

УДК 621.787.4

Определение геометрических параметров ротационного ролика для повышения напряженно-деформированного состояния упроченных деталей

С.А. Зайдес, В.Т.Т. Та, Е.П. Николаева

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Determination of the geometric parameters of a rotary roller to improve the stress-strain state of hardened parts

S.A. Zaides, V.T.T. Ta, E.P. Nikolaeva

Irkutsk National Research Technical University

С использованием компьютерного моделирования в среде ANSYS исследовано напряженно-деформированное состояние и закономерности изменения временных и остаточных напряжений в цилиндрических деталях при упрочнении ротационным роликом. Определены рациональные геометрические параметры ротационного ролика, способствующие повышению эффективности процесса: диаметр, профильные радиусы, расстояние между вершинами профилей, количество деформирующих элементов, ширина и угол наклона разделительной канавки и радиус ее скругления. Установлены условия, обеспечивающие непрерывное перекрытие следов, оставляемых малым и большим профильными радиусами ролика. Показано, что при одинаковом диаметре применение ротационного ролика вместо гладкого тороидального увеличивает остаточные, временные напряжения и глубину пластической деформации, что свидетельствует о его более высокой эффективности. Полученные результаты можно использовать при проектировании и оптимизации технологических процессов упрочнения деталей машин.

EDN: MJIMTI, <https://elibrary/mjimti>

Ключевые слова: ротационный ролик, остаточные напряжения, временные напряжения, глубина пластической деформации, метод конечных элементов, цилиндрические детали

In this study, using computer simulation in the ANSYS environment, the stress-strain state and the regularities of the variation of transient and residual stresses in cylindrical parts during strengthening by a rotational roller were investigated. Rational geometric parameters of the rotational roller that contribute to improving the efficiency of the process were determined, including the roller diameter, profile radii, distance between profile peaks, number of sectors, groove width, inclination angle of the separating groove, and its fillet radius. Conditions ensuring continuous overlapping of the tracks left by the small and large radii of the roller were established. It was shown that the use of a rotational roller, compared with a smooth roller of the same diameter, leads to an increase in residual and transient stresses as well as the depth of plastic deformation, which indicates its higher efficiency. The obtained

results can be applied in the design and optimization of technological processes for strengthening machine parts.

EDN: MJIMTI, <https://elibrary/mjimti>

Keywords: rotational roller, residual stresses, transient stresses, depth of plastic deformation, finite element method, cylindrical parts

Для повышения надежности деталей машин и механизмов применяется отделочно-упрочняющая обработка методом поверхностного пластического деформирования (ППД). Этот процесс способствует сглаживанию микронеровностей обработанной поверхности, увеличению степени и глубины наклепа, а также формированию остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое [1–3]. Преимущество ППД перед другими технологиями заключается в том, что для его реализации не требуется сложного оборудования — обработку выполняют на универсальных металлорежущих станках с помощью инструментов достаточно простой конструкции [4].

Качество упрочненных деталей зависит как от параметров и режимов обработки, но и от геометрических параметров режущего инструмента. При ППД в качестве деформирующих элементов выступают стальные шарики, тороидальные и конические ролики, а также алмазные выглаживатели [5–7]. Их форма и размеры оказывают существенное влияние на свойства упрочненного слоя, температуру в зоне контакта, силу трения и работу, совершаемую при ППД [8]. Кинематика этих инструментов, как правило, достаточно проста — они катятся или скользят по поверхности обрабатываемой детали.

Среди широкого ассортимента деталей машин значительную долю составляют цилиндрические детали: валы, оси, штанги, направляющие и др. Особую технологическую сложность представляют гибкие (нежесткие) детали, требующие специального подхода как при обработке резанием, так и при ППД [9]. Основная проблема заключается в том, что радиальное воздействие режущего инструмента вызывает изгиб заготовки. Уменьшение радиального усилия снижает прогиб, но не обеспечивает требуемый уровень упрочнения. Следовательно, необходимо создать усиление напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне деформации без увеличения радиальной силы.

Одним из решений этой задачи является интенсификация НДС в очаге деформации, поз-

воляющая достичь необходимой степени упрочнения при неизменном радиальном натяге. Однако традиционные методы ППД с использованием шариков или роликов имеют ограниченные возможности управления параметрами механического состояния поверхностного слоя, так как повышение упрочняющего эффекта может привести к его разрушению.

Расширить технологические возможности ППД можно путем разработки новых способов, обеспечивающих интенсификацию НДС в очаге воздействия. Это позволит добиться более высокой степени упрочнения и увеличить уровень остаточных напряжений сжатия без разрушения упрочненного слоя.

В теории и практике обработки металлов давлением разработаны технологии, основанные на процессах интенсивной пластической деформации [10]. В рамках упрочнения малыми пластическими деформациями создаются совмещенные и комбинированные методы ППД, а также подходы, основанные на применении инструментов и устройств нового типа [11].

Ранее был разработан новый способ ротационного упрочнения и конструкция деформирующего инструмента для ППД [12].

Цель исследования — выбор и обоснование геометрических параметров ротационного ролика (РР), обеспечивающих интенсификацию НДС в зоне деформации и формирование остаточных напряжений сжатия в упрочненном слое деталей машин.

Схема ротационного поверхностного пластического деформирования. Схема ротационного ППД цилиндрической заготовки приведена на рис. 1. Заготовка совершает вращательное движение относительно собственной продольной оси, а режущему инструменту, содержащему деформирующие элементы и оказывающему натяг на поверхность обрабатываемой заготовки, сообщают продольную подачу. Параметрами, определяющими кинематику процесса обработки, являются частота вращения заготовки $n_{\text{заг}}$, продольная подача $S_{\text{пр}}$, частота вращения РР n_r и радиальный натяг t .

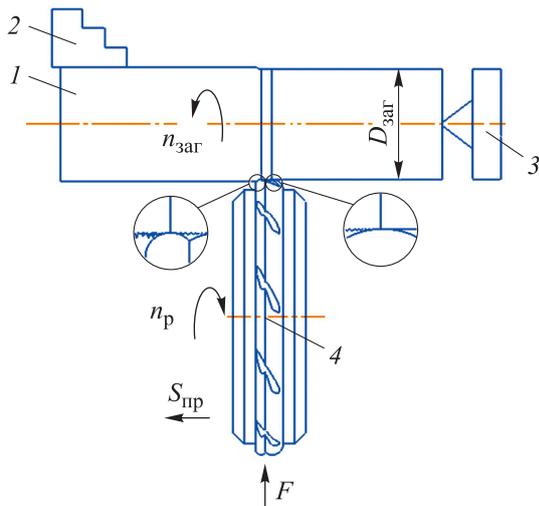


Рис. 1. Схема ротационного ППД:
1 — цилиндрическая заготовка; 2 — трехкулачковый патрон; 3 — центр задней бабки; 4 — РР

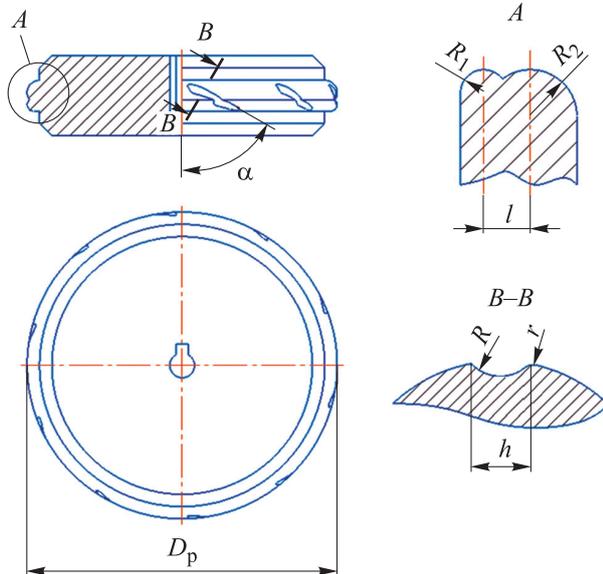


Рис. 2. Схема РР

Ротационный ролик (рис. 2) имеет асимметричную форму с двумя профильными радиусами разного размера, заменяющими друг друга в вершине. Меньший профильный радиус R_1 расположен на фронтальной стороне ролика, а больший R_2 — на тыльной. Торговая поверхность РР разбита на участки, зоны раздела которых находятся под углом α к его центральной оси и образуют канавки шириной h .

Исходные данные для конечно-элементного моделирования. Для определения значений временных, остаточных напряжений и анализа НДС в очаге деформации при упрочнении различными методами ППД применяется компью-

терное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко применяемых компьютерных программ, реализующих МКЭ, является ANSYS [13, 14], которая и была использована в данной работе.

Характеристики образца: заготовка — цилиндр диаметром $D_{\text{заг}} = 20$ мм; материал — сталь 45; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала — билинейная (предел текучести $\sigma_{\text{т}} = 370$ МПа, предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 630$ МПа; модуль упрочнения $E_{\text{т}} = 1,45 \cdot 10^3$ МПа).

Характеристики РР: материал — недеформированный высокопрочный; коэффициент трения в зоне контакта РР с образцом $f = 0,1$.

Конечно-элементная модель ротационного ППД, построенная с помощью CAD/CAE системы ANSYS 2023R1, приведена на рис. 3. Конечно-элементная модель цилиндрического образца имеет сетку квадратной формы с размером конечного элемента 1 мм, что обеспечивает необходимый баланс между точностью расчета и вычислительными затратами. Количество конечных элементов модели составляло 27 071, а узлов — 8239. Геометрические параметры РР формируются автоматически средствами программы.

Чтобы оценить НДС в разных точках цилиндрического образца, определяли главные напряжения по осям O_z (осевые $\sigma_z^{\text{РР}}$), O_r (радиальные $\sigma_r^{\text{РР}}$), O_{φ} (тангенциальные $\sigma_{\varphi}^{\text{РР}}$) и напря-

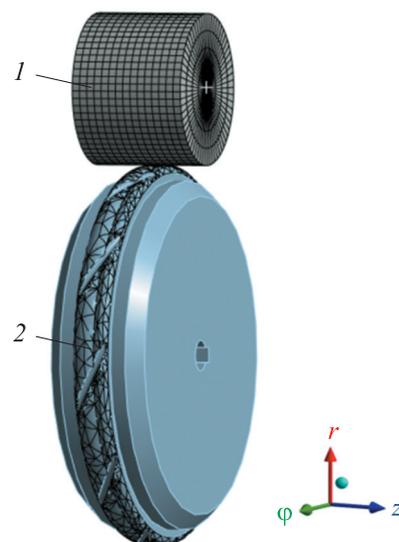


Рис. 3. Конечно-элементная модель ротационного ППД:
1 — заготовка; 2 — РР

женное состояние цилиндра (по Мизесу) по интенсивности временных напряжений [15, 16]

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

По аналогичной формуле определена интенсивность остаточных напряжений $\sigma_{ост}^i$.

Оценка деформированного состояния выполнена по интенсивности относительных деформаций [17]

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{2} [(\varepsilon_z - \varepsilon_\phi)^2 + (\varepsilon_\phi - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2]},$$

где ε_z , ε_ϕ и ε_r — главные компоненты относительных деформаций, действующие по осям O_z , O_r и O_ϕ соответственно.

Для определения рациональных параметров РР при моделировании использованы базовые режимы упрочнения, применяемые на практике при обработке гладкими тороидальными роликами (см. таблицу).

Направления вращения заготовки и РР противоположны, что обеспечивает процесс качения, снижает трение и температуру при обработке, а также способствует улучшению качества процесса.

Базовые режимы моделирования ротационного ППД

Параметр	Значение
Частота вращения заготовки $n_{заг}$, мин ⁻¹	100
Диаметр заготовки $D_{заг}$, мм	20
Частота вращения РР n_p , мин ⁻¹	40
Диаметр РР D_p , мм	50
Продольная подача $S_{пр}$, мм/об	0,16
Натяг t , мм	0,1
Расстояние между вершинами профилей РР l , мм	2
Меньший профильный радиус РР R_1 , мм	1
Большой профильный радиус РР R_2 , мм	2
Радиус скругления канавки r , мм	1
Количество деформирующих элементов	15
Ширина разделительной канавки h , мм	1
Угол наклона разделительной канавки α , град	60

Напряженное состояние материала при ППД подразделяют на временное и остаточное. Временные напряжения возникают под действием внешних сил, остаточные — при их отсутствии. Временные напряжения оказывают влияние на энергосиловые характеристики процесса и глубину упрочненного слоя, давление в зоне деформации, а также на прочность и износостойкость деформирующего инструмента, а остаточные напряжения — на усталостную прочность, процессы разрушения, устойчивость к износу и коррозии и другие эксплуатационные свойства изделий [18, 19].

Результаты моделирования. Влияние диаметра РР на интенсивность временных σ_i^{BP} и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений, возникающих в цилиндрической заготовке при ротационном ППД, показано на рис. 4, а. Увеличение диаметра РР приводит к расширению контактной зоны между ним и заготовкой, что способствует снижению контактных напряжений. В то же время уменьшение диаметра РР формирует более локализованные зоны деформации с повышенными напряжениями.

При возрастании диаметра РР с 20 до 60 мм интенсивность временных и остаточных напряжений снижается на 20 %, что видно из рис. 4, а. Здесь и далее пунктирные линии на графиках отражают превышение остаточными напряжениями предела текучести, а временными — предела прочности. Превышение предела текучести сказывается на сохранении достигнутых остаточных напряжений сжатия, а превышение предела прочности может привести к повреждению или разрушению поверхностного слоя. Согласно результатам моделирования, диаметр РР должен быть не менее 50 мм.

Качество поверхностного слоя существенно зависит от профильных радиусов деформирующего элемента. Известно [20], что профильный радиус меньшего размера положительно влияет на степень упрочнения материала, а радиус большего размера — на сглаживание микронеровностей поверхности. Поэтому двухпрофильные деформирующие элементы целесообразно изготавливать с разными радиусами, которые окажут положительное влияние на качество поверхностного слоя.

Влияние меньшего профильного радиуса РР R_1 на интенсивность временных σ_i^{BP} и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений, возникающих в цилиндрической заготовке при ППД, показано на

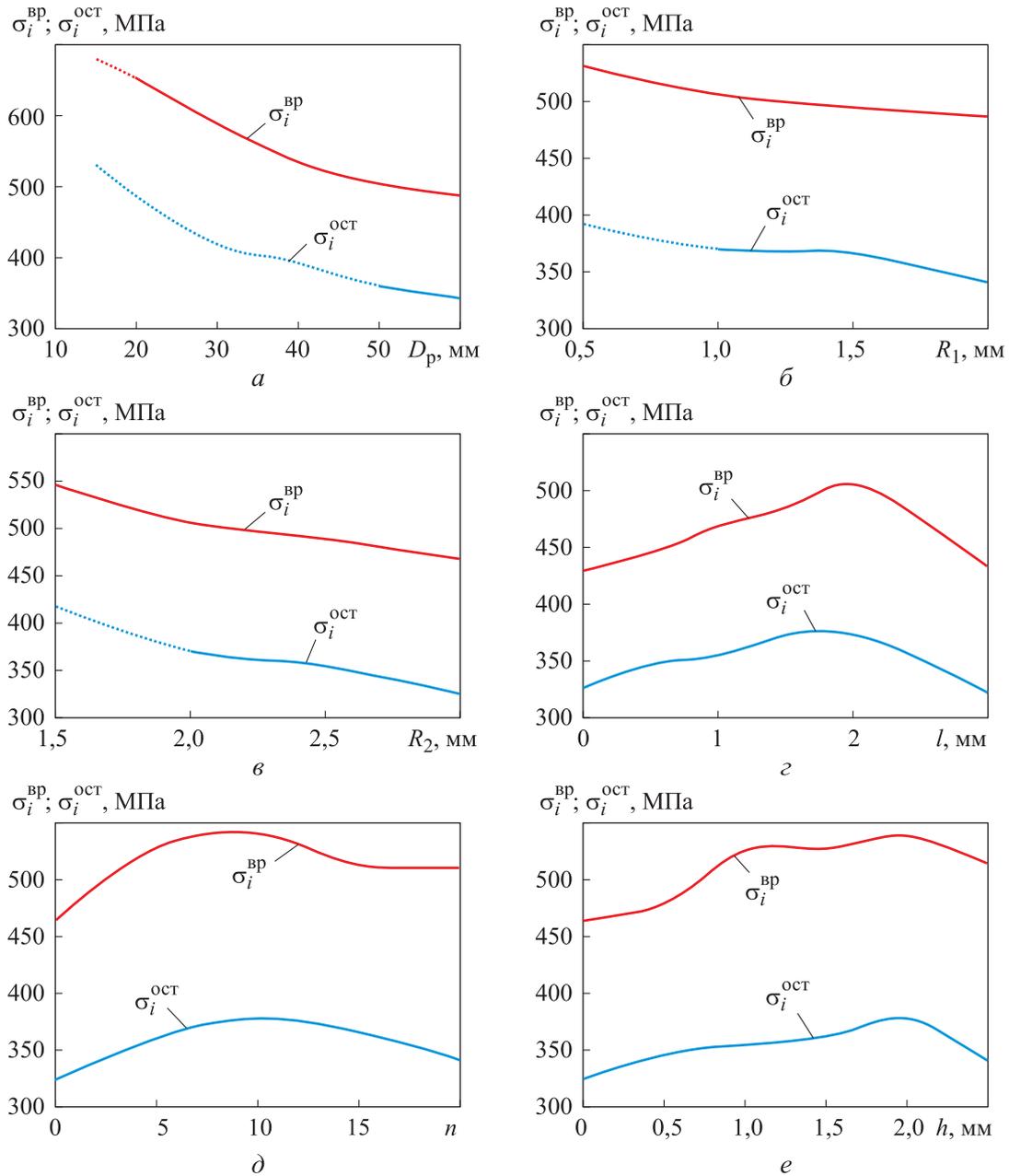


Рис. 4. Зависимости интенсивности временных σ_i^{BP} и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений, возникающих в цилиндрической заготовке при ротационном ППД, от параметров ПР:
 а — диаметра ПР D_p ; б — меньшего профильного радиуса ПР R_1 при $R_2 = 2,0$ мм;
 в — большего профильного радиуса ПР R_2 при $R_1 = 1,0$ мм;
 г — расстояния между вершинами профилей ПР l ; д — количества деформирующих элементов n ;
 е — ширины разделительной канавки h

рис. 4, б. Увеличение радиуса R_1 приводит к расширению зоны контакта между ПР и заготовкой, что способствует более равномерному распределению нагрузки и, как следствие, снижению контактных напряжений. В то же время уменьшение радиуса R_1 вызывает сужение зоны контакта и формирование локализованных областей деформации с повышенной интенсивностью напряжений. Такие участки локальной

концентрации напряжений могут увеличить риск появления дефектов и снизить усталостную прочность упрочненных деталей при длительной эксплуатации.

С ростом профильного радиуса ПР R_1 интенсивность временных и остаточных напряжений снижается в среднем на 10%. Наиболее выраженное снижение временных напряжений наблюдается при уменьшении радиуса R_1 до

1,5 мм, после чего оно замедляется, что свидетельствует о достижении близких к оптимальным условиям распределения напряжений. Согласно результатам моделирования, диаметр меньшего профильного радиуса R_1 должен быть не менее 1,0 мм.

Влияние большего профильного радиуса R_2 на интенсивность временных σ_i^{BP} и остаточных σ_i^{OCT} напряжений, возникающих в цилиндрической заготовке при ППД, показано на рис. 4, в. Видно, что диаметр большего профильного радиуса R_2 должен быть не менее 2 мм.

Влияние расстояния между вершинами профилей PP l на интенсивность временных σ_i^{BP} и остаточных σ_i^{OCT} напряжений, возникающих в цилиндрической заготовке при ППД, показано на рис. 4, г. Расстояние между вершинами профилей PP существенно влияет на формирование НДС в поверхностных слоях обрабатываемого материала. Каждый профильный радиус создает свой очаг упругопластической деформации. При близком расположении очагов происходит их наложение, в результате чего повышается НДС материала. Это явление выявлено и при других схемах нагружения [21]. Согласно результатам моделирования, наилучшее НДС достигается при расстоянии между вершинами профилей PP $l = 1,5 \dots 2,0$ мм. При $l = 2,0$ мм наблюдается наибольшая интенсивность временных напряжений $\sigma_i^{BP} = 539$ МПа, а также высокая интенсивность остаточных напряжений сжатия $\sigma_i^{OCT} = 378$ МПа.

Увеличение или уменьшение расстояния l относительно рационального диапазона приводит к снижению эффективности ППД. При слишком малом расстоянии l формируется практически один очаг деформации, и сдвоенный профиль работает как гладкий ролик с одним профилем. При большом расстоянии l создаются два независимых очага деформации, т. е. отсутствует эффект наложения полей напряжений.

Таким образом, выбор оптимального расстояния между вершинами профилей PP является важным фактором при проектировании режущего инструмента и технологического процесса ППД. Значение l в диапазоне 1,5... 2,0 мм можно рекомендовать как наилучшее с точки зрения достижения максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений, способствующих упрочнению и повышению эксплуатационных характеристик обработанных деталей.

Влияние количества деформирующих элементов n на интенсивность временных σ_i^{BP} и остаточных σ_i^{OCT} напряжений, возникающих в цилиндрической заготовке при ППД, показано на рис. 4, д. Видно, что наилучшие результаты получены при $n = 10$, когда $\sigma_i^{BP} = 539$ МПа, а $\sigma_i^{OCT} = 378$ МПа. Так как предел текучести материала заготовки составляет 370 МПа, целесообразно принять количество секторов, при которых остаточные напряжения не превышают предел текучести. В рассматриваемом случае принято $n = 10$ при диаметре $D_p = 50$ мм. Снижение интенсивности напряжений при количестве деформирующих элементов более десяти обусловлено постепенным исчерпанием запаса пластичности материала, которое приводит к его перенаклепу.

Влияние ширины разделительной канавки h на интенсивность временных σ_i^{BP} и остаточных σ_i^{OCT} напряжений, возникающих в цилиндрической заготовке при ППД, показано на рис. 4, е. При избыточной ширине канавки усилие PP распределяется неравномерно, формируются зоны без нагрузки и области с ее избыточной концентрацией, что вызывает нежелательные деформации поверхностного слоя. В то же время при недостаточной ширине разделительная канавка практически не оказывает воздействия: PP функционирует как гладкий ролик, и значения напряжений снижаются. Установлено, что при $h = 2$ мм наблюдается наибольшая интенсивность временных напряжений $\sigma_i^{BP} = 539$ МПа, а также высокая интенсивность остаточных напряжений сжатия $\sigma_i^{OCT} = 378$ МПа.

Угол наклона разделительной канавки α оказывает существенное влияние на формирование НДС в заготовке и зависит от ее ширины h . При малом угле наклона разделительной канавки перекрытие следов от малого и большого радиусов при вращении PP отсутствует, что приводит к неравномерному распределению напряжений: в одних зонах их значение оказывается чрезмерно высоким, в других — недостаточно (рис. 5, а). На рис. 5, б, напротив, показано, что благодаря перекрытию следов напряжения распределяются более равномерно. Для исключения указанного эффекта угол наклона разделительной канавки необходимо рассчитывать в зависимости от ее ширины.

Схема зоны контакта PP и заготовки при вдавливании на глубину 0,1 мм и натяге $t = 1$ мм приведена на рис. 6. Малый профильный радиус PP формирует на поверхности заго-

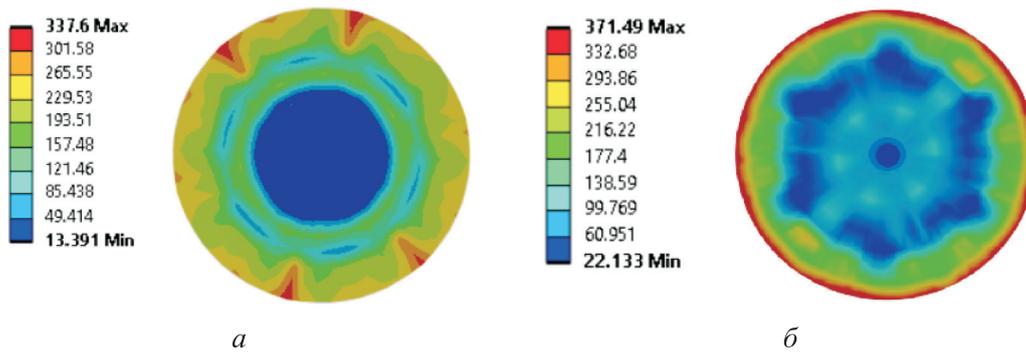


Рис. 5. Распределение интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению цилиндрической заготовки в процессе ротационного ППД при ширине разделительной канавки $h = 2$ мм и угле ее наклона $\alpha = 0$ (а) и 60° (б)

товки след шириной 0,87 мм, а большой — шириной 1,25 мм. Таким образом, на поверхность заготовки могут быть нанесены два следа РР, расположенные так, что расстояние между центрами большого и малого радиусов составляет 2 мм.

Для анализа геометрических условий расположим точки O , A , B и M , как показано на рис. 7, с тем, чтобы следы, оставленные малым и большим профильными радиусами РР, непрерывно перекрывали зону контакта. В этом случае должно выполняться условие $AB \geq OM$, что соответствует неравенству

$$3,06 \sin \alpha \geq h. \quad (1)$$

Это условие определяет минимальное значение угла наклона разделительной канавки α , при котором обеспечивается перекрытие следов контакта малого и большого профильных радиусов РР на поверхности заготовки. Коэффициент 3,06 является геометрическим параметром, характеризующим соотношение размеров РР. Если неравенство выполняется, то следы качения частично перекрываются, что обес-

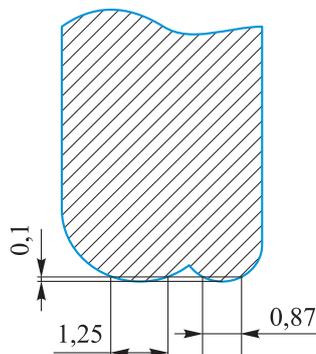


Рис. 6. Схема зоны контакта РР и заготовки при вдавливании на глубину 0,1 мм и натяге $t = 1$ мм

обеспечивает равномерное распределение напряжений по поверхности (см. рис. 5, б). В противном случае перекрытие отсутствует, напряжения распределяются неравномерно (см. рис. 5, а).

Зависимости интенсивности временных σ_i^{pp} и остаточных $\sigma_i^{от}$ напряжений от угла наклона разделительной канавки α при ее ширине $h = 2$ мм (по формуле (1) при $h = 2$ мм угол α должен быть больше или равен 40°) показаны на рис. 8, а. При качении РР наклонные разделительные канавки ориентированы под углом к его оси, благодаря чему пластическое течение металла направлено не только вдоль оси, но и под наклоном, частично перекрываясь. Это формирует более сложную схему качения, способствует перекрытию зон пластической деформации и, как следствие, более глубокому упрочнению материала и равномерному распределению остаточных напряжений.

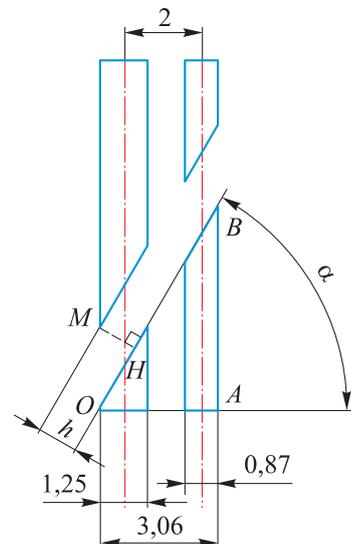


Рис. 7. Схема деформирующих элементов РР

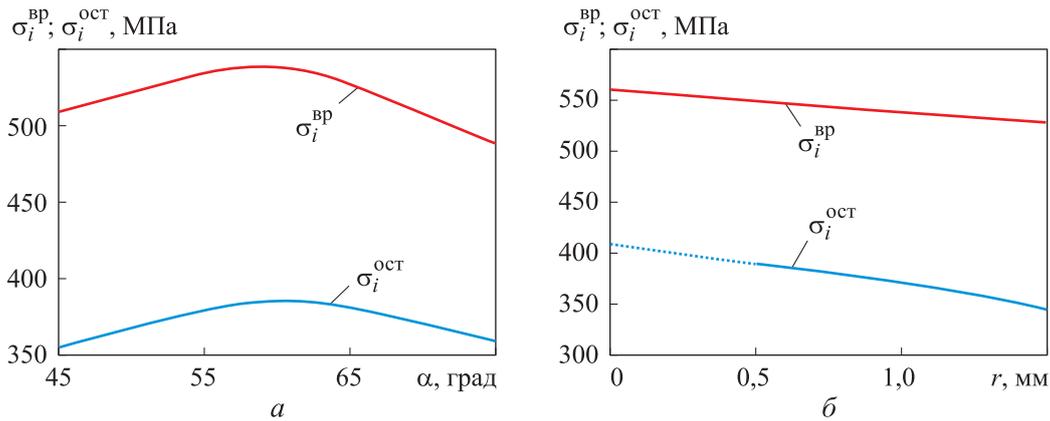


Рис. 8. Зависимости интенсивности временных σ_i^{BP} и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений от угла наклона α (а) и радиуса скругления разделительной канавки r (б) при ее ширине $h = 2$ мм

При угле $\alpha < 60^\circ$ зоны раздела становятся слишком пологими, и напряжения распределяются менее равномерно. При угле $\alpha > 60^\circ$ канавки действуют как концентраторы напряжений, что может привести к локальным перегрузкам и зарождению трещин. При $\alpha = 60^\circ$ наблюдается наибольшая интенсивность временных напряжений $\sigma_i^{BP} = 539$ МПа, а также высокая интенсивность остаточных напряжений сжатия $\sigma_i^{ост} = 378$ МПа.

Профильные радиусы со стороны фронтальной плоскости имеют скругления r , чтобы деформирующие элементы РР не ударяли по заготовке и не повреждали ее поверхность. Это особенно важно для обеспечения качества обработки и предотвращения образования микротрещин. Смоделированные зависимости интенсивности временных σ_i^{BP} и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений от радиуса скругления разделительной канавки r при ее ширине $h = 2$ мм приведены на рис. 8, б. Видно, что эффективным является диапазон радиуса $r = 0,5 \dots 1,5$ мм. При $r < 0,5$ мм наблюдается повышенная концентрация напряжений на кромках деформиру-

ющих элементов, что может привести к локальным повреждениям поверхности. При увеличении радиуса $r > 1,5$ мм степень концентрации напряжений уменьшается, так как давление РР распределяется на большую площадь контакта. Это приводит к снижению уровня остаточных и временных напряжений, а следовательно, к уменьшению эффективности упрочнения поверхности.

Одним из основных факторов, определяющих эффективность ППД, является глубина проникновения пластической деформации в поверхностный слой материала. Результаты определения глубины пластической деформации ϵ_i в заготовках после ППД ротационным и тороидальным роликами приведены на рис. 9. Видно, что максимальная глубина зоны пластической деформации при использовании РР достигает 4,38 мм, что свидетельствует о более выраженном локализованном характере его воздействия. Это способствует повышению прочностных характеристик приповерхностных слоев по сравнению с таковыми, полученными обработкой тороидальным роликом, для которого глубина

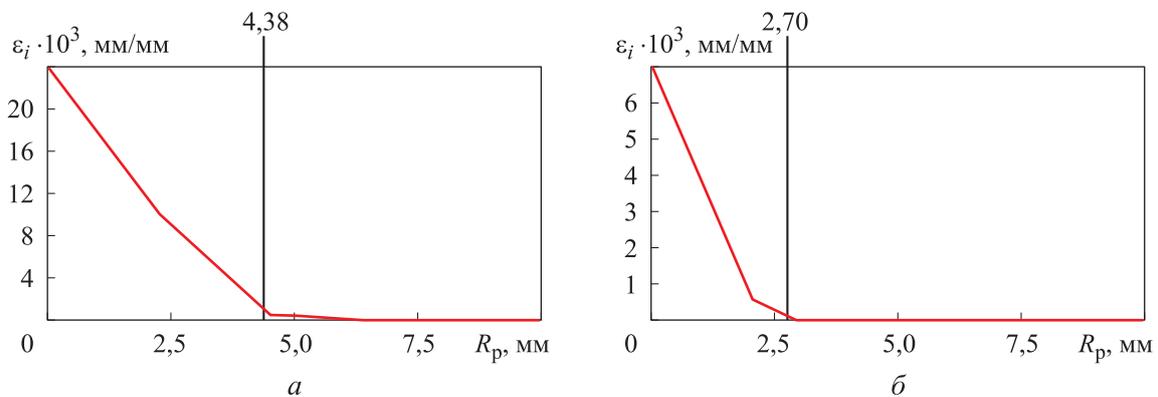


Рис. 9. Распределение пластической деформации ϵ_i по радиусу R_p ротационного (а) и тороидального (б) роликов при базовых режимах упрочнения заготовки

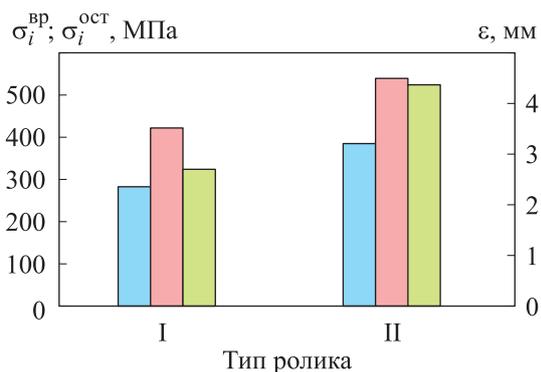


Рис. 10. Гистограммы интенсивности временных $\sigma_i^{вр}$ (■), остаточных $\sigma_i^{ост}$ (■) напряжений и глубины наклепа ε (■) при упрочнении заготовки тороидальным (I) и ротационным (II) роликами

зоны пластической деформации составила 2,71 мм.

Результаты моделирования временных и остаточных напряжений, а также глубины пластической деформации при упрочнении заготовки ротационным тороидальным и роликами приведены на рис. 10. Значения для тороидального ролика заимствованы из источника [12]. Оба инструмента имели одинаковый диаметр $D_p = 50$ мм и работали в одинаковых базовых режимах. Полученные данные показывают, что при использовании РР остаточные напряжения больше на 25 %, временные — на 20 %, а глубина пластической деформации в 2 раза превышает значение, достигнутое при упрочнении тороидальным роликом.

Выводы

1. Проведены исследования НДС и закономерностей изменения временных и остаточных

напряжений в цилиндрических деталях с помощью компьютерного моделирования в программе ANSYS.

2. На основе конечно-элементного моделирования определены рациональные геометрические параметры РР: диаметр — 50 мм; меньший профильный радиус — 1 мм; больший профильный радиус — 2 мм; расстояние между вершинами профилей — 2 мм; количество деформирующих элементов — 10; ширина разделительной канавки — 2 мм; угол ее наклона — 60°; радиус ее скругления — 0,5 мм.

3. По результатам геометрического анализа установлено, что для обеспечения непрерывного перекрытия следов обработки, оставляемых малым и большим профильными радиусами РР, угол наклона разделительной канавки должен находиться в определенном соотношении с ее шириной. При несоблюдении этого соотношения на поверхности заготовки образуются зоны с недостаточным упрочнением и локальной концентрацией напряжений, что снижает качество обработки. Если же требуемое соотношение выдержано, то обеспечивается равномерное распределение напряжений и повышается эффективность процесса ППД.

4. При упрочнении РР максимальные временные и остаточные напряжения больше, чем при обработке гладким тороидальным роликом: при одинаковом диаметре роликов (50 мм) остаточные напряжения увеличиваются на 25 %, а временные — на 20 %. Глубина пластической деформации достигает 4,38 мм, что примерно 2 раза превышает значение для гладкого ролика и обеспечивает более глубокое упрочнение поверхностных слоев деталей машин.

Литература

- [1] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 300 с.
- [2] Зайдес С.А., ред. *Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования*. Т. 1. Иркутск, Изд-во ИРНИТУ, 2021. 504 с.
- [3] Алиев А.А., Булгаков В.П., Приходько Б.С. Качество поверхности и свойства деталей машин. *Вестник астраханского государственного технического университета*, 2004, № 1, с. 8–12.
- [4] Витязь П.А., Панин В.Е., Белый А.Б. и др. Механика пластической деформации и разрушения поверхностно упрочненных твердых тел в условиях трения. *Физическая мезомеханика*, 2002, т. 5, № 1, с. 15–28.
- [5] Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред. *Физическая мезомеханика*, 2013, т. 16, № 1, с. 5–26.
- [6] Kwon Y.W. Revisiting failure of brittle materials. *J. Pressure Vessel Technol.*, 2021, vol. 143, no. 6, art. 064503, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4050989>

- [7] Ярославцев В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием в технологиях утилизации металлической стружки. *Наука и образование. Научное издание*, 2013, № 7. EDN: RMYDWV
- [8] Brach S., Tanné E., Bourdin B. et al. Phase-field study of crack nucleation and propagation in elastic-perfectly plastic bodies. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2019, vol. 353, pp. 44–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.04.027>
- [9] Горленко О.А. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных показателей деталей машин. *Трение и износ*, 1997, т. 18, № 3, с. 361–368.
- [10] Голенков В.А. К вопросу о повышении эксплуатационных характеристик полых осесимметричных деталей машин методами интенсивной пластической деформации. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2012, № 6, с. 71–77.
- [11] Зайдес С.А., Тхань Т.Л. Оценка влияния направления упрочненных армированных волокон на деформирующую способность цилиндрических деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 9, с. 41–52. EDN: ОНОISU
- [12] Зайдес С.А., Та В.Т.Т. Влияние формы и диаметра тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей. *Системы. Методы. Технологии*, 2025, № 2, с. 7–15.
- [13] Reyhan S.B., Rahman M.M. Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer. *Procedia Structural Integrity*, 2020, vol. 28, pp. 892–900, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>
- [14] Родионов И.В. Анализ структуры поверхностного слоя, его качества и влияния на эксплуатационные свойства деталей. *Современные материалы, техника и технологии*, 2020, № 3, с. 42–57.
- [15] Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебеденко В.Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах. *Вестник ДГТУ*, 2009, т. 9, № 3, с. 213–224.
- [16] Паршин С.В. *Конечно-элементное моделирование в решении прочностных задач машиностроения*. Екатеринбург, ИНМТ УрФУ, 2024. 68 с.
- [17] Тимошенко С.П. *Сопротивление материалов*. Москва, Наука, 1975. 560 с.
- [18] Кожаринова Л.В. *Основы теории упругости и пластичности*. Москва, Ассоциация строительных вузов, 2010. 136 с.
- [19] Мехеда В.А. Моделирование упругопластического деформирования приповерхностных слоев материалов. *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*, 2024, т. 30, № 3, с. 25–34, doi: [10.18287/2541-7525-2024-30-3-25-34](https://doi.org/10.18287/2541-7525-2024-30-3-25-34).
- [20] Бобровский Н.М. *Технология обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазывающе-охлаждающих технологических средств*. Самара, Самарский научный центр РАН, 2012. 141 с.
- [21] Зайдес С.А., Колесник А.В. Оценка напряженно-деформированного состояния при упрочнении цилиндрических деталей роликом с асимметричным профилем. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2019, № 9, с. 18–25, doi: https://doi.org/10.30987/article_5d2df088356040.61565175

References

- [1] Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of Hardening Parts by Surface Plastic Deformation.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p. (In Russ.).
- [2] Zaydes S.A., ed. *Spravochnik po protsessam poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya*. T. 1 [Handbook of surface plastic deformation processes. Vol. 1]. Irkutsk, Izd-vo IRNITU Publ., 2021. 504 p. (In Russ.).
- [3] Aliev A.A., Bulgakov V.P., Prikhodko B.S. Surface quality and properties of machine parts. *Vestnik astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Astrakhan State Technical University], 2004, no. 1, pp. 8–12. (In Russ.).
- [4] Vityaz P.A., Panin V.E., Belyy A.B. et al. Mechanics of plastic deformation and fracture of surface-hardened solids in friction. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2002, vol. 5, no. 1, pp. 15–28. (In Russ.).

- [5] Makarov P.V., Eremin M.O. Fracture model of brittle and quasibrittle materials and geome-dia. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 5–26. (In Russ.).
- [6] Kwon Y.W. Revisiting failure of brittle materials. *J. Pressure Vessel Technol.*, 2021, vol. 143, no. 6, art. 064503, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4050989>
- [7] Yaroslavtsev V.M. Cutting with outrunning plastic deformation in technologies of utilization of metal chips. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2013, no. 7. EDN: RMYDWV (in Russ.).
- [8] Brach S., Tanné E., Bourdin B. et al. Phase-field study of crack nucleation and propagation in elastic-perfectly plastic bodies. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2019, vol. 353, pp. 44–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.04.027>
- [9] Gorlenko O.A. Technological support and improvement of operational performance of machine parts. *Trenie i iznos*, 1997, vol. 18, no. 3, pp. 361–368. (In Russ.).
- [10] Golenkov V.A. On performance improving of hollow axisymmetric detales of machines by intensive plastic deformation methods. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2012, no. 6, pp. 71–77. (In Russ.).
- [11] Zaydes S.A., Tkhan T.L. Assessment of the reinforced fiber direction influence on deformability of the cylindrical parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2025, no. 9, pp. 41–52. EDN: OHOISU (in Russ.).
- [12] Zaydes S.A., Ta V.T.T. Influence of toroidal roller shape and diameter on stress-strain state of cylindrical parts. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2025, no. 2, pp. 7–15. (In Russ.).
- [13] Reyhan S.B., Rahman M.M. Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer. *Procedia Structural Integrity*, 2020, vol. 28, pp. 892–900, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>
- [14] Rodionov I.V. Analysis of the structure of the surface layer, its quality and influence on the performance properties of parts. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2020, no. 3, pp. 42–57. (In Russ.).
- [15] Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Lebedenko V.G. Improvement of quality of the blanket of details at processing by superficial plastic deformation in the flexible granulated environments. *Vestnik DGTU* [Vestnik of Don State Technical University], 2009, vol. 9, no. 3, pp. 213–224. (In Russ.).
- [16] Parshin S.V. *Konechno-elementnoe modelirovanie v reshenii prochnostnykh zadach mashinostroeniya* [Finite element modeling in solving strength problems in mechanical engineering]. Ekaterinburg, INMT UrFU Publ., 2024. 68 p. (In Russ.).
- [17] Timoshenko S. Strength of materials. Krieger Pub Co, 1983. 1010 p. (Russ. ed.: *Soprotivlenie materialov*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 560 p.)
- [18] Kozharinova L.V. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Assotsiatsiya stroitelnykh vuzov Publ., 2010. 136 p. (In Russ.).
- [19] Mekheda V.A. Modeling of elastoplastic deformation of near-surface material layers. *Bulletin of Samara University. Natural Science Series*, 2024, vol. 30, no. 3, pp. 25–34.
- [20] Bobrovskiy N.M. *Tekhnologiya obrabotki detaley poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem bez primeneniya smazyvayushche-okhlazhdayushchikh tekhnologicheskikh sredstv* [Technology of processing parts by surface-plastic deformation without the use of lubricating and cooling technological means]. Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2012. 141 p. (In Russ.).
- [21] Zaydes S.A., Kolesnik A.V. Assessment of stress-strained state at strengthening of cylindrical parts with asymmetric profile roller. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyeni* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2019, no. 9, pp. 18–25, doi: https://doi.org/10.30987/article_5d2df088356040.61565175 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.10.2025

Информация об авторах

ЗАЙДЕС Семен Азикович — доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

ТА Ван Тиен Тханг — аспирант кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: tavanthang95@gmail.com).

НИКОЛАЕВА Елена Павловна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: nicolaeva-ep@yandex.edu).

Information about the authors

ZAIDES Semyon Azikovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

TA Van Tien Thang — Postgraduate, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: tavanthang95@gmail.com).

NIKOLAEVA Elena Pavlovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: nicolaeva-ep@yandex.edu).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Та В.Т.Т., Николаева Е.П. Определение геометрических параметров ротационного ролика для повышения напряженно-деформированного состояния упрочненных деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 1, с. 44–55.

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Ta V.T.T., Nikolaeva E.P. Determination of the geometric parameters of a rotary roller to improve the stress-strain state of hardened parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 1, pp. 44–55.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебник

«Инженерная графика. Компьютерное геометрическое моделирование изделий»

Авторы: А.Ю. Горячкина, О.М. Корягина, Н.Г. Суркова

Представлены требования, предъявляемые к электронной конструкторской документации. Изложен алгоритм компьютерного геометрического моделирования. Приведены способы построения и редактирования электронных моделей, а также ассоциативных чертежей, построенных с использованием российской системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D v23.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программам подготовки бакалавров и специалистов технических специальностей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>