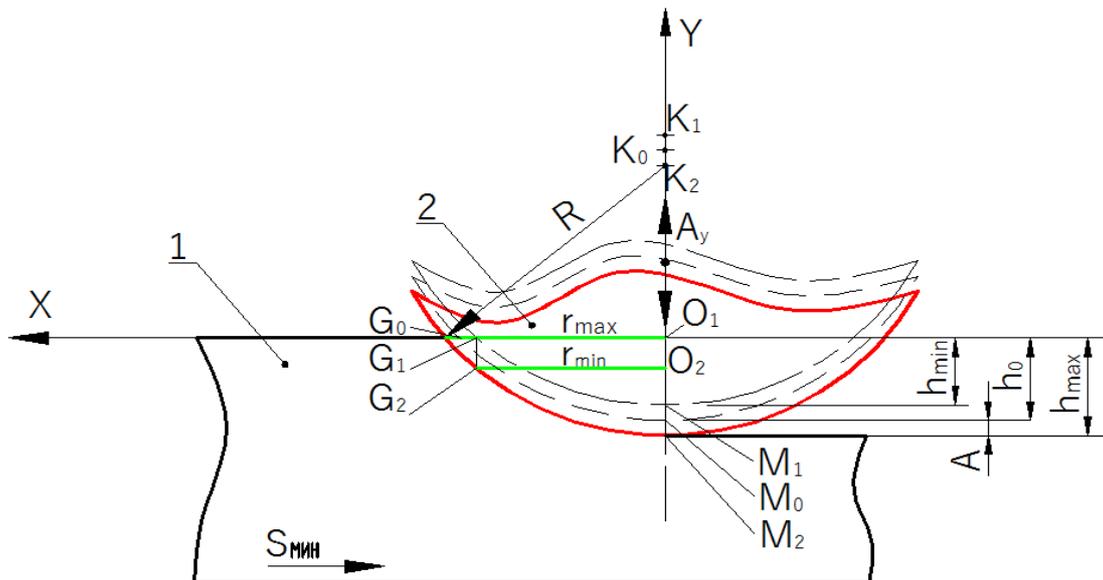


Рис. 3. Схема бокового фронта процесса ППД деталей машин с применением радиальных УЗК: 1-обрабатываемая деталь, 2 – сферический индентор

Таким образом, из (10) можно получить условие полного отрыва передней и боковой поверхностей индентора от обрабатываемой поверхности в случае ППД с его радиальными УЗК в виде выражений:

$$0.5V_{oem}T - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2} < 0,$$

$$0.5S_{min}T - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 + A_Y))^2} - \sqrt{R^2 - (R - (h_0 - A_Y))^2} < 0.$$

### Выводы

- В процессе ППД деталей машин с применением радиальных УЗК за счет периодического изменения высоты деформирующего сектора сферического индентора в плоскости XOZ возникают кажущиеся поперечные и усиленные УЗК, амплитуда которых зависит от радиуса сферического индентора, амплитуды радиальных УЗК и глубины внедрения индентора под действием статической силы. Предложен коэффициент преобразования радиальных УЗК в кажущиеся поперечные и зависимость его определения.
- В процессе ППД деталей машин с применением радиальных УЗК при определенных режимах обработки и амплитуды УЗК в течение некоторого промежутка времени происходит полный отрыв поверхности деформирующего сектора сферического индентора от обрабатываемого материала, что создает благоприятные условия для осуществления ППД.

**Список литературы:** 1. Муханов И.И. Ультразвуковая упрочняюще-чистовая обработка стали и чугуна - Вестник машиностроения, 1968, No 6, с.64-66. 2. Муханов И.И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом -М.: Машиностроение, 1978.-44 с. 3. Холопов Ю.В. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов, г. Санкт-Петербург, журнал "Петербургский рынок металлов", №9, 19 мая 2005 г. 4. Марков А.И., Устинов И.Д. Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей и режущего инструмента. М., Машиностроение 1979, 54 с. 5. Марков М.А. Применение ультразвука при алмазном выглаживании деталей / М. А. Марков, М. А. Озерова, И. Д. Устинов // Вестник машиностроения. 1973. - №9. - С. 58-61. 6. Боровин Ю.М. Повышение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при финишной ультразвуковой обработке: автореф. дис. . канд. техн. наук. — М., 2005. — 18 с. 7. Горбенко А.В. Влияние ультразвукового выглаживания на параметры поверхностного слоя// Журнал "Теория процесив та машин". –2008. – №2. С. 5-7. 8. Ким Чанг Сик. Технологические и структурные закономерности ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки конструкционных и инструментальных материалов: автореферат дис.. кандидата технических наук: 05.02.01, 05.03.01 / Московский Государственный Индустриальный Университет. Сан Мун Университет (Южная Корея). Москва, 2005. 25с. 9. Семенова Ю.С. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей ультразвуковым пластическим деформированием: диссертация . кандидата технических наук: 05.02.08 / Барнаул, 2012. 18с. 10. Степчева З.В. Повышение эффективности алмазного выглаживания на основе рационального использования энергии модулированного ультразвукового поля: диссертация кандидата технических наук : 05.02.08 / Ульяновск . УлГТУ – 2007, 19 с. 11. Осипенкова Г.А., Пегашкин В.Ф. Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний / М-во образования и науки РФ: ФГАОУ, Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2013.–116 с. 12. Осипенкова Г.А., Пегашкин В.Ф. Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний / М-во образования и науки РФ: ФГАОУ, Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2015.–178 с. 13. Патент РА № 3006. Способ ультразвуковой обкатки. Н.Г. Хачатрян, Б.С. Баласанян, А.Б. Баласанян и др. Официальный бюллетень № 03/1 агентства интеллектуальной собственности республики Армения. Ереван. 2016. С. 6.