

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.787.4

DOI:10.18324/2077-5415-2025-2-7-15

Влияние формы и диаметра тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндричных деталей

С.А. Зайдес^а, В.Т.Т. Та^б

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^а zsa@istu.edu, ^б tavanthang95@gmail.com^а <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>, ^б <https://orcid.org/0009-0006-7637-617X>

Статья поступила 06.03.2025, принята 17.05.2025

В данной работе исследуется влияние геометрических параметров тороидальных роликов на распределение временных и остаточных напряжений при упрочняющей обработке. Моделирование проведено в программном комплексе ANSYS с учетом базовых режимов нагружения. Полученные результаты позволяют выявить ключевые закономерности, определяющие эффективность упрочнения в зависимости от формы и размеров инструмента. Рассмотрены четыре вида тороидальных роликов с разными диаметрными размерами. Анализ показал, что увеличение диаметра тороидального ролика приводит к расширению зоны, что снижает контактные напряжения и уменьшает локальную концентрацию нагрузок. Оптимальными размерами инструментов, обеспечивающими баланс между упрочнением и равномерным распределением напряжений, являются диаметр $D_{ин} = 50$ мм для двухрадиусных роликов и $D_{ин} = 30$ мм для однорадиусного. Двухрадиусный ролик с одинаковыми радиусами формирует симметричное пластическое деформирование, что способствует равномерному распределению напряжений и созданию высоких временных напряжений. Для ролика с разными радиусами скругления меньший радиус вызывает локализованную деформацию, а больший сглаживает микронеровности, что приводит к увеличению общего уровня напряженного состояния. Наибольшие напряжения создаются тороидальным роликом с чередующимися секторами, поскольку динамическое воздействие каждого из них, преодоление радиального натяга и малые радиусы скругления на рабочих кромках секторов способствуют значительному повышению напряженного состояния. Максимальная глубина упрочнения достигается также при использовании ролика с чередующимися секторами и разными радиусами, так как такая конструкция увеличивает локальную концентрацию нагрузок. Это положительно сказывается на механических свойствах упрочненного слоя, повышая его стойкость к разрушению и трещинообразованию. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров упрочняющей обработки, что позволит повысить эксплуатационные характеристики деталей и продлить срок их службы.

Ключевые слова: тороидальный ролик; однорадиусный ролик; двухрадиусный ролик; диаметр ролика; радиус скругления; метод конечных элементов; временное напряжение; остаточное напряжение; глубина упрочненного слоя.

Influence of toroidal roller shape and diameter on stress-strain state of cylindrical parts

S.A. Zaides^а, V.T.T. Ta^б

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^а zsa@istu.edu, ^б tavanthang95@gmail.com^а <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>, ^б <https://orcid.org/0009-0006-7637-617X>

Received 06.03.2025, accepted 17.05.2025

This study investigates the influence of the geometric parameters of toroidal rollers on the distribution of transient and residual stresses during strengthening treatment. The modeling is carried out in the ANSYS software package, taking into account the basic loading modes. The obtained results reveal key patterns that determine the effectiveness of strengthening depending on the shape and size of the tool. Four types of toroidal rollers with different diametrical sizes are considered. The analysis shows that increasing the diameter of the toroidal roller expands the affected zone, thereby reducing contact stresses and decreasing local stress concentrations. The optimal tool sizes that ensure a balance between strengthening and uniform stress distribution are a diameter of $D_{in} = 50$ mm for two-radius rollers and $D_{in} = 30$ mm for single-radius rollers. A two-radius roller with identical radii forms symmetrical plastic deformation, promoting uniform stress distribution and creating high transient stresses. For a roller with different rounding radii, the smaller radius induces localized deformation, while the larger radius smooths out micro-roughness, leading to an overall increase in stress levels. The highest stresses are generated by the toroidal roller with alternating sectors, as the dynamic impact of each sector, the overcoming of radial interference, and the small rounding radii at the working edges of the sectors significantly enhance the stress state. The maximum strengthening depth is also achieved when using a roller with alternating sectors and different radii, as this design increases local stress concentration. This positively affects the mechanical properties of the strengthened layer, improving its resistance to fracture and crack

formation. The obtained results can be used to optimize the parameters of the strengthening treatment, thereby improving the operational characteristics of parts and extending their service life.

Keywords: toroidal roller; single-radius roller; dual-radius roller; roller diameter; fillet radius; finite element method; transient stress; residual stress; work-hardened layer depth.

Введение. Для повышения качества деталей машин используют отделочно-упрочняющие технологические процессы, среди которых поверхностное пластическое деформирование (ППД) достаточно широко применяют на практике. Благодаря пластической деформации тонкого поверхностного слоя удается не только сгладить микронеровности, но и упрочнить периферийный слой с формированием в нем сжимающих остаточных напряжений [1]. Упрочненный поверхностный слой оказывает положительное влияние на повышение износостойкости, усталостной прочности, контактной жесткости и другие эксплуатационные характеристики деталей машин [2–4].

Большое влияние на состояние поверхностного слоя оказывает рабочий инструмент, осуществляющий пластическое деформирование материала. От размера и формы деформирующего элемента зависит напряженное состояние в очаге деформации, оказывающее влияние на процесс сглаживания микронеровностей и на эффективность упрочнения поверхностного слоя.

Большую долю деформирующих инструментов при ППД составляют тороидальные ролики [5]. По сравнению с шариками они обладают большей износостойкостью и надежностью благодаря относительно простой конструкции рабочих инструментов. Тороидальные ролики обеспечивают более надежно процесс качения, но степень упрочнения при этом невысокая. Для повышения эффективности работы таких инструментов разработан способ упрочнения, основанный на использовании двух вдвоенных тороидальных роликов [6]. Стесненная деформация, возникающая между двумя роликами, обеспечивает повышенное напряженное состояние в очаге деформации. Аналогичный физический эффект был получен и при ППД мультирадиусным роликом, состоящим из четырех дисков [7].

Для повышения упрочняющего эффекта при обработке тороидальным роликом была разработана технология ротационного деформирования элементами в виде шариков, расположенных в полостях на образующей поверхности диска [8]. Однако в такой конструкции инструмента деформирующее воздействие зависит от величины центробежной силы, возникающей при вращении инструментального диска. В этом случае возникает некоторое несоответствие между массой шариков и результирующим давлением в зоне деформации. Шарiki малого диаметра обеспечивают большую эффективность упрочнения, но их небольшая масса не обеспечивает необходимую величину центробежной силы. Шарiki большего диаметра дают обратный эффект – масса их больше, центробежная сила соответственно выше, а интенсивность упрочнения не высокая в связи с повышенной площадью зоны контакта.

При упрочняющей обработке нежестких цилиндрических деталей величина деформирующей силы имеет важное значение для обеспечения их качества. При большой величине деформирующей силы заготовка

легко изгибается и не дает возможности для обеспечения не только качества поверхностного слоя, но и сохранения цилиндрической формы заготовки. При снижении деформирующей силы, прогиб заготовки снижается, но возникают проблемы с получением необходимой степени упрочнения [9].

Один из подходов для решения данной проблемы заключается в интенсификации напряженного состояния в очаге упругопластической деформации без увеличения деформирующей силы. Решение этого вопроса строится на переходе в зоне контакта инструмента с заготовкой от постоянного нагружения к циклическому, которое обеспечивает более высокий уровень напряжений в зоне деформации по сравнению с гладким тороидальным роликом.

Цель настоящей работы заключается в определении влияния диаметра тороидального ролика с разной формой деформирующих элементов на напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в цилиндрических деталях машин.

Формы тороидальных роликов. Для решения вопроса по интенсификации напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании рассмотрим некоторые формы тороидальных роликов, представленные на рис. 1. Ролик с одним профильным радиусом (см. рис. 1, а) прост по конструкции и достаточно широко применяется в производственной практике, когда необходимо эффективно сгладить микронеровности поверхности после обработки резанием. Однако степень упрочнения поверхностного слоя при этом невысокая, так как площадь контакта инструмента с заготовкой достаточно велика и поле возникающих деформаций относительно свободно распределяется в объеме тела.

Для усиления упрочняющего эффекта было предложено использовать вдвоенный ролик [10], или ролик с двумя профильными радиусами скругления (см. рис. 1, б). В этом случае поля деформации, возникающие от каждого радиусного профиля, находятся в стесненных условиях и, накладываясь друг на друга, образуют повышенное напряженное состояние по сравнению с воздействием однопрофильного ролика (см. рис. 1, а).

Для расширения технологических возможностей вдвоенного инструмента предлагается использование разных профильных радиусов (см. рис. 1, в). Профиль меньшего из них используется для усиления степени упрочнения, а большего – для сглаживания микронеровностей поверхности деталей [11]. Чтобы увеличить напряженное состояние в очаге деформации при использовании такого ролика, его торовую поверхность разделили на отдельные сектора, которые последовательно (ротационно) воздействуют на поверхность заготовки (см. рис. 1, г). Рабочая поверхность каждого деформирующего участка представляет собой вдвоенный тороидальный контур с разными профильными радиусами:

меньший радиус профиля обеспечивает упрочняющий эффект, а больший – выравнивающий. В данной работе рассматривается влияние формы и диаметального размера торoidalных роликов (см. рис. 1) на напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в упрочненных деталях.

Исходные данные для конечно-элементного моделирования. В настоящее время для определения значений временных, остаточных напряжений и анализа напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при упрочнении различными способами ППД успешно применяется компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко

применяемых компьютерных программ, реализующих МКЭ, является ANSYS [12, 13], которая и была использована в данной работе.

Характеристики образца: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром $D_{заг} = 20$ мм; материал – сталь 45 – упругопластический, упрочняющийся, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала – билинейная (предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, предел прочности $\sigma_{\sigma} = 630$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа).

Характеристики инструмента: недеформированный материал; коэффициент трения в зоне контакта рабочего инструмента с образцом $f = 0,2$.

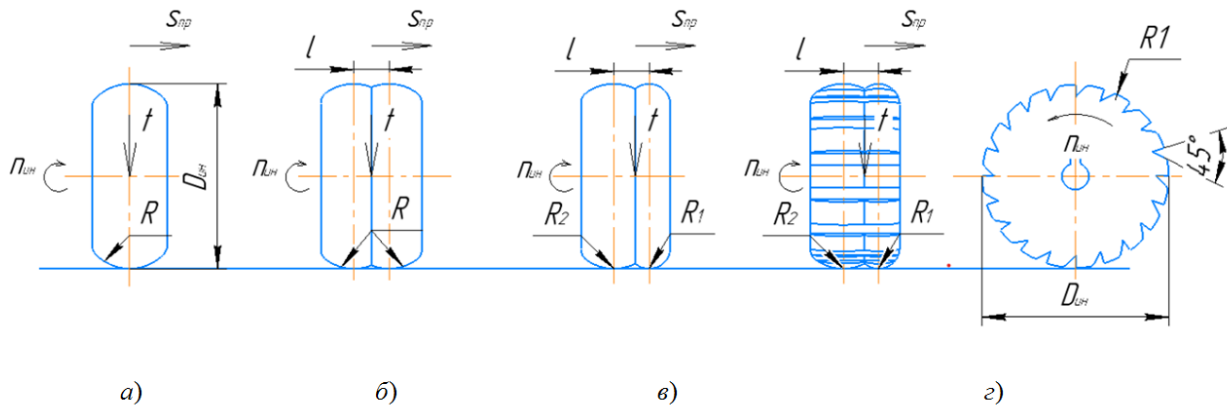


Рис. 1. Формы торoidalных роликов: однорадиусный (а); двухрадиусный (б); двухрадиусный с разными радиусами скругления (в); торoidalный с чередующимися секторами и разными радиусами скругления (г)

На рис. 2 приведены конечно-элементные модели процесса упрочнения торoidalными роликами при помощи CAD/CAE системы Ansys 2023R1. Конечно-элементная форма цилиндрического образца имеет

следующие параметры: сетка квадратной формы с размером 1 мм содержит 23641 конечных элементов, 4937 узла. Конечно-элементная форма инструмента создается в программе автоматически.

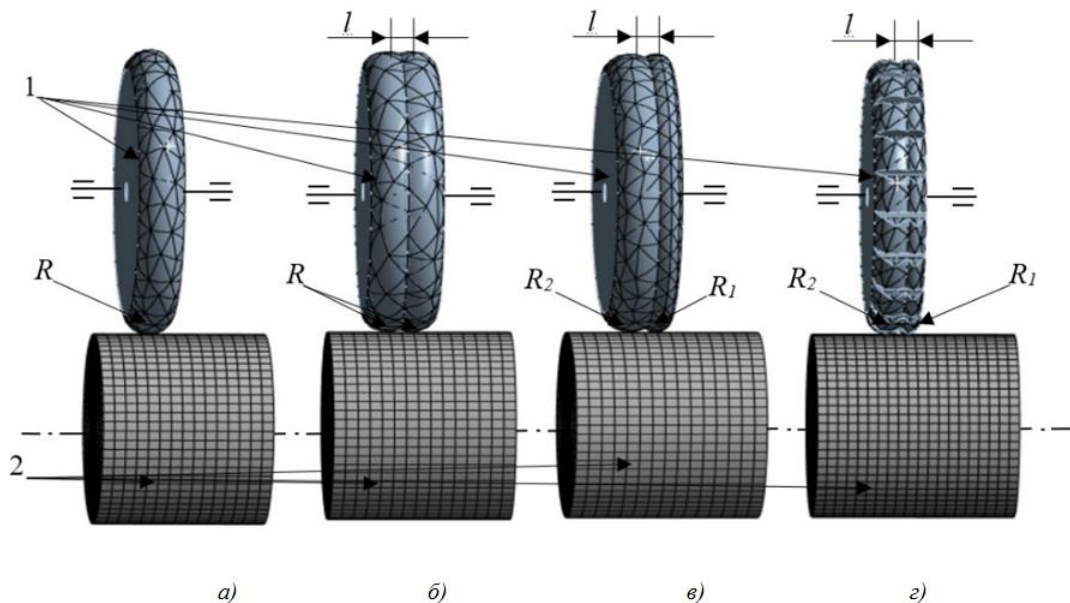


Рис. 2. Конечно-элементные модели поверхностного пластического деформирования: 1 – торoidalные ролики; 2 – заготовки. Ролики: однорадиусный (а); двухрадиусный (б); двухрадиусный с разными радиусами скругления (в); торoidalный из чередующихся секторов с разными радиусами скругления (г)

Для оценки напряженного состояния в разных точках цилиндрических образцов необходимо определить главные напряжения по осям O_z (осевые σ_z^{bp}), O_x (радиальные σ_r^{bp}), O_y (тангенциальные σ_φ^{bp}) и напряженное состояние цилиндра по Мизесу по интенсивности напряжения σ_i^{bp} [14–16].

$$\sigma_i^{bp} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{bp} - \sigma_r^{bp})^2 + (\sigma_r^{bp} - \sigma_\varphi^{bp})^2 + (\sigma_\varphi^{bp} - \sigma_z^{bp})^2]}$$

По аналогичной формуле определена и интенсивность остаточных напряжений ($\sigma_i^{ост}$).

Для определения рациональных параметров торoidalного ролика при моделировании использовали базовые режимы упрочнение и геометрию ролика, которые используются на практике (табл.1).

Таблица 1. Базовые режимы моделирования

Частота вращения заготовки n_{zag} , об/мин	100
Диаметра заготовки D_{zag} , мм	20
Частота вращения инструмента $n_{инс}$, об/мин	100
Радиус скругления R_1 , мм	1
Радиус скругления R_2 , мм	2
Расстояние между двумя радиусом скругления l , мм	2
Продольная подача рабочего инструмента $S_{пр}$, мм/об	0,16
Натяг t , мм	0,1

Напряженное состояние материала при ППД под-разделяется на временное и остаточное. При этом временное напряжение возникает при действии внешних сил, а остаточное – при их отсутствии. Временные напряжения оказывают влияние на энергосиловые характеристики процесса и глубину упрочненного слоя, давления в зоне деформации, также на прочность и износостойкость деформирующего инструмента; а остаточные напряжения – на усталостную прочность, процессы разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства изделий [16–19].

Результаты моделирования. На рис. 3 показано распределение компонент временных напряжений вдоль радиуса заготовки при обработке однорадиусным и двухрадиусным роликами. В первом случае напряжения σ_r^{bp} достигают максимального значения 700 МПа, во втором – максимального значения 750 МПа. Значения напряжений σ_φ^{bp} , σ_z^{bp} примерно одинаковы. Двухрадиусный ролик с одинаковыми радиусами скругления показывает более высокие значения временных напряжений по сравнению с однорадиусным. Это связано с тем, что, в отличие от однорадиусного ролика, двухрадиусный последовательно воздействует на одну и ту же область поверхности детали, а, кроме того, поля напряжений от каждого ролика (контура) накладываются друг на друга. В результате происходит наложение пластических деформаций, что повышает величину временных напряжений.

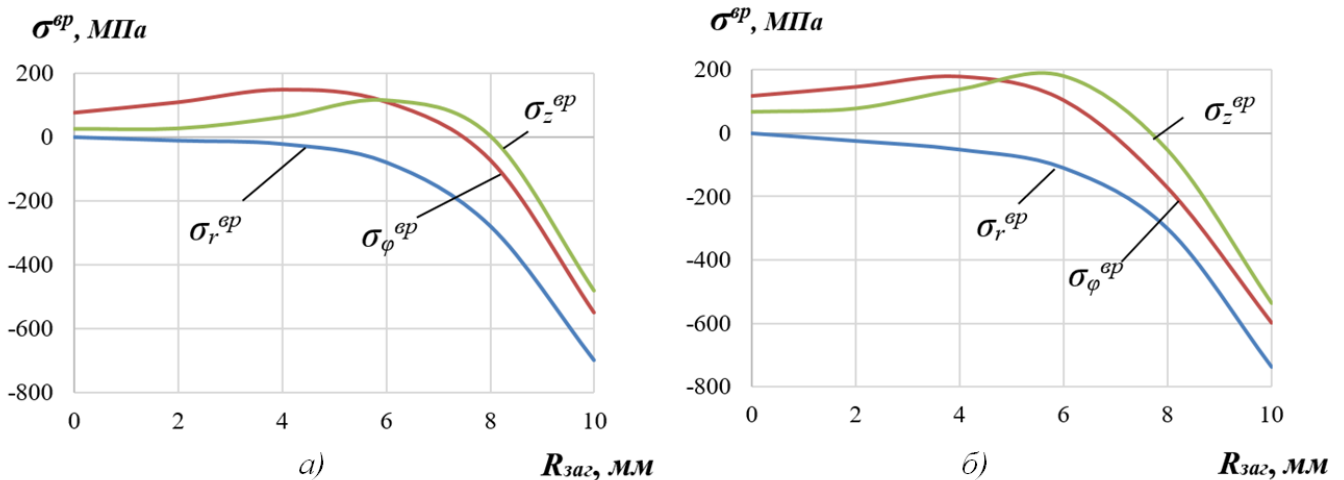


Рис. 3. Распределение компонент временных напряжений вдоль радиуса заготовки: однорадиусный ролик (а); двухрадиусный ролик (б)

На рис. 4 показано распределение компонент остаточных напряжений вдоль радиуса заготовки при обработке однорадиусным и двухрадиусным роликами. На поверхности заготовки возникают сжимающие остаточные напряжения, а в центральной зоне – растягивающие. Напряжения $\sigma_z^{ост}$, $\sigma_\varphi^{ост}$ достигают максимального

значения около 300 МПа при упрочнении двухрадиусным роликом. Двухрадиусный ролик создает две контактные зоны вместо одной, что увеличивает напряженное состояние в очаге деформации и остаточное напряжение в упрочненных деталях.

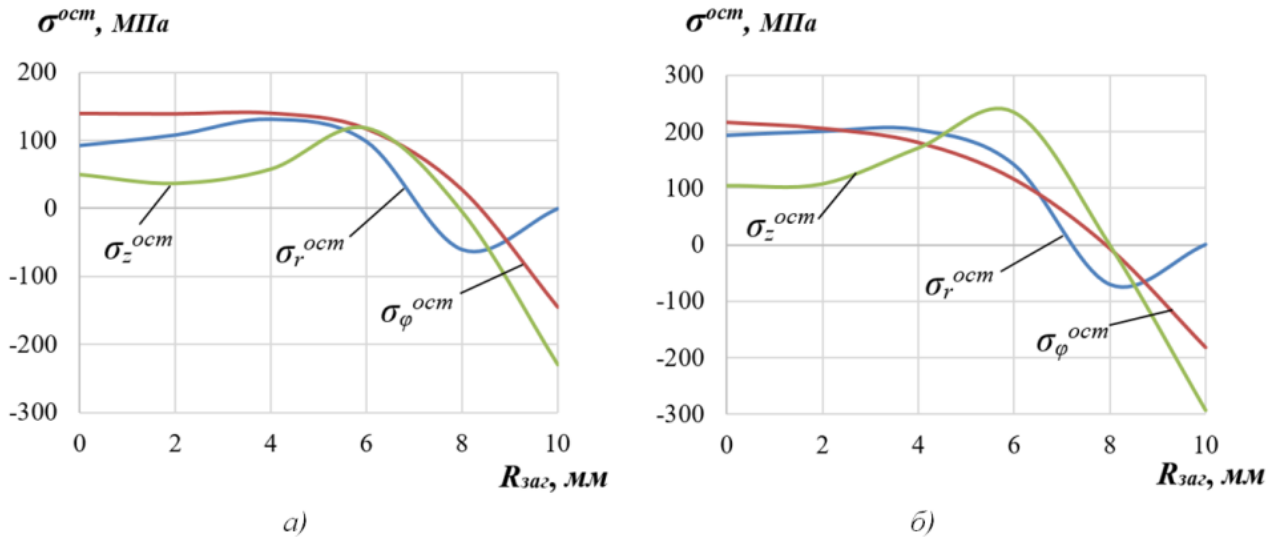


Рис. 4. Распределение компонент остаточных напряжений вдоль радиуса заготовки: однорадиусный ролик (а); двухрадиусный ролик (б)

На рис. 5 показаны поля распределения интенсивности временных напряжений в очаге деформации ($D_{ин} = 30$ мм). Двухрадиусный ролик с одинаковыми радиусами ($R = 2$ мм) показывает более высокие значения временных напряжений по сравнению с однорадиусным роликом.

Ролик с разными радиусами ($R_1 = 1$ мм, $R_2 = 2$ мм) создает более высокое напряженное состояние чем ролик с одинаковыми профильными радиусами ($R = 2$ мм), так как первый радиус меньше в два раза, чем второй, то напряженное состояние будет выше, а, следовательно, и суммарное поле напряжений будет выше. Ролик с большим радиусом хоть и несколько снижает напряженное состояние в очаге деформации, но зато повышает степень сглаживания микронеровностей.

Ролик с большим радиусом хоть и несколько снижает напряженное состояние в очаге деформации, но зато повышает степень сглаживания микронеровностей

Тороидальный ролик с чередующимися секторами и разными радиусами скругления создает самые большие величины напряжений, по сравнению с другими роликами. Повышение напряженного состояния происходит за счет небольших, но динамических воздействии от каждого деформирующего сектора. Каждый сектор преодолевает установленный радиальный натяг, который дополнительно повышается за счет разгрузки уже упроченного участка поверхности. Кроме того, небольшой радиус скругления на рабочей кромке сектора тоже увеличивает напряженное состояние.

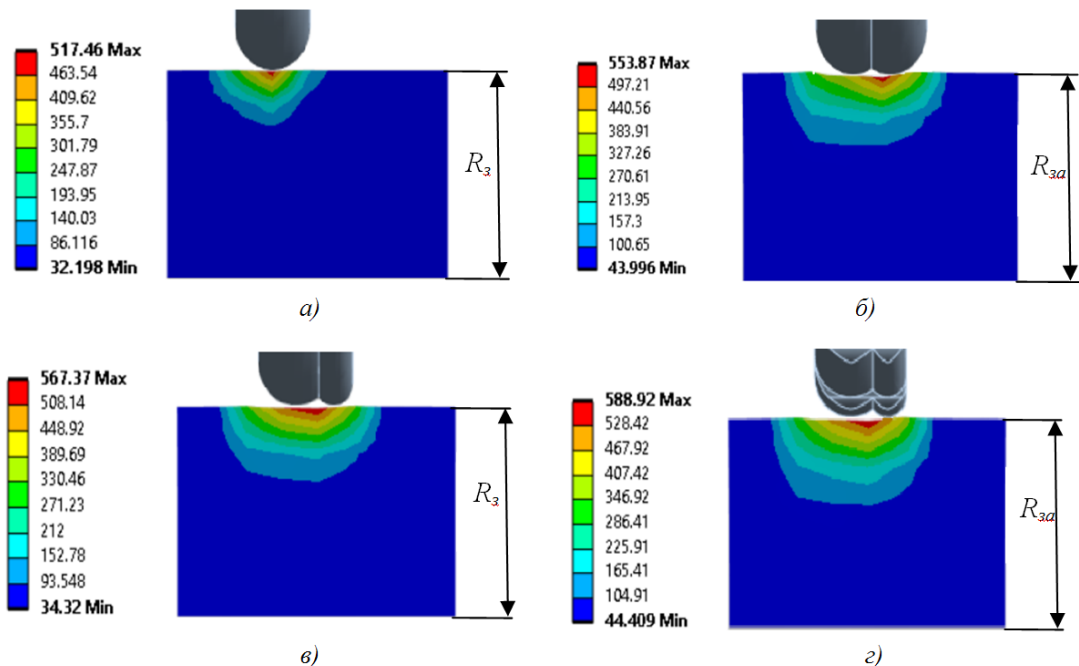


Рис. 5. Поля распределения интенсивности временных напряжений в очаге деформации: однорадиусный (а); двухрадиусный (б); двухрадиусный с разными радиусами скругления (в); тороидальный из чередующихся секторов с разными радиусами скругления (г)

На рис. 6 показаны поля распределения интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению цилиндрических деталей. Двухрадиусный ролик с разными радиусами скругления и тороидальный ролик с чередующимися секторами и разными радиусами скругления

обеспечивают более высокий уровень остаточных напряжений по сравнению с одноградусным роликом. В зонах с меньшим радиусом скругления контактное давление выше, что способствует усилению пластической деформации, а затем возникновению остаточных напряжений после разгрузки.

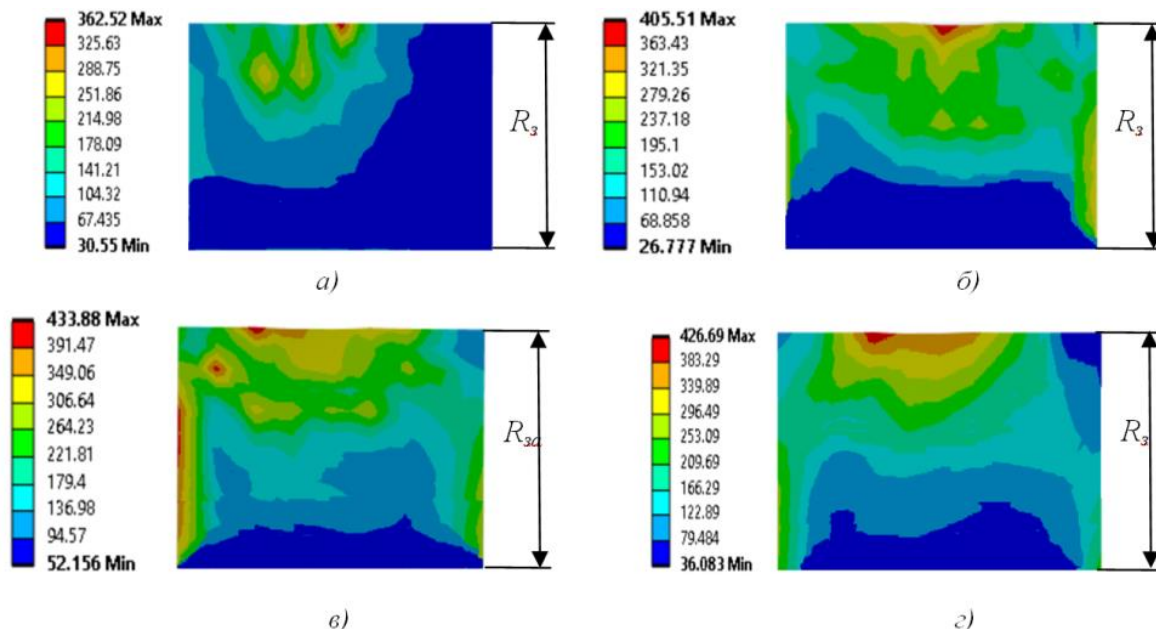


Рис. 6. Поля распределения интенсивности остаточных напряжений в упрочненных деталях: однорадиусный (а); двухрадиусный (б); двухрадиусный с разными радиусами скругления (в); тороидальный из чередующихся секторов с разными радиусами скругления (г)

На рис. 7 показано влияние диаметра тороидального ролика на интенсивности временных и остаточных напряжений. Форма и геометрия инструмента оказывают значительное влияние на распределение указанных напряжений в процессе поверхностного пластического деформирования (ППД).

Диаметр тороидальных роликов играет ключевую роль в формировании временных и остаточных напряжений в процессе ППД. Увеличение диаметра ролика приводит к расширению контактной зоны между инструментом и заготовкой, что способствует снижению контактных напряжений. В то же время, уменьшение диаметра ролика вызывает более локализованные зоны деформации с повышенными напряжениями. Из графиков на рис. 7 следует, что с увеличением диаметрального размера тороидального ролика напряжения снижаются на 20 %, причем наиболее интенсивно – до увеличения диаметра инструмента до 40 мм. Пунктирные линии на графиках отражают превышение остаточных напряжений выше предела текучести, а временных – выше предела прочности. В первом случае превышение предела прочности сказывается на сохранении достигнутых сжимающих остаточных напряжений, а во втором – превышение предела прочности может привести к повреждению или разрушению поверхностного слоя. Исходя из результатов исследования (см. рис. 7), диаметр однопроходного ролика должен быть не менее 30 мм, а двухрадиусных – не менее 50 мм.

По результатам компьютерного моделирования можно оценить и глубину упрочненного слоя, если по-

строить кривую распределения интенсивности напряжений вдоль радиуса заготовки. Тогда пересечение кривой упрочнения, которая асимптотически приближается к нулю (к горизонтальной линии) и будет являться границей упрочненного слоя. На рис. 8 показано влияние диаметра тороидальных роликов ($D_{ин}$) на глубину упрочненного слоя (h) для различных форм тороидальных роликов. Пластические зоны, образующиеся в результате нагруженного воздействия рабочего инструмента на поверхность заготовки, являются связующим звеном между структурой и механическими свойствами материала, отражая особенности его поведения в конкретных условиях нагружения [20–22].

Если взять однорадиусный ролик диаметром 30 мм, то глубина упрочненного слоя составит 2,55 мм, для двухрадиусного ролика диаметром 50 мм с одинаковыми радиусами – 3,13, а с разными – 3,8 мм. Наибольшая глубина упрочненного слоя (4,26 мм) получена при упрочнении тороидальным роликом с чередующимися секторами. Чередование секторов с разными радиусами приводит к формированию пластических зон различной формы и размера, увеличивает локальную концентрацию нагрузок в отдельных участках, способствуя более глубокой проработке материала. Информация об эффективной глубине проникновения пластической деформации служит основой для оценки физико-механических и эксплуатационных свойств упрочненных деталей после ППД.

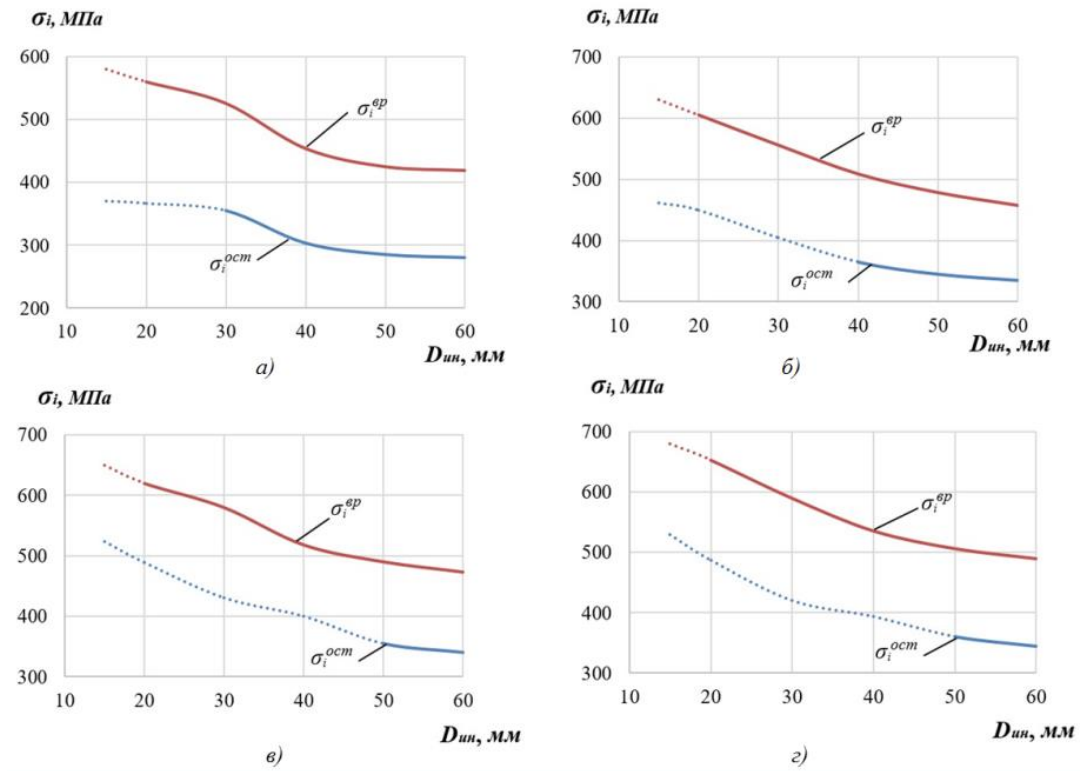


Рис. 7. Влияние диаметра тороидальных роликов ($D_{ш}$) на интенсивность максимальных временны и остаточных напряжений: однорадиусный (а); двухрадиусный (б); двухрадиусный с разными радиусами скругления (в); тороидальный из чередующихся секторов с разными радиусами скругления (з)

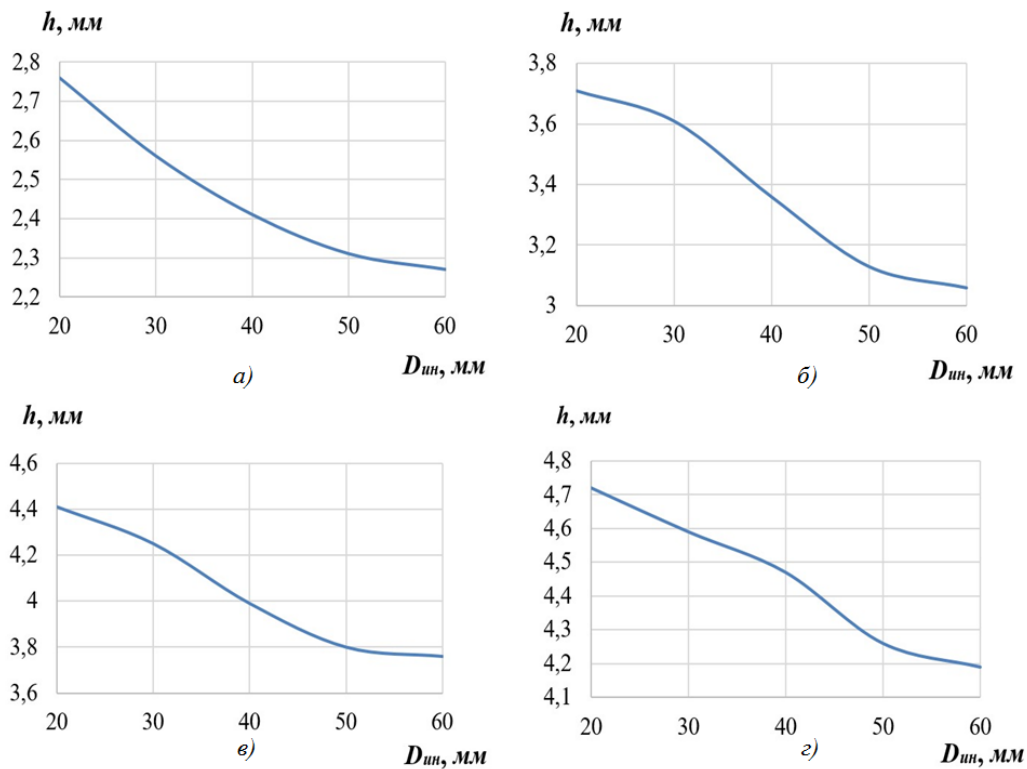


Рис. 8. Влияние диаметра тороидальных роликов ($D_{ш}$) на глубину упрочненного слоя (h) для разных форм тороидальных роликов: однорадиусный (а); двухрадиусный (б); двухрадиусный с разными радиусами скругления (в); тороидальный из чередующихся секторов с разными радиусами скругления (з)

Выводы. Полученные результаты исследования закономерности изменения временных и остаточных напряжений на основе применения программы моделирования ANSYS при базовых режимах нагружения позволяют сделать следующие выводы.

1. Увеличение диаметра тороидального ролика приводит к увеличению контактной зоны, что снижает контактные напряжения. Малый диаметр роликов вызывает более локализованные и высокие напряжения, что может повлиять на качество обработки поверхности. Рациональным диаметром инструментов является $D_{ин} = 50$ мм для двухрадиусных роликов и $D_{ин} = 30$ мм для однорадиусного.

2. Двухрадиусный ролик с одинаковыми радиусами обеспечивает равномерное распределение временных и остаточных напряжений, создавая высокие временные напряжения за счет симметричного пластического деформирования. Двухрадиусный ролик с разными радиусами: первый ролик с меньшим радиусом создает локализованную деформацию, второй с большим ра-

диусом сглаживает и перераспределяет напряжения. Временные и остаточные напряжения у ролика с разными радиусами выше, чем у ролика с одинаковым радиусом, поскольку меньший радиус приводит к более высокому напряженному состоянию, что, в свою очередь, увеличивает суммарное поле напряжений.

3. Тороидальный ролик с чередующимися секторами создает более высокие напряжения по сравнению с другими роликами. Повышение напряженного состояния обусловлено динамическим воздействием каждого сектора, преодолением радиального натяга и дополнительным увеличением напряжений из-за малых радиусов скругления на рабочих кромках секторов.

4. Наибольшая глубина упрочнения достигается при использовании тороидального ролика с чередующимися секторами и разными радиусами, так как такая геометрия способствует увеличению локальной концентрации нагрузок. Это, в свою очередь, улучшает механические свойства упрочненного слоя, повышая его сопротивляемость разрушению и трещинообразованию.

Литература

- Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей методом поверхностного пластического деформирования. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
- Зайдес С.А., Забродин В.А., Мураткин В.Г. Поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во Иркутск. национал. исслед. технич. ун-та, 2002. 304 с.
- Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
- Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
- Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологической наследственности на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
- Патент № 2758713 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения: № 2021100553: заявл. 14.01.2021: опубл. 01.11.2021 / С.А. Зайдес, Х.Х. Нгуен.
- Бубнов А.С., Асланян И.Р. и др. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием. Монография. Иркутск: Изд-во Иркутск. национал. исслед. технич. ун-та, 2014. 560 с.
- Зайдес С.А., Бобровский И.Н., Фам В.А. Влияние кинематики локального деформирования на напряженное состояние поверхностного слоя // Научные технологии в машиностроении. 2019. Т. 15, № 11. С. 32-48.
- Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние кинематики рабочего инструмента на качество деталей машин при поверхностном пластическом деформировании // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. 2024. № 6(771). С. 66-75.
- Zhou C., Jiang F., Xu D., Guo C., Zhao C., Wang Z., Wang J. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment // *Journ. of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 280, № 116599. P. 56-68.
- Зайдес С.А., Нго К.К. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 10(142). С. 6-9.
- Митрофанова К.С. Исследование качества поверхностного слоя стали 45 после поверхностного пластического деформирования мультисекторным роликом // Инновации в машиностроении. 2019. С. 639-645.
- Брюка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2013. 109 с.
- Sirigu M., Dow R.S. Strength of Steel and Aluminum Ship Hull Structures under Combined Shear and Compression/Tension // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 166. P. 128-141.
- Вулых Н.В., Щадов И.И. Анализ упругого напряженно-деформированного состояния микрошероховатостей упрочненных поверхностей // Мат-лы IV Всеросс. науч.-технич. конф. с междунар. участием «Жизненный цикл конструкционных материалов». Иркутск, 2014. С. 290-297.
- Reyhan S.B., Rahman M.M. Modeling of Elastic Properties of Unidirectional Composite Materials Using Ansys Material Designer // *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 1892-1900.
- Wildemann V., Lomakin E., Tretyakov M. Postcritical deformation of steels in plane stress state // *Mechanics of Solids*. 2014. Vol. 1. P. 18-26.
- Смирнов А. Г. Контактная механика в процессах пластического деформирования. Екатеринбург: Изд-во Урал. федерал. ун-та, 2018. 196 с.
- Иванов С.А., Орлов Н.Н. Методы и аппараты для поверхностного упрочнения. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. гос. технич. ун-та, 2019. 250 с.
- Лобанов Н.К., Фомин В.П. Влияние параметров инструмента на интенсивность упрочнения // Вестн. машиностроения. 2021. № 6. С. 34-39.
- Громов Е.В., Савельев К.А. Исследование остаточных напряжений при поверхностной обработке. // *Технология машиностроения*. 2020. № 3. С. 27-33.
- Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние кинематики тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин // *Научные технологии в машиностроении*. 2022. № 6. С. 12-21.

References

- Odintsov L.G. Strengthening and finishing of parts by the method of surface plastic deformation. M.: Machine Building, 1987. 328 p.

2. Zaydes S.A., Zabrodin V.A., Muratkin V.G. Surface Plastic Deformation. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk national research technical university, 2002. 304 p.
3. Suslov A.G. Quality of a Surface Layer of Machine Parts. M.: Machine Building, 2000. 320 p.
4. Smelyansky V.M. Mechanics of hardening of details by surface plastic deformation. M.: Machine Building, 2002. 300 p.
5. Blumenstein V.Yu., Smelyansky V.M. Mechanics of technological heredity at the stages of processing and operation of machine parts. M.: Machine Building, 2007. 399 p.
6. Patent № 2758713 C1, Russian Federation, IPC B24B 39/04. Method of Surface Plastic Deformation of Outer Surfaces of Rotational Bodies: № 2021100553, filed 14.01.2021, published 01.11.2021 / S.A. Zaides, H.H. Nguyen.
7. Bubnov A.S., Aslanyan I.R., et al. Processing of Parts by Surface Plastic Deformation. Monograph. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk national research technical university, 2014. 560 p.
8. Zaydes S.A., Bobrovskiy I.N., Pham V.A. Influence of local deformation kinematics on the stress state of the surface layer // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2019. Vol. 15, № 11. P. 32-48.
9. Zaides S.A., Nguyen H.H. Influence of the Working Tool Kinematics on the Quality of Machine Parts in Surface Plastic Deformation // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. 2024. № 6(771). P. 66-75.
10. Zhou C., Jiang F., Xu D., Guo C., Zhao C., Wang Z., Wang J. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment // Journ. of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 280, № 116599. P. 56-68.
11. Zaides S.A., Ngo K.K. Assessment of Stress State Under Constrained Conditions of Local Loading // Strengthening Technologies and Coatings. 2016. № 10(142). P. 6-9.
12. Mitrofanova K.S. Study of the Surface Layer Quality of Steel 45 after Surface Plastic Deformation with a Multi-Radius Roller // Innovations in mechanical engineering. 2019. P. 639-645.
13. Bryuyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V. Engineering Analysis in ANSYS Workbench. Samara: Publishing house of Samara State Technical University, 2013. 109 p.
14. Sirigu M., Dow R.S. Strength of Steel and Aluminum Ship Hull Structures under Combined Shear and Compression/Tension // Engineering Structures. 2018. Vol. 166. P. 128-141.
15. Vulykh N.V., Shchadov I.I. Analysis of the Elastic Stress-Strain State of Micro-Roughened Strengthened Surfaces // Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Technical Conf. with Internat. Participation "Life Cycle of Structural Materials". Irkutsk, 2014. P. 290-297.
16. Reyhan S.B., Rahman M.M. Modeling of Elastic Properties of Unidirectional Composite Materials Using Ansys Material Designer // Procedia Structural Integrity. 2020. Vol. 28. P. 1892-1900.
17. Wildemann V., Lomakin E., Tretyakov M. Postcritical deformation of steels in plane stress state // Mechanics of Solids. 2014. Vol. 1. P. 18-26.
18. Smirnov A.G. Contact Mechanics in Plastic Deformation Processes. Yekaterinburg: Ural Federal University Publishing House, 2018. 196 p.
19. Ivanov S.A., Orlov N.N. Methods and Equipment for Surface Hardening. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State Technical University, 2019. 250 p.
20. Lobanov N.K., Fomin V.P. Influence of Tool Parameters on the Strengthening Intensity // Bulletin of Mechanical Engineering. 2021. № 6. P. 34-39.
21. Gromov E.V., Saveliev K.A. Study of Residual Stresses in Surface Treatment // Mechanical Engineering Technology. 2020. № 3. P. 27-33.
22. Zaides S.A., Nguyen H.H. Influence of Toroidal Tool Kinematics on the Stress-Strain State of the Surface Layer of Machine Parts // High-Tech Technologies in Mechanical Engineering. 2022. № 6. P. 12-21.