



2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ
ИНСТРУМЕНТА И ФОРМЫ ДЕТАЛИ
НА ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТНОЙ
ЗОНЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ
ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ
РОЛИКАМИ**

**THE EFFECT OF TOOL GEOMETRY
AND PART SHAPE ON CONTACT ZONE
PARAMETERS DURING PLASTIC
SURFACE DEFORMATION WITH
ROLLERS**

✉¹ **Вирт Андрей Эдуардович**,
к.т.н., заведующий кафедрой «Технология ма-
шиностроения и прикладная механика»,
доцент, Камышинский технологический ин-
ститут (филиал) Волгоградского государст-
венного технического университета, г. Камышин,
e-mail: virt@kti.ru, virt09@rambler.ru

✉¹ **Virt Andrey Eduardovich**,
candidate of technical sciences, head of the depart-
ment of «Mechanical engineering and applied me-
chanics», associate professor, Kamyshin technologi-
cal institute (branch) of Volgograd state technical
university, Kamyshin, e-mail: virt@kti.ru,
virt09@rambler.ru

Лебедева Юлия Витальевна,
к.т.н., доцент, Камышинский технологический
институт (филиал) Волгоградского государ-
ственного технического университета, г. Ка-
мышин, e-mail: LebedevaJuliJa1@yandex.ru

Lebedeva Yulia Vitalievna,
candidate of technical sciences, associate professor,
Kamyshin technological institute (branch) of the
Volgograd state technical university, Kamyshin,
e-mail: LebedevaJuli-ja1@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние геометри-
ческих параметров деформирующих роликов
и формы обрабатываемых деталей на характе-
ристики контактной зоны в процессе поверх-
ностного пластического деформирования
(ППД). Важность данной работы заключается
в оптимизации процессов ППД для повыше-
ния эффективности обработки деталей. Тра-
диционные исследования часто не устанавли-
вают прямую связь между усилием деформи-
рования и геометрией инструмента и детали,
что ограничивает возможности точного про-
гнозирования результатов обработки. В ста-
тье предлагается новаторская математическая
модель, описывающая взаимосвязь между
геометрией роликов и геометрией контакта
для различных типов обрабатываемых по-
верхностей, включая валы и отверстия. Эта
модель учитывает разнообразие форм и раз-
меров роликов, а также геометрию обрабаты-
ваемой детали. Ключевая цель исследования
заключается в определении количественных

Annotation. The influence of the geometric pa-
rameters of the deforming rollers and the shape of
the workpieces on the characteristics of the con-
tact zone during surface plastic deformation
(SPD) is considered. The importance of this work
lies in the optimization of SPD processes to im-
prove the efficiency of workpiece machining. Tra-
ditional studies often do not establish a direct re-
lationship between the deformation force and the
geometry of the tool and the workpiece, which
limits the ability to accurately predict the pro-
cessing results. The article proposes an innovative
mathematical model that describes the relation-
ship between the geometry of the rollers and the
contact geometry for various types of machined
surfaces, including shafts and holes. This model
takes into account a variety of shapes and sizes of
rollers, as well as the geometry of the workpiece.
The key objective of the study is to determine the
quantitative relationships between the geometric
parameters of the tool and the characteristics of
the contact zone. The work analyzes the influence

взаимосвязей между геометрическими параметрами инструмента и характеристиками контактной зоны. В рамках работы анализируется влияние радиусов ролика и детали, типа обрабатываемой поверхности и глубины внедрения ролика на размеры и форму контактной зоны. С использованием разработанной математической модели выполнены численные расчеты, наглядно демонстрирующие результаты применения профильного ролика. Выявлено, что размеры контактной зоны существенно зависят от радиуса обрабатываемой детали, особенно при обработке деталей с небольшими диаметрами, что необходимо учитывать при проектировании технологических процессов. В публикации приведены графики функциональных связей, соответствующие различным формам инструмента и заготовок. Чтобы удостовериться в точности разработанной математической модели, выполнен сопоставительный анализ расчетных показателей с результатами, вычисленными согласно принципам теории упругости.

Ключевые слова: ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ, ДЕФОРМИРУЮЩИЙ РОЛИК, КОНТАКТНАЯ ЗОНА, ГЕОМЕТРИЯ КОНТАКТА, ОБРАБОТКА ВАЛОВ, ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

of the roller and workpiece radii, the type of machined surface and the roller penetration depth on the size and shape of the contact zone. Using the developed mathematical model, numerical calculations were performed that clearly demonstrate the results of using a profile roller. It was found that the dimensions of the contact zone depend significantly on the radius of the workpiece, especially when processing parts with small diameters, which must be taken into account when designing technological processes. The publication presents graphs of functional relationships corresponding to various forms of tools and workpieces. In order to verify the accuracy of the developed mathematical model, a comparative analysis of the calculated indicators with the results calculated according to the principles of elasticity theory was performed.

Keywords: SURFACE PLASTIC DEFORMATION, DEFORMING ROLLER, CONTACT ZONE, CONTACT GEOMETRY, SHAFT PROCESSING, HOLE PROCESSING, MATHEMATICAL MODEL.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Многочисленные исследования поверхностного пластического деформирования (ППД) демонстрируют, что усилие деформирования является критическим фактором, определяющим качество поверхностного слоя и эффективность процесса. Хотя традиционно усилие деформирования не увязывается напрямую с габаритами и формой деформирующих роликов, более детальный анализ показывает, что при одинаковом усилии, использование роликов разной формы и размеров приводит к различным результатам обработки. Тип обрабатываемой поверхности (вал, отверстие, плоскость) и ее размеры также оказывают существенное влияние на усилие. В частности, установлено, что глубина упрочнения при заданном усилии деформирования зависит от приведенного радиуса, который является функцией радиусов ролика и детали [1].

Для анализа количественных взаимосвязей между геометрическими параметрами деформирующих роликов и характеристиками контактной зоны необходима универсальная математическая модель. Эта модель должна отражать зависимость геометрии контакта от формы и размеров роликов, принимая во внимание вид и габариты обрабатываемой поверхности.

Рис. 1 иллюстрирует процесс внедрения ролика произвольной формы в поверхность вала и отверстия при поверхностном пластическом деформировании. Экспериментальные данные и

результаты моделирования на ЭВМ подтверждают, что при обработке ППД деформирующий ролик можно рассматривать как абсолютно жесткое тело. Следовательно, в сечении АА, проходящем через область контакта ролика и детали, формируются две пересекающиеся окружности, соответствующие ролику и детали. Записав уравнения этих окружностей в плоской декартовой системе координат и решив их совместно, получаем уравнение контурной линии контактной зоны при обработке валов и отверстий роликами произвольной конфигурации и размеров [2]. Запишем изменение текущей полуширины контакта z_k по его длине L_k в виде формулы (1):

$$z_k = \sqrt{R_d^2 - \left[\frac{(R_d \pm r_p) \cdot (R_d \mp h_p)}{R_d \pm (r_p \mp h_p)} \right]^2}, \quad (1)$$

где нижние знаки используют для обработки отверстий, а верхние – при расчете параметров для обработки валов; R_d – радиус отверстия либо вала детали, мм; r_p и h_p – известные или заданные функции изменения радиусов ролика и глубин их внедрения в разных его сечениях по длине контактной зоны l_k .

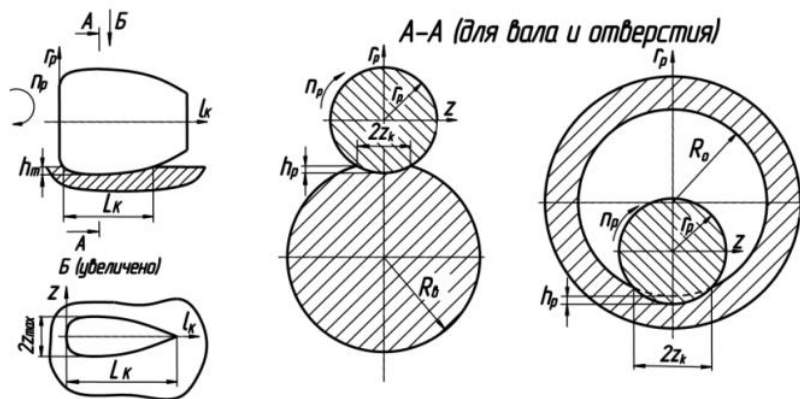


Рисунок 1 – Схема поверхностного пластического деформирования при внедрении ролика в поверхность вала и отверстия

Из формулы изменения полуширины контактной зоны можно получить выражения для вычисления объема зон контакта V_k и площади S_k :

$$S_k = \int_{-z_k}^{z_k} \sqrt{R_d^2 - \left[\frac{(R_d \pm r_p) \cdot (R_d \mp h_p)}{R_d \pm (r_p \mp h_p)} \right]^2} \cdot dz_k, \quad (2)$$

$$V_k = \int_0^{L_k} 0,5 \cdot r_p^2 \cdot \left(2 \cdot \arcsin\left(\frac{z_k}{r_p}\right) \right) - \sin\left(2 \cdot \arcsin\left(\frac{z_k}{r_p}\right) \right) \cdot dl_k, \quad (3)$$

где L_k – длина контактной зоны, мм.

Объем зоны контакта является частью объема деформирующего ролика, внедрившегося в тело детали.

2 Материалы и методы

Для исследования влияния геометрии инструмента и формы детали на параметры контактной зоны при пластическом деформировании поверхности роликами проводились численные расчеты с использованием ЭВМ по формулам (1), (2) и (3).

Исходные данные для расчетов: $E = 200...210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,28...0,31$ (принимался 0,3 для ролика и детали одинаковым).

3 Результаты исследований

На рис. 2 изображены графики изменения полуширин контактных зон при обработке валов и отверстий тороидальным профилем ролика, где приведенный радиус ролика $r_{пр}$ - это радиусное закругление на входном торце ролика, в данном случае тороидального.

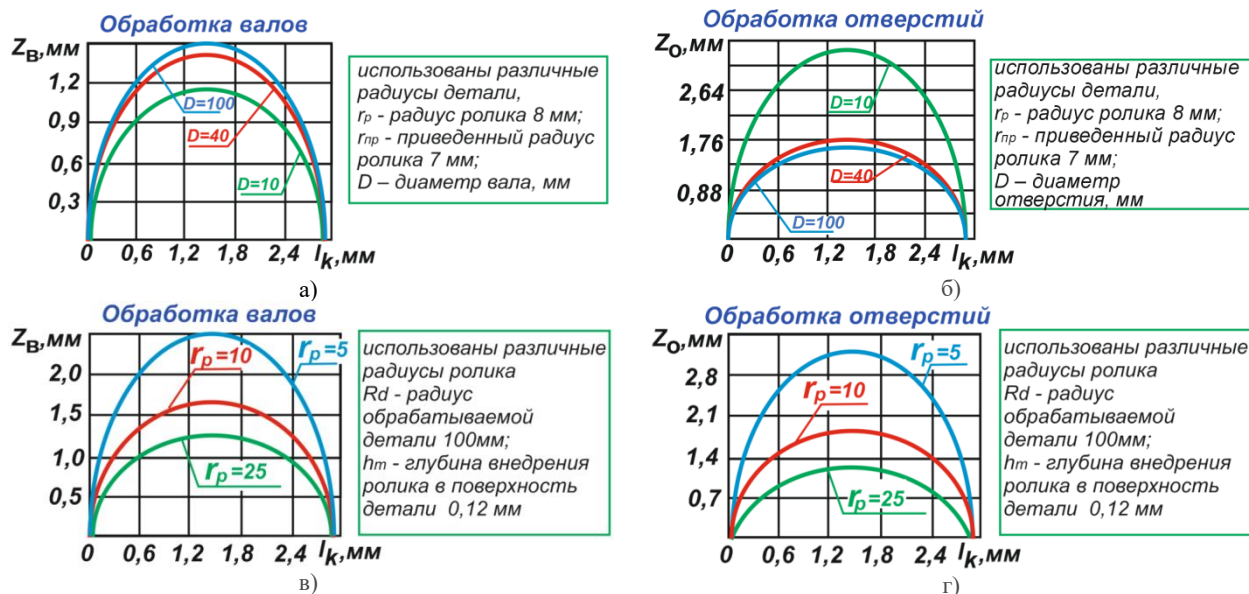


Рисунок 2 – Графики изменения текущей полуширины контакта z_k тороидального профиля ролика по длине контактной зоны l_k

В частности рис. 2, а и 2, в иллюстрируют обработку валов, 2, б и 2, г – обработку отверстий. На рис. 2 форма контактных зон близка к эллиптической. Размеры контактной зоны по ширине зависят от того, обрабатывается вал или отверстие и размеров обрабатываемой поверхности.

Графики, представленные на рис. 3, демонстрируют значительную зависимость площади контактных зон S_k и объема контактных зон V_k от радиуса обрабатываемой детали при значении диаметров не более 120 мм. При обработке валов происходит увеличение ширины контакта с ростом диаметра, а при обработке отверстий ситуация обратная.

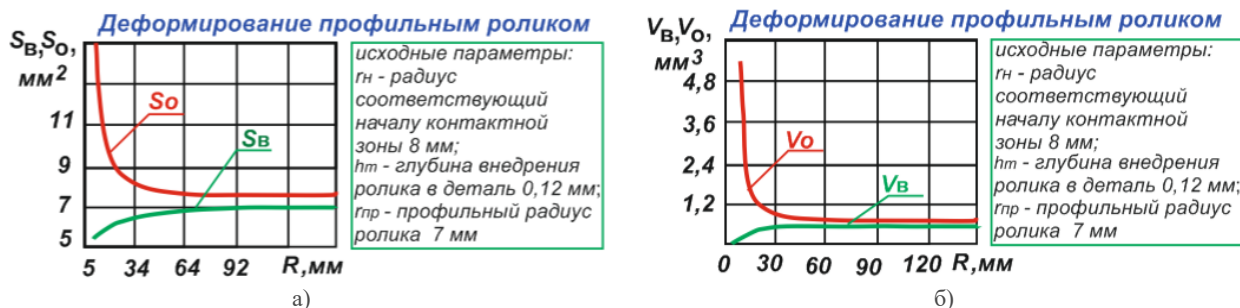


Рисунок 3 – Зависимость площади контактных зон вала S_B , отверстия S_0 и объема контактных зон вала V_B , отверстия V_0 от радиуса обрабатываемой детали R при деформировании профильным роликом

Из рис. 3 видно, что при деформировании профильным роликом влияние радиусов обрабатываемой поверхности проявляется изменением площади контакта (рис. 3, а) и изменением объемов контакта (рис. 3, б). Представленные графики были построены с учетом исходных параметров процесса и свойств обрабатываемого материала.

При увеличении радиусов вала и отверстия наблюдается тенденция сближения характеристик контактных зон к единым граничным величинам, аналогичным параметрам, достигаемым при обработке плоских участков. Таким образом, формулы (1), (2) и (3), предназначенные для определения геометрии контактных зон при обработке плоскостей, остаются справедливыми, если принять значительный радиус обрабатываемого изделия – порядка 500 миллиметров. Допустимое отклонение при таком предположении не превышает 0,01%.

Подобная зависимость характерна также для иных типов рабочих инструментов, включая ролики конусовидной формы.

Рис. 4 иллюстрирует расхождение между параметрами контактных зон в процессе обработки отверстия и вала одинакового размера при равной глубине внедрения ролика, что объясняется различиями в кинематике взаимодействия ролика с поверхностью.

На рис. 4 показаны радиусы роликов, внедренных в поверхность вала r_{pv} и отверстия r_{po} , а также полуширины контакта при обработке вала z_v и отверстия z_o .

Рассмотрим сравнение ширин контакта (по аналогии с площадями и объемами, см. формулы (2) и (3)) при решении аналогичной задачи для двух упругих цилиндрических тел. При параллельном размещении осей цилиндров соответствующие формулы иллюстрируют деформирование и примут следующий вид [3]:

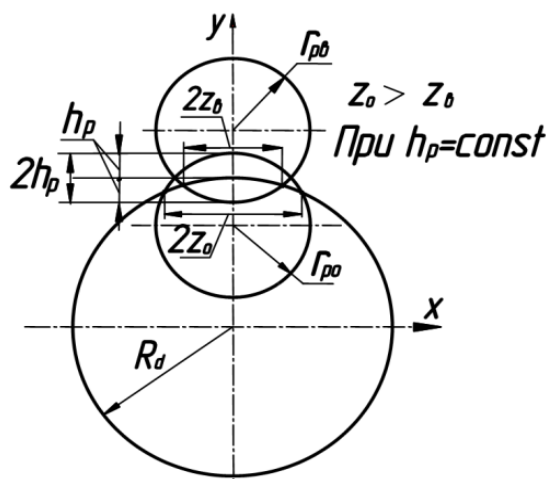


Рисунок 4 – Схема обработки отверстия и вала на равной глубине роликом

– при обработке отверстия

$$z_{oz} = 0,8 \cdot \sqrt{2 \cdot p \cdot \frac{D \cdot d_p}{D + d_p} \cdot \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)}, \quad (4)$$

– при обработке вала

$$z_{vz} = 0,8 \cdot \sqrt{2 \cdot p \cdot \frac{D \cdot d_p}{D - d_p} \cdot \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент Пуассона; D – диаметр отверстия (вала); d_p – диаметр ролика; E – модуль упругости тел, подвергающихся деформации; p – давление в максимально нагруженной точке прямоугольного контакта.

Зависимости, полученные по формулам (4) и (5), изображены на рис. 5 и 6.

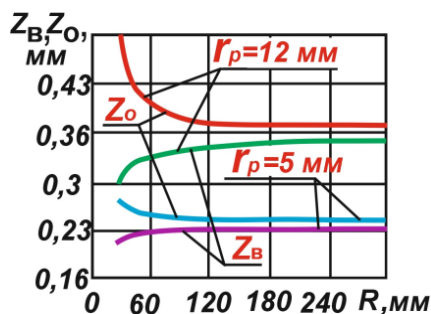


Рисунок 5 – Влияние радиусов отверстия и ролика и валов при разных значениях радиусов роликов на полуширину контакта согласно теории упругости

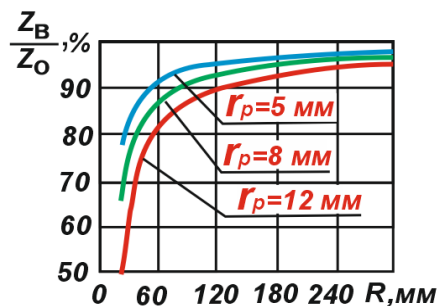


Рисунок 6 – Влияние радиусов отверстий и валов при разных значениях радиусов роликов на отношение полуширин контактов вала и отверстия согласно теории упругости

4 Обсуждение и заключение

Большим количеством исследований доказано, что упругие деформации и пластические при обработке ППД не отделимы, но при этом большинство авторов при расчете остаточных напряжений не учитывают пластическую деформацию. Также не учитывались во многих технологических расчетах и размеры обрабатываемой детали и деформирующего инструмента. Только в работе [1] был введен коэффициент, учитывающий размеры ролика и детали. В дальнейшем появились и другие расчетные зависимости, и экспериментальные исследования для определения таких параметров, как глубина упрочнения и остаточные напряжения [4], [5], [6] и [7]. В работе [8] произведена попытка экспериментально проверить достоверность расчетных зависимостей для определения глубины упрочнения поверхностного слоя. Одно из решений определения остаточных напряжений приведено в работе [3], где также важным критерием является геометрия инструмента. Анализ всех расчетных зависимостей показал, что величина контактной зоны (ширина и длина контактной зоны), ее геометрия, форма, глубина оказывают влияние на итоговый результат качественных и количественных параметров, получаемый при обработке. К этим параметрам помимо оговоренных остаточных напряжений и глубины упрочнения относится и шероховатость обработанной поверхности, и возможный наклеп, и другие показатели.

Полученные в данной статье расчетные зависимости необходимо использовать для определения требуемых технологических факторов, обеспечивающих заданное качество при высокой производительности.

На этапе определения режимов обработки при обкатывании роликами на ряду с подачей, скоростью обработки, усилием деформирования обязательно необходимо учитывать и геометрию инструмента, а также особенность размеров и формы контактной зоны.

Список литературы

- 1 Кудрявцев, И. В. Влияние кривизны поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом / И. В. Кудрявцев, Г. Е. Петушков // Вестник машиностроения. – 1966. – № 7. – С. 41–43.
- 2 Отений, Я. Н. Технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки ППД роликами: автореф. дисс. канд. техн. наук / Отений Я. Н. – Курган, 1988. – 24 с.
- 3 Отений Я.Н. Технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки ППД роликами: автореф. дисс. докт. техн. наук Ростов на Дону, 2007, 1988. – 24 с.
- 4 Справочник машиностроителя: в 6 т. / под ред. С. В. Серенсена. – 3-е изд. – Москва: Машгиз, 1962. – Т. 3. – 651 с.
- 5 Блюменштейн В.Ю Митрофанова К.С Уточненная конечно-элементная модель процесса отделочно-упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом. // Сборник: Инновации в технологиях и образовании. Сборник статей участников XIII Международной научно-практической конференции. Белово, 2020. – С. 214-219.

6 Зайдес С.А., Колесник А.В. Оценка напряженно-деформированного состояния при упрочнении цилиндрических деталей роликом с асимметричным профилем. // Научные технологии в машиностроении. 2019. – № 9 (99). – С. 18-25.

7 Зайдес С.А., Хо Минь Куан, Май Дык Нгиа. Влияние радиуса сектора деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние в зоне контакта с цилиндрической поверхностью // Политехнический журнал. 2021. – Т. 25. – № 6 (161). – С. 697-707.

8 Вирт А.Э. Влияние силы деформирования при поверхностном пластическом деформировании на глубину упрочнения поверхностного слоя детали // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – №1 (115). – С 44-48.

References

1 Kudryavtsev, I. V. Effect of surface curvature on the depth of plastic deformation during hardening of parts by surface hardening / I. V. Kudryavtsev, G. E. Petushkov // Bulletin of mechanical engineering. - 1966. - No. 7. - P. 41-43.

2 Oteny, Ya. N. Technological support of surface quality and productivity of PPD processing with rollers: author's abstract. diss. candidate of technical sciences / Oteny Ya. N. - Kurgan, 1988. - 24 p.

3 Oteny Ya. N. Technological support of surface quality and productivity of PPD processing with rollers: author's abstract. diss. doctor of technical sciences Rostov-on-Don, 2007, 1988. - 24 p.

4 Handbook of mechanical engineer: in 6 volumes / ed. S. V. Serensen. - 3rd ed. - Moscow: Mashgiz, 1962. - Vol. 3. - 651 p.

5 Blumenstein V. Yu. Mitrofanova K. S. Refined finite element model of the process of finishing and hardening treatment with a complex profile tool. // Collection: Innovations in technology and education. Collection of articles by participants of the XIII International scientific and practical conference. Belovo, 2020. - Pp. 214-219.

6 Zaides S. A., Kolesnik A. V. Assessment of the stress-strain state during hardening of cylindrical parts with a roller with an asymmetric profile. // High-tech in mechanical engineering. 2019. - No. 9 (99). - Pp. 18-25.

7 Zaides S. A., Ho Minh Quan, Mai Duc Nghia. Influence of the radius of the sector of the deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface // Polytechnic Journal. 2021. - Vol. 25. - No. 6 (161). - P. 697-707.

8 Virt A.E. Influence of the deformation force during surface plastic deformation on the hardening depth of the surface layer of a part // Science-intensive technologies in mechanical engineering. - 2021. - No. 1 (115). - P. 44-48.

© Вирт А. Э., Лебедева Ю. В., 2025