

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №5 (179). С. 10-20.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №5 (179). P. 10-20.

Научная статья

УДК 621.787.4

doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-10-20

Влияние геометрии дифференциального тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние упрочненных деталей

Семён Азикович Зайдес¹, д.т.н.

Фам Мань Чинь², аспирант

Николай Орестович Тютрин³, к.т.н.

^{1, 2, 3} Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Россия

¹ zsa@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>

² phammanhchinh95@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4720-0594>

³ tno73@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2623-9979>

Аннотация. Представлена новая конструкция дифференциального тороидального инструмента, обеспечивающая интенсификацию напряженного состояния в очаге деформации за счет одновременной реализации процессов скольжения и качения в зоне нагружения. Рассмотрено влияние геометрических параметров рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при упрочнении дифференциальным тороидальным роликом. В результате компьютерного моделирования с использованием программы установлено, что профильные радиусы упрочняющих роликов, их диаметры и расстояние между вершинами профилей существенно влияют на максимальные значения временных и остаточных напряжений в деталях машин. Так, с уменьшением диаметра и профильных радиусов роликов временное и остаточное напряжение увеличивается на 10...28 %, а уменьшение межвершинного расстояния приводит к их увеличению на 11...15 %. Глубина упрочненного поверхностного слоя обратно пропорциональна профильным радиусам и диаметру инструмента и достигает максимального значения, равного 2,92 мм. При этом расстояние между вершинами профилей роликов практически не оказывает влияния на глубину упрочненного слоя. Эффективность предложенной конструкции дифференциального рабочего инструмента дополнительно оценивалась путем сравнения с результатами моделирования, полученными при упрочнении обычным тороидальным роликом, работающим исключительно по схеме качения без эффекта скольжения. В ходе сравнительного анализа установлено, что применение нового дифференциального инструмента обеспечивает увеличение интенсивности максимальных временных напряжений на 16 % и максимальной интенсивности сжимающих остаточных напряжений на 22 %. Более того, глубина упрочненного слоя возрастает в 2,6 раза по сравнению с обычным роликом, что является весьма значительным показателем. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о существенном превосходстве данного рабочего инструмента в обеспечении повышения уровня напряжений и глубины упрочненного слоя.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, дифференциальный тороидальный инструмент, временное напряжение, остаточное напряжение, глубина наклепа

Для цитирования: Зайдес С.А., Фам Мань Ч., Тютрин Н.О. Влияние геометрии дифференциального тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние упрочненных деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 5 (179). С. 10–20. doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-10-20

Influence of differential toroidal tool geometry on the elastic state of hardened parts

Semyon A. Zaydes¹, D. Eng.

Pham Man Chin², PhD student

Nikolay O. Tyutrin³, PhD. Eng.

^{1, 2, 3} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹ zsa@ex.istu.edu

² phammanhchinh95@gmail.com

³ tno73@yandex.ru

Abstract. A new design of a differential toroidal tool is presented, which provides an intensification of the stress state in the deformation center due to the simultaneous processes of sliding and rolling in the load zone. The influence of geometric parameters of a working tool on the elastic state of cylindrical parts under hardening by a differential toroidal roller is viewed. A computer modeling through the usage of a program resulted in the conclusion that profile radii of the reinforcing rollers, their diameters and the distance between the tops of the profiles significantly affect the maximum values of temporary and residual stresses in machine parts. Thus, with a decrease in the diameter and profile radii of the rollers, the temporary and residual stress increases by 10...28 %, and a decrease in the distance between the tops leads to an increase by 11...15 %. The depth of the hardened surface layer and the profile radii and the diameter of the tool are interconnected inversely and reaches a maximum value of 2,92 mm. At the same time, the distance between the tops of the roller profiles has practically no effect on the depth of the hardened layer. The effectiveness of the proposed design of the differential working tool was additionally evaluated by comparing it with the simulation results obtained under hardening with a conventional toroidal roller operating exclusively according to a rolling pattern without sliding effect. In the course of comparative analysis, it was found that the use of a new differential instrument provides an increase in the intensity of maximum temporary stresses by 16 % and the maximum intensity of compressive residual stresses by 22 %. Moreover, the depth of the hardened layer increases 2,6 times compared to a conventional roller, which is a very significant marker. The obtained results unambiguously prove the significant superiority of this working tool in ensuring an increase in the stress level and depth of the hardened layer.

Keywords: surface plastic deformation, differential toroidal tool, temporary stresses, residual stress, cold hardening depth

For citation: Zaydes S.A., Chin P.M., Tyutrin N.O. Influence of differential toroidal tool geometry on the elastic state of hardened parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 5 (179). P. 10–20. doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-10-20

Введение

Методы финишной обработки, такие как шлифование, хонингование и доводка, широко применяют для формирования деталей с заданной геометрией и точностью. Вместе с тем указанные процессы нередко не позволяют получить требуемые характеристики поверхностного слоя. Для улучшения его качества применяются методы поверхностного пластического деформирования (ППД), при которых удаление материала в виде стружки отсутствует, а воздействие сводится к локальному пластическому деформированию поверхностного слоя деталей. В результате достигается упрочнение поверхности, повышается износостойкость и коррозионная стойкость, возрастает усталостная прочность, а также проявляются

другие положительные эффекты. В ряде случаев применение ППД позволяет увеличить запас прочности деталей, работающих при переменных нагрузках, в 1,5 – 3 раза и значительно продлить срок их службы, иногда в десятки раз [1 – 4].

При отделочно-упрочняющей обработке ППД достаточно часто применяют способ обкатывания тороидальным роликовым инструментом. Процесс обкатывания характеризуется двумя движениями – качением или скольжением рабочего инструмента по поверхности заготовки. Процесс скольжения обеспечивает более выраженный эффект повышения поверхностного наклёпа, однако на практике преимущественно используют режим качения. Основной причиной является то, что в процессе скольжения выделяется значительное количество тепла,

что при недостаточном контроле может привести к снижению стойкости рабочего инструмента и повреждению упрочняемой поверхности [5, 6].

Одним из путей решения проблемы по обработке нежестких деталей является интенсификация напряженного состояния в очаге деформации путем воздействия двух процессов скольжения и качения. В ИРНИТУ разработаны инструменты с новой кинематикой движения, предназначенные для воздействия процессов качения и скольжения при поверхностном пластическом деформировании. В частности, предложен инструмент с деформирующим элементом в виде двух тороидальных роликов, ось вращения которых расположена перпендикулярно оси заготовки. Рабочий инструмент выполняет осциллирующее вращение вокруг оси, лежащей в плоскости соединения деформирующих роликов и перпендикулярной оси заготовки, с амплитудой α в пределах $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ [7]. Кроме того, разработан инструмент с деформирующим элементом в виде кругового сектора, которому сообщают колебательные круговые движения под углом, превышающим 0 и меньшим 45° [8]. Однако эти способы упрочнения основаны на циклических процессах качения и скольжения, что приводит к снижению эффективности обработки.

Авторами статьи разработана новая конструкция рабочего инструмента для ППД в виде дифференциального тороидального ролика, которая позволяет одновременно создавать в очаге деформации процессы скольжения и качения. Целью данной работы является определение влияния геометрии дифференциального тороидального инструмента на НДС в зоне деформации и остаточные напряжения в упрочненных цилиндрических деталях.

Кинематическая схема и особенности процесса ППД

Разрабатывая новый способ отделочно-упрочняющей обработки методом ППД, ставилась цель обеспечить высокое напряженное состояние в зоне упругопластической деформации. Это позволяет сократить радиальный натяг и, как следствие, уменьшить деформацию нежестких деталей в процессе обработки. Принцип действия предлагаемого способа

(рис. 1) заключается в обеспечении вращения заготовки 1 вокруг ее продольной оси с заданной частотой. Обрабатывающий инструмент, состоящий из двух независимых соосных роликов 2 и 3 с противоположными направлениями вращения, оказывает давление на поверхность заготовки и осуществляет продольное перемещение с подачей S вдоль оси заготовки.

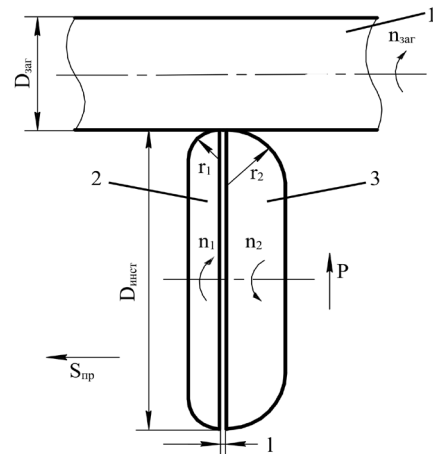


Рис. 1. Схема ППД с использованием дифференциального тороидального инструмента:

1 – заготовка; 2 – ролик скольжения; 3 – ролик качения

Fig. 1. FPM diagram using a differential toroidal tool:

1 – blank; 2 – sliding roller; 3 – wheeling roller

Ролик 2 с меньшим профильным радиусом, первым входит в контакт с исходным поверхностным слоем заготовки, вращается в направлении заготовки, создает очаг деформации (ОД) и упрочняет поверхность по схеме скольжения в зоне контакта. Ролик 3 с большим профильным радиусом вращается за счёт трения с заготовкой и упрочняет поверхность по схеме качения. Поскольку расстояние между вершинами профилей роликов достаточно мало, первый ролик частично или полностью работает в зоне ОД, создаваемого вторым роликом, имеющим больший радиус, чем первый. Вследствие этого происходит перекрытие очагов деформаций и их слияние в один комплексный ОД. В результате достигается улучшение механических характеристик материала поверхностного слоя деталей, а также снижение параметров шероховатости поверхности.

С использованием компьютерного моделирования необходимо определить напряженно-деформированное состояние в зоне контакта заготовки с деформирующим

инструментом в виде дифференциального тороидального элемента, выполненного из двух роликов с разными профильными радиусами и с противоположными направлениями вращения. Определить интенсивность временных, остаточных напряжений и глубину наклепа при разных профильных радиусах роликов, расстояниях между их вершинами и диаметрах инструмента.

Особенности моделирования методом конечных элементов

В настоящее время для исследования процессов упрочнения с использованием методов поверхностного пластического деформирования и для определения величин временных и остаточных напряжений, а также анализа напряженно-деформированного состояния в зоне деформации, широко применяются численные методы на основе метода конечных элементов (МКЭ). Одним из наиболее распространенных программных комплексов, реализующих данный подход, является ANSYS [9 – 11], использованный при выполнении настоящей работы.

В процессе обработки используется комбинация схем скольжения и качения, при этом коэффициент трения при скольжении значительно выше, чем при качении, что оказывает существенное влияние на механические характеристики заготовки после обработки. При этом, процесс пластического деформирования материала и изменение НДС происходит во времени. Таким образом, анализ закономерностей перераспределения временных напряжений и образования остаточных деформаций с учетом фактора времени представляет собой актуальную научную задачу. Для проведения расчетов при динамическом нагружении построена геометрическая модель в виде дифференциального инструмента, состоящего из двух соосных тороидальных роликов. При этом ролик с меньшим профильным радиусом находится на фронтальной стороне инструмента и вращается в направлении вращения заготовки, а ролик с большим радиусом находится на тыльной стороне инструмента и вращается в противоположном направлении (рис. 2).

В качестве образца использован цилиндр

диаметром $D_{\text{заг}} = 20$ мм, изготовленной из стали 45, представляющий собой упругопластический упрочняющийся материал. Модуль упругости составляет $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Диаграмма деформирования материала принята билинейной: предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 600$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа.

Рабочий инструмент представлен двумя соосными роликами с диаметрами в диапазоне $D_{\text{инст}} = 10 \dots 90$ мм, имеющие независимое вращение. Материал роликов – твердый сплав ВК8, для которого модуль упругости составляет $E = 6 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Профильный радиус ролика 1 (с меньшим профильным радиусом) изменяется в диапазоне $r_1 = 0,5 \dots 4$ мм; профильный радиус ролика 2 (с большим профильным радиусом) изменяется в диапазоне $r_2 = 4 \dots 10$ мм. Расстояние между вершинами профилей роликов изменяется от 1,5 до 5 мм.

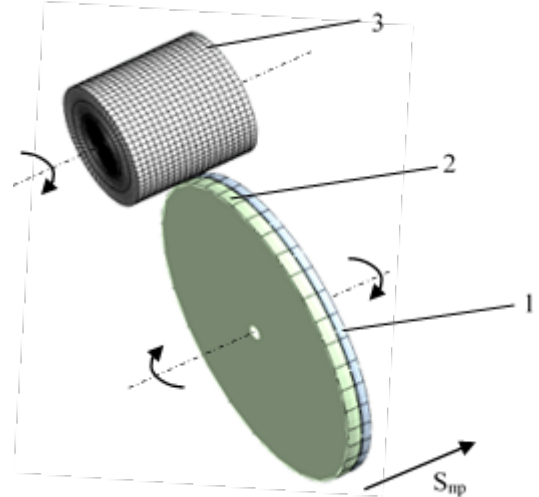


Рис. 2. Конечно-элементная модель при упрочнении цилиндрической детали дифференциальным тороидальным инструментом:

1 – ролик скольжения с радиусом r_1 ; 2 – ролик качения с радиусом r_2 ; 3 – цилиндр диаметром $D_{\text{заг}}$

Fig. 2. Finite element model for hardening a cylindrical part with a differential toroidal tool:

1 – sliding roller with radius r_1 ; 2 – wheeling roller with radius r_2 ; 3 – cylinder with a diameter $D_{\text{заг}}$

Для оценки напряженного состояния в разных точках упрочненных образцов определена интенсивность временных и остаточные напряжения (von – Mises) по осям Oz (осевые $\sigma_z^{\text{вп}}$, $\sigma_z^{\text{ост}}$), Ox (радиальные $\sigma_r^{\text{вп}}$, $\sigma_r^{\text{ост}}$), Oy (тангенциальные $\sigma_{\phi}^{\text{вп}}$, $\sigma_{\phi}^{\text{ост}}$) [9].

$$\sigma_i^{BP} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{BP} - \sigma_\phi^{BP})^2 + (\sigma_\phi^{BP} - \sigma_r^{BP})^2 + (\sigma_r^{BP} - \sigma_z^{BP})^2]}, \quad (1)$$

$$\sigma_i^{OCT} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{OCT} - \sigma_\phi^{OCT})^2 + (\sigma_\phi^{OCT} - \sigma_r^{OCT})^2 + (\sigma_r^{OCT} - \sigma_z^{OCT})^2]}. \quad (2)$$

Для определения напряжённо-деформированного состояния упрочнённых деталей были использованы следующие базовые режимы обработки: Диаметр заготовки составлял 20 мм, частота её вращения – 100 об/мин. Диаметр инструмента равнялся 50 мм. Профильный радиус ролика скольжения был принят равным 3 мм при частоте вращения 10 об/мин, а ролика качения – 5 мм при частоте вращения 40 об/мин. Межвершинное расстояние роликов составляло 2 мм, радиальный натяг – 0,05 мм, продольная подача – 0,1 мм/об. Коэффициенты трения при качении и скольжении принимались равными 0,1 и 0,2 соответственно.

Результаты моделирования и их обсуждение

В процессе ППД формируется напряженно-деформированное состояние заготовки, которое характеризуется двумя ключевыми параметрами: временными и остаточными напряжениями. Временные напряжения возникают в момент непосредственного воздействия внешних сил, передаваемых рабочим инструментом, а остаточные напряжения – после снятия нагрузки. Временные напряжения во многом задают энергетические и силовые характеристики процесса ППД, определяя образование упрочнённого слоя, его глубину и интенсивность, а также уровень давления в зоне деформации и долговечность инструмента. Остаточные напряжения, формирующиеся после обработки, существенно влияют на усталостную долговечность изделий, механизмы зарождения и развития разрушения, их износо- и коррозионную стойкость, а также на другие эксплуатационные показатели [12, 13].

Было замечено, что в процессе обкатывания максимальные временные напряжения концентрируются в зоне контакта заготовки с роликом и достигают значения 457,15 МПа. После снятия нагрузки остаточные напряжения равномерно распределяются в объеме заготовки, постепенно уменьшаясь от поверхности к центральной зоне, и достигают значения

354,55 МПа на поверхности, что близко к пределу текучести стали 45, равному 360 МПа. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность данного метода в повышении напряжённого состояния деталей после упрочняющей обработки.

В процессе поверхностного пластического деформирования (ППД) под воздействием рабочего инструмента на поверхности заготовки по всем координатным направлениям возникают максимальные значения временных напряжений сжатия. В результате снятия внешней нагрузки в поверхностных слоях детали устанавливаются остаточные напряжения сжатия, тогда как в ее центральной зоне формируются остаточные напряжения растягивающего характера. Максимумы осевых и тангенциальных компонент остаточных напряжений сжатия локализуются непосредственно на поверхности. Радиальные остаточные напряжения на поверхности детали равны нулю.

В данном случае диаметр дифференциального тороидального инструмента является важным параметром механики процесса деформирования и структурообразования и должен иметь оптимальное значение для обеспечения интенсификации деформационного воздействия.

Процесс упрочнения при дифференциальном роликовом обкатывании протекает с одновременным наличием процессов качения и скольжения. В связи с этим, для объективной оценки влияния диаметра инструмента на напряжённо-деформированного состояния деталей, частота вращения второго ролика была установлена в соответствии с режимом плавного качения, тогда как частота вращения первого ролика подбиралась таким образом, чтобы при различных диаметрах роликов относительная скорость скольжения оставалась постоянной. В табл. 1 представлены параметры упрочнения для оценки влияния диаметра дифференциального торообразного инструмента на НДС.

На рис. 3 представлена зависимость

максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений от диаметра рабочего инструмента. Анализ результатов свидетельствует о монотонном снижении указанных напряжений при увеличении диаметра инструмента. Это обусловлено тем, что при неизменном радиальном натяге рост диаметра приводит к расширению площади контакта роликов с поверхностью заготовки и, соответственно, к уменьшению

контактных напряжений. Вследствие этого интенсивность как временных, так и остаточных напряжений в поверхностном слое существенно снижается. Установлено, что при $D_{инст} < 30$ мм максимальные остаточные напряжения превышают предел текучести материала $\sigma_T = 360$ МПа. В связи с этим при выборе диаметра инструмента для обработки рекомендуется использовать значения в диапазоне 30...60 мм.

1. Параметры упрочнения для оценки влияния диаметра дифференциального торообразного инструмента на НДС

1. Hardening parameters for assessing the effect of the diameter of a differential torus-shaped tool on ES

$D_{заг}$ (мм)	$n_{заг}$ (об/мин)	$D_{инст}$ (мм)	r_1 (мм)	n_1 (об/мин)	r_2 (мм)	n_2 (об/мин)
20	100	10	3	50,0	5	200,0
20	100	30	3	16,7	5	66,7
20	100	50	3	10,0	5	40,0
20	100	70	3	7,1	5	28,6
20	100	90	3	5,6	5	22,2

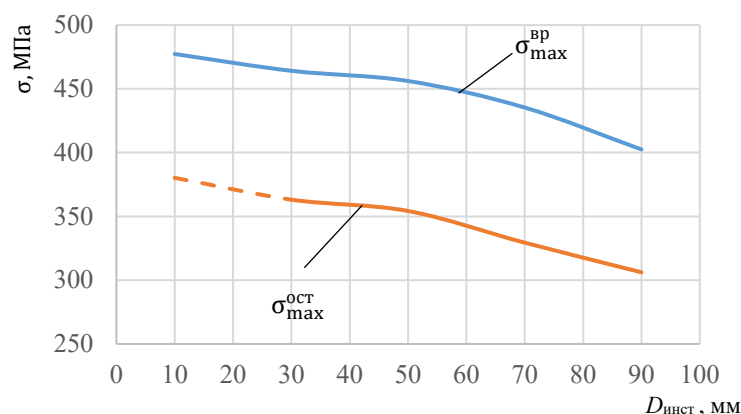


Рис. 3. Зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от диаметра рабочего инструмента

Fig. 3. Dependence of the intensity of maximum temporary and residual stresses on the diameter of the working tool

Зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от величины профильных радиусов двух роликов представлена на рис. 4. При увеличении радиусов профиля роликов наблюдается последовательное уменьшение величины максимальных временных и остаточных напряжений. При этом увеличение профильного радиуса ролика скольжения приводит к значительно более быстрому снижению величины интенсивности

напряжений по сравнению с увеличением профильного радиуса ролика качения. Аналогично изменению диаметра рабочего инструмента, варьирование профильных радиусов приводит к изменению размеров эллиптической зоны контакта. Но расширение контактной области в данном случае происходит преимущественно вдоль другой главной оси эллипса, перпендикулярной первой.

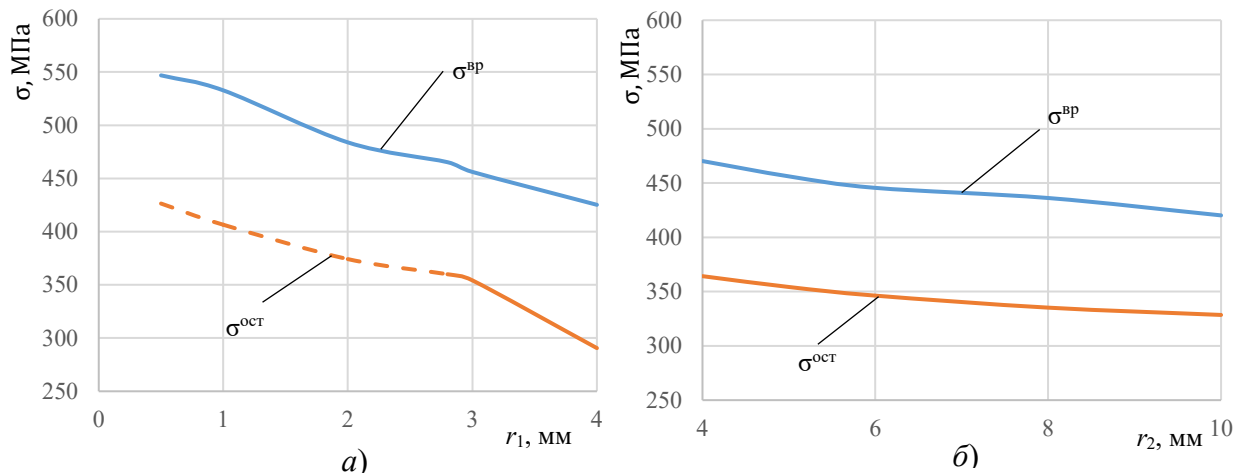


Рис. 4. Зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от профильных радиусов роликов при их постоянном значении:
а – $r_2 = 5$ мм; б – $r_1 = 3$ мм

Fig. 4. Dependence of the intensity of maximum temporary and residual stresses on the profile radii of the rollers at their constant value:
а – $r_2 = 5$ mm; б – $r_1 = 3$ mm

При малых значениях профильного радиуса ролика скольжения $r_2 < 2,75$ мм максимальные значения интенсивности остаточных напряжений превышают предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа. Формирование таких напряжений в процессе упрочнения является нежелательным фактом, поскольку может привести к пластической деформации поверхностного слоя после обработки и к снижению остаточных напряжений.

Следовательно, наиболее эффективный процесс упрочнения ППД с использованием дифференциального тороидального инструмента реализуется при рациональном выборе профильных радиусов роликов, значения которых находятся в следующих диапазонах: $r_1 = 2,8 \dots 3,5$ мм; $r_1 = 4 \dots 6$ мм.

При малом расстоянии между вершинами роликов зоны деформации, формируемые каждым роликом, частично или полностью перекрываются, что приводит к образованию суммарного напряжённого состояния. Однако в зависимости от физико-механических свойств материала заготовки данное расстояние должно быть выбрано рационально: степень перекрытия очагов деформации не должна вызывать резкого увеличения напряжений, способного привести к снижению качества поверхностного слоя, и в то же время расстояние между вершинами профилей роликов не должно быть чрезмерно большим, поскольку в этом случае ролики будут

функционировать как независимые деформирующие элементы.

Следует отметить, что межвершинное расстояние между роликами зависит не только от их взаимного расположения, но и от профильных радиусов роликов. Указанное расстояние выбирается из условия одновременного обеспечения конструктивного зазора для независимого вращения роликов и формирования зоны контакта с заготовкой с заданными радиусами. Таким образом, межвершинное расстояние роликов должно определяться с учетом выражения:

$$L \geq \sqrt{r_1^2 - (r_1 - t)^2} + \sqrt{r_2^2 - (r_2 - t)^2} + 1, \quad (3)$$

где r_1 – профильный радиус 1-ого ролика; r_2 – профильный радиус 2-ого ролика; t – радиальный натяг; 1 – конструктивный зазор.

Зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от межвершинного расстояния роликов при базовых режимах обработки показана на рис. 5. По данным графика можно сделать вывод о том, что при одинаковых профильных радиусах роликов и их диаметрах, уменьшение межвершинного расстояния приводит к возрастанию интенсивности временного и остаточного напряжений в очаге деформации. Это связано со степенью перекрытия очагов деформации двух роликов.

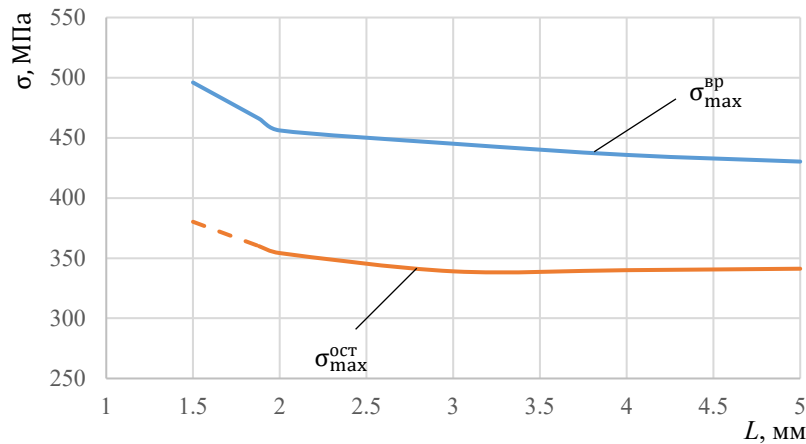


Рис. 5. Зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от межвершинного расстояния роликов

Fig. 5. Dependence of the intensity of maximum temporary and residual stresses on the distance between the tops of the rollers

При уменьшении межвершинного расстояния до значений менее 1,8 мм в поверхностном слое формируются остаточные напряжения, интенсивность которых превышает предел текучести материала заготовки ($\sigma_T = 360$ МПа). Такое напряжённое состояние считается недопустимым, поскольку после снятия нагрузки происходит пластическая деформация металла, которая приводит к снижению остаточных напряжений и нарушению стабильности геометрических размеров детали. При $l > 4$ мм очаги деформации двух роликов не влияют друг на друга и можно считать, что они работают раздельно. При этом напряжение уменьшается и эффект одновременного действия двух процессов скольжения и качения не происходит.

Различные методы ППД вызывают пластическую деформацию поверхностных слоев материала, глубина которой определяется величиной временных радиальных напряжений в зоне контакта при непосредственном воздействии рабочего инструмента. Данные о глубине проникновения пластической деформации являются важной основой для оценки физико-механических и эксплуатационных характеристик упрочненных деталей [14].

Зона пластической деформации определяется участком, где временные напряжения достигают предела текучести материала. С использованием компьютерной программы

глубина упрочненного слоя может быть определена через анализ изополос пластических деформаций, который показывает, что деформация распределяется равномерно по сечению заготовки и уменьшается от поверхности к её центральной части.

Зависимость глубины пластической деформации и временных радиальных напряжений от радиусов профиля деформирующих роликов при их постоянном значении представлена на рис. 6. Установлено, что при минимальных значениях профильных радиусов роликов формируется наибольшее значение временных радиальных напряжений сжатия, и соответственно, наибольшая глубина упрочнённого слоя, достигающая $h = 2,64$ мм. По мере увеличения профильных радиусов роликов наблюдается устойчивая тенденция к снижению глубины пластической деформации, что обусловлено расширением зоны контакта и уменьшением интенсивности напряжённого состояния в поверхностном слое заготовки.

Рис. 7, а демонстрирует, как глубина пластической деформации изменяется в зависимости от диаметра инструмента. Наибольшая глубина упрочненного слоя ($h = 2,92$ мм) наблюдается при наименьших диаметрах деформирующих роликов ($D_{\text{инст}} = 10$ мм). С ростом диаметра инструмента наблюдается уменьшение глубины пластической деформации h .

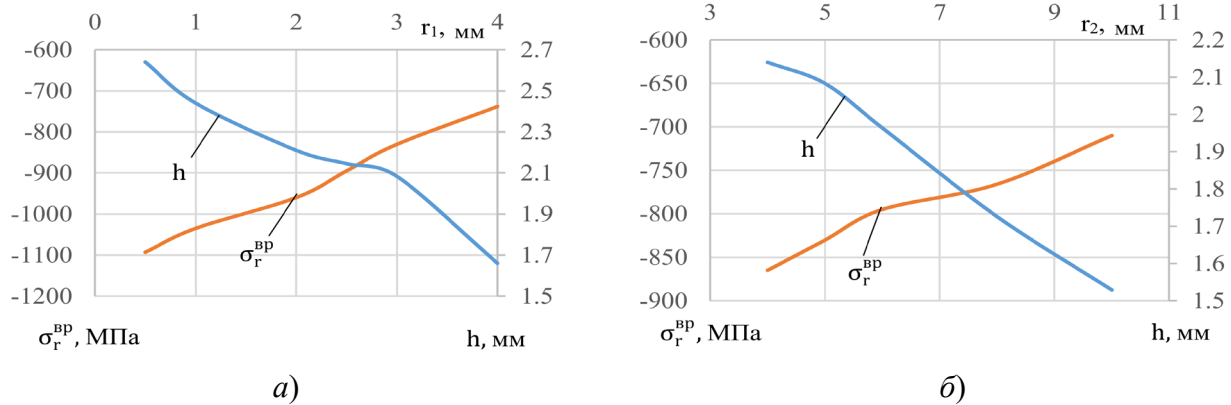


Рис. 6. Зависимость глубины пластической деформации и временных радиальных напряжений от величины профильных радиусов роликов:

$a - r_2 = 5$ мм; $b - r_1 = 3$ мм

Fig. 6. The dependence of the depth of yield strain and temporary radial stresses on the size of the profile radii of the rollers:

$a - r_2 = 5$ mm; $b - r_1 = 3$ mm

Результат моделирования показывает, что изменение расстояния между роликами оказывает незначительное влияние на величину глубины пластической деформации, которое в рассматриваемом диапазоне параметров остается практически постоянным $h = 2,1$ мм (рис. 7, б).

Для оценки эффективности дифференциального тороидального инструмента при упрочнении цилиндрических деталей проведено сравнение результатов моделирования с тороидальным роликом, который обычно применяют на практике. На рис. 8 показаны максимальные значения интенсивности временных и остаточных напряжений, а также глубина упрочнённого слоя при использовании двух

деформирующих инструментов для поверхностного пластического деформирования: тороидального ролика и дифференциального тороидального инструмента при одинаковых режимах обработки. Результаты моделирования показывают, что использование предложенного рабочего инструмента приводит к увеличению интенсивности максимальных временных напряжений на 16 % и максимальной интенсивности сжимающих остаточных напряжений на 22 %, при этом глубина упрочнённого слоя возрастает в 2,6 раза, что свидетельствует о существенном превосходстве данного рабочего инструмента в обеспечении повышения уровня напряжений и глубины упрочнённого слоя.

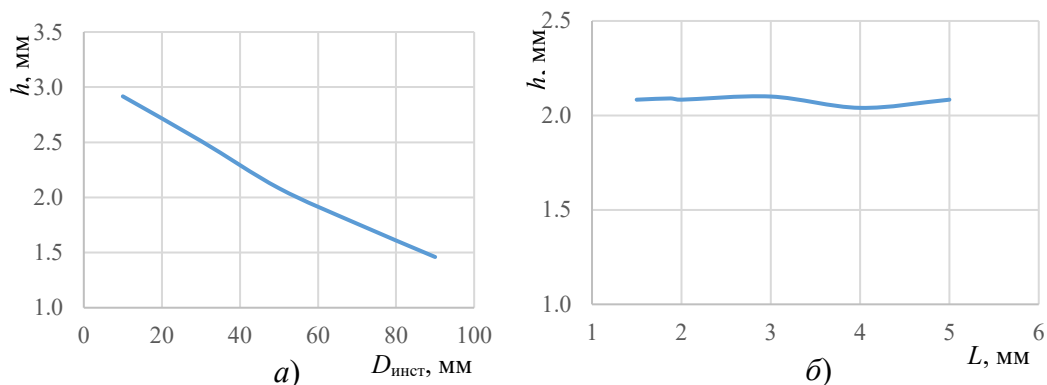


Рис. 7. Зависимость глубины пластической деформации от диаметров деформирующих роликов (а) и межвершинного расстояния (б)

Fig. 7. The dependence of the depth of yield strain on the diameters of the deforming rollers (a) and the distance between tops (b)

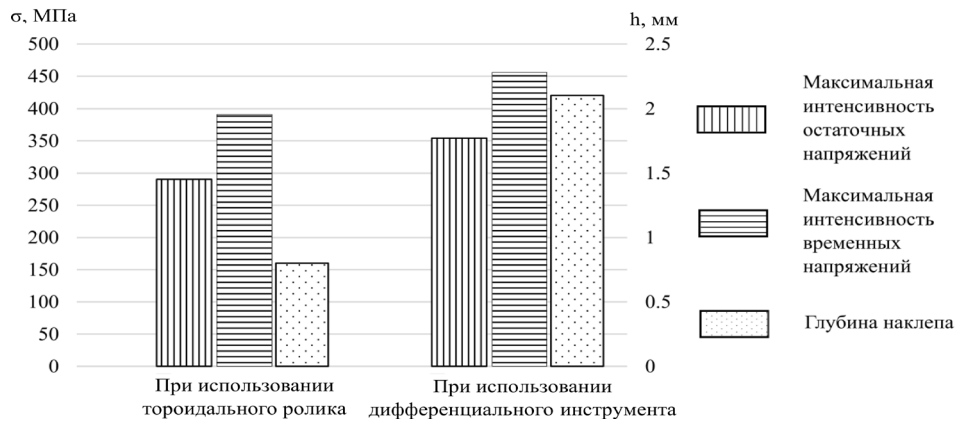


Рис. 8. Сравнение максимальных значений интенсивности временных, остаточных напряжений и глубины наклепа при ПД тороидальным роликом и дифференциальным тороидальным инструментом

Fig. 8. Comparison of the maximum values of the intensity of temporary, residual stresses and the depth of work hardening in case of FPM with a toroidal roller and a differential toroidal tool.

Заклучение

На основе результатов исследования закономерностей изменения временных и остаточных напряжений, а также глубины упрочнённого слоя, при упрочнении цилиндрических деталей дифференциальным тороидальным инструментом можно сделать следующие выводы:

1. Разработана новая конструкция деформирующего инструмента, позволяющая реализовывать в очаге упругопластической деформации одновременно процессы скольжения и качения осуществляемыми двумя дифференциальными тороидальными роликами. По результатам конечно-элементного моделирования определены рациональные геометрические параметры деформирующего инструмента, обеспечивающие даже при минимальном радиальном натяге (0,05 мм) высокий уровень интенсивности временных и остаточных сжимающих напряжений: Диаметр рабочего инструмента $D_{инст} = 50$ мм, профильный радиус ролика скольжения $r_1 = 3$ мм, профильный радиус ролика качения $r_2 = 5$ мм, расстояние между вершинами профильных радиусов $l = 2$ мм.

2. Расстояние между вершинами профилей ролика скольжения и ролика качения оказывает влияние на степень перекрытия очагов деформации и, соответственно, существенно сказывается на напряжённо-деформированном состоянии поверхности заготовки. Уменьшение расстояния между вершинами роликов до значений $l < 3$ мм вызывает перекрытие очагов

деформации, вследствие чего наблюдается рост временных и остаточных напряжений на 12...15 %.

3. Эффективность предложенной конструкции дифференциального рабочего инструмента сравнивали с результатами моделирования, полученных при упрочнении обычным тороидальным роликом, работающим по схеме качения. Установлено увеличение интенсивности максимальных временных напряжений на 16 % и максимальной интенсивности сжимающих остаточных напряжений на 22 %, при этом глубина упрочнённого слоя возрастает в 2,6 раза, что свидетельствует о существенном превосходстве данного рабочего инструмента в обеспечении повышения уровня напряжений и глубины упрочнённого слоя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. 504 с.
3. Зайдес С.А., Хай Н. Х. Анализ и выбор способа поверхностного пластического деформирования для повышения эффективности упрочнения цилиндрических деталей машин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2025. № 3 (780). С. 77–85.
4. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопольных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 8. С. 7–16.
5. Duncheva G., Maximov J., Anchev A., Dunchev V., Anastasov K., Argirov Y. Effect of Roller Burnishing and

Slide Roller Burnishing on Fatigue Strength of AISI 304 Steel: Comparative Analysis. Metals. 2024. P. 710. <https://doi.org/10.3390/met14060710>

6. Masato O., Shohei S., Kei W., Yorihiro Y., Naoki A. Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects. Mechatronics. 2015. Pp. 110–118. ISSN 0957-4158, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2014.11.002>.

7. Патент RU № 2757643, МПК В24В 39/04. Способ поверхностно-пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения; опубликовано 19.10.2021.

8. Патент RU № 2758713, МПК В24В 39/04. Способ поверхностно-пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения; опубликовано 01.11.2021.

9. Lee H.H. Finite element simulations with ANSYS workbench 2019. SDC publications. 2019. 614.

10. Фёдорова Н.Н., Захарова Ю.В., Данилов М.Н., Вальгер С.А. Основы работы в ANSYS 17. Litres. 2022. 210 с.

11. Saiaf B.R., Mazedur R.M. Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer, Procedia Structural Integrity. 2020. Pp. 1892–1900. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>.

12. Mahalov M.S., Blumenstein V.Y. Surface plastic deformation mechanics. The hardenable elastic-plastic body model // Metal Working and Material Science. 2018. T. 20. №. 4. С. 6–20.

13. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под ред. Зайдеса С. А. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 2015. 396 с.

14. Отеней Я.Н., Привалов Н.И., Щеголев Н.Г., Муравьев О.П., Ткачева Ю.О. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12. С. 452–455.

REFERENCES

1. Odintsov L.G. Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 328 p.

2. Handbook of surface plastic deformation processes / edited by S.A. Zaides. Irkutsk: Publishing house of IRNTU, 2021. 504 p.

3. Zaides S.A., Hai N.H. Analysis and choice of a method of surface plastic deformation to increase the effectiveness of hardening cylindrical machine parts // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mechanical engineering. 2025. No. 3 (780). pp. 77–85.

4. Blumenstein V.Yu. Mechanics of technological inheritance as scientific basis of designing complex-profile tools for hardening treatment by surface plastic deformation // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2017, no. 8, pp. 7-16.

5. Duncheva G., Maximov J., Anchev A., Dunchev V., Anastasov K., Argirov Y. Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Fatigue Strength of AISI 304 Steel: Comparative Analysis. Metals. 2024. P. 710. <https://doi.org/10.3390/met14060710>

6. Masato O., Shohei S., Kei W., Yorihiro Y., Naoki A. Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects. Mechatronics. 2015, Pp. 110–118. ISSN 0957-4158, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2014.11.002>.

7. Patent RU No. 2757643, IPC B24B 39/04. Method of surface plastic deformation of the outer surface of a part in the form of a body of rotation; published on 10/19/2021.

8. Patent RU No. 2758713 IPC B24B 39/04. Method of surface plastic deformation of the outer surface of a part in the form of a body of rotation; published on 11/01/2021.

9. Lee H.H. Finite element simulations with ANSYS workbench 2019. SDC publications. 2019. 614

10. Fedorova N.N., Zakharova Yu.V., Danilov M.N., Walger S.A. Fundamentals of work in ANSYS 17. Liters. 2022. 210 p.

11. Saiaf B.R., Mazedur R.M. Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer, Procedia Structural Integrity. 2020. Pp. 1892–1900. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>.

12. Mahalov M.S., Blumenstein V.Y. Surface plastic deformation mechanics. The hardenable elastic-plastic body model // Metal Working and Material Science. 2018. vol. 20. No. 4. pp. 6–20.

13. Encyclopedia of surface plastic deformation / ed. Zaides S.A. Irkutsk: Publishing House of IRNTU. 2015. 396 p.

14. Oteniy Ya.N., Privalov N.I., Shchegolev N.G., Muravyov O.P., Tkacheva Yu.O. Features of formation of hardening depth at parts processing by surface plastic deformation // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2016. No. 12. pp. 452–455.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.01.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted 18.01.2025; approved after reviewing 27.02.2026; assepted for publication 20.03.2026.