

УДК 621.787.4

Влияние материала рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние деталей при реверсивном выглаживании

Хыу Хай Нгуен¹, С.А. Зайдес²¹ Офицерское училище Военно-Воздушных Сил² Иркутский национальный исследовательский технический университет

Influence of Tool Material on the Stress–Strain State of Components during Reversible Burnishing

Nguyen Huu Hai¹, S.A. Zaides²¹ Air Force Officer College² Irkutsk National Research Technical University

Приведены результаты численного моделирования процесса реверсивного выглаживания заготовки из стали Ст45 с использованием роликов из разных материалов: инструментальной стали SKD-11, легированных сталей 42CrMo4, 40Cr и закаленной стали Ст45. Проанализировано влияние механических свойств материала рабочего инструмента на основные параметры процесса, включая напряженно-деформированное состояние заготовки, эквивалентную пластическую деформацию и накопленную энергию пластической деформации. Моделирование проведено в программном комплексе Abaqus с учетом упругопластических свойств материалов. Установлено, что твердость и прочность материала ролика существенно влияют на эффективность процесса. Сталь SKD-11 твердостью 58...62 HRC обеспечила максимальные значения напряженно-деформированного состояния (увеличение напряжений на 20...29 % по сравнению с закаленной сталью Ст45), эквивалентная пластическая деформации возросла в 3,25 раза, а накопленная энергия пластической деформации — в 4,8 раза. Полученные результаты подтверждают определяющую роль материала режущего инструмента в управлении процессом упрочнения и могут быть использованы для оптимизации технологии поверхностного пластического деформирования.

EDN: OAEVQO, <https://elibrary/oaevqo>

Ключевые слова: реверсивное выглаживание, напряженно-деформированное состояние, эквивалентная пластическая деформация, накопленная энергия пластической деформации, упругопластические свойства

The paper presents the results of numerical simulations of the reversible burnishing process applied to a C45 steel workpiece using rollers made of different materials, including SKD-11 tool steel, 42CrMo4 and 40Cr alloy steels, as well as quenched C45 steel. The objective of the study was to analyze the influence of the mechanical properties of the tool material on the key process parameters, including the stress–strain state of the workpiece, equivalent plastic strain, and accumulated plastic deformation energy. The simulations were performed using the Abaqus software package, taking into account the elastoplastic material behavior. The results show that the hardness and strength of the roller material have a significant effect on the process efficiency. SKD-11 steel, with a hardness of 58–62 HRC, provided the highest values of stress–strain state (with stress levels increasing by 20–29% compared to quenched C45 steel), while the equivalent plastic strain increased by a factor of 3.25 and the accumu-

lated plastic deformation energy increased by 4.8 times. These findings confirm the decisive role of tool material in controlling the strengthening process and can be used to optimize surface plastic deformation technologies.

EDN: OAEVQO, <https://elibrary/oaevqo>

Keywords: reversible burnishing, stress-strain state, equivalent plastic strain, accumulated plastic deformation energy, elastoplastic material behaviors

Методы поверхностного пластического деформирования (ППД), предназначенные для повышения эксплуатационных характеристик деталей — твердости, износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости — нашли широкое применение в современном машиностроении [1]. Среди различных методов ППД реверсивное выглаживание [2] выделяется способностью обеспечивать равномерное упрочнение поверхности благодаря многократному воздействию рабочего инструмента (РИ) с переменным направлением движения, что позволяет достичь высокой степени однородности деформации и благоприятного остаточного напряженного состояния в поверхностном слое заготовки.

Эффективность реверсивного выглаживания определяется совокупностью технологических параметров и свойств используемого оборудования. Причем важно корректно смоделировать взаимодействие РИ и заготовки. При численном моделировании процессов ППД инструмент часто рассматривают как абсолютно жесткое тело [2], что упрощает расчеты, но не учитывает его собственную деформацию и не дает полной картины энергетического баланса системы РИ — заготовка. Это ограничение обусловлено высокими вычислительными затратами и недостаточным пониманием влияния материала РИ на процесс деформирования заготовки.

Однако особенности выбора материала РИ описаны в литературе недостаточно полно. Справочник Л.Г. Одинцова [3] рекомендует использовать для изготовления роликов традиционные инструментальные стали ХВГ, У7-У12, ШХ15 и подобные материалы с высокой твердостью (58...64 HRC) и износостойкостью. Однако эти рекомендации основаны преимущественно на практическом опыте и не подкреплены систематическим анализом влияния механических свойств материала на параметры процесса деформирования.

В работе [4] рассмотрено влияние твердости ролика на шероховатость поверхности при ал-

мазном выглаживании, но количественная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) и пластической деформации не проводилась. Результаты исследования [5] показали влияние материала РИ на его износ и стойкость, но воздействие на НДС заготовки не анализировалось.

Между тем, для понимания механизмов упрочнения при ППД основное значение имеет анализ НДС обрабатываемого материала. Численное моделирование НДС при ППД активно развивается с применением метода конечных элементов. В работах [6, 7] использован программный комплекс ANSYS для определения распределения остаточных напряжений в заготовке после обкатки роликами и показана возможность формирования напряжений сжатия на глубине до 1...2 мм.

Исследования [8, 9] с применением программного комплекса Abaqus продемонстрировали преимущества явных динамических решателей (Explicit) при моделировании процессов с большими пластическими деформациями и сложным контактным взаимодействием. Вместе с тем РИ моделировался как жесткое тело, что не позволило оценить влияние его деформируемости на НДС заготовки. Остается неясным, насколько допущение о жесткости РИ справедливо для различных материалов и как его собственная деформация влияет на распределение напряжений в заготовке.

Наряду с НДС важными характеристиками процесса являются эквивалентная пластическая деформация (ЭПД) и накопленная энергия пластической деформации (НЭПД). ЭПД характеризует интенсивность деформационного упрочнения и влияет на характер изменения механических свойств в упрочненном слое по глубине. В работе [10] определено пороговое значение ЭПД для достижения наноструктурированного состояния при ультразвуковой обкатке роликами.

Показано [11], что распределение ЭПД по глубине зависит от параметров вибрационного воздействия и коррелирует с достигаемой мик-

ротвердостью. В работе [12] установлено, что максимальные значения ЭПД при обкатке роликами достигают 0,3...0,5 в приповерхностном слое, причем увеличение контактного давления приводит к росту как его уровня, так и глубины распространения пластической деформации.

Энергетический подход к анализу процессов ППД рассматривает НЭПД как критерий эффективности обработки. Разработана [13] термодинамическая методика анализа энергетического баланса упругопластических материалов с выделением пластической свободной энергии и энергии диссипации. Показано [14], что пластическая диссипация вносит значительный вклад в суммарное энергопоглощение при фрикционном контакте.

Однако в указанных работах не проанализировано влияние механических свойств материала РИ на значения ЭПД и НЭПД и их распределение в заготовке. Не изучена роль упругопластических свойств РИ в энергетическом балансе процесса и распределении энергии между РИ и заготовкой.

Таким образом, систематический анализ влияния материала РИ, моделируемого как упругопластическое тело, на НДС, ЭПД и НЭПД заготовки при реверсивном выглаживании практически отсутствует. Не установлены количественные закономерности влияния твердости и прочности материала ролика на максимальные значения временных и остаточных напряжений, ЭПД и НЭПД в заготовке.

Установление количественных закономерностей влияния материала РИ на параметры процесса позволит обоснованно выбирать материал роликов, повысить эффективность упрочнения, снизить энергозатраты и оптими-

зировать технологические режимы реверсивного выглаживания применительно к конкретным условиям производства.

Цель работы — установление количественных закономерностей влияния материала РИ на НДС, ЭПД и НЭПД заготовки при реверсивном выглаживании на основе численного моделирования методом конечных элементов с учетом упругопластических свойств как заготовки, так и РИ.

Способ реверсивного выглаживания. Как уже указывалось, реверсивное выглаживание относится к методам ППД, при которых упрочнение и сглаживание поверхности заготовки достигается многократным воздействием РИ, совершающего реверсивное движение. В результате обработки формируется наклепанный слой повышенной твердости с остаточными напряжениями сжатия, что положительно влияет на эксплуатационные характеристики деталей машин [2].

Подробное описание кинематики и физических основ метода приведено в работе [2]. Будем рассматривать модифицированную схему процесса реверсивного выглаживания, реализованную в условиях численного моделирования. Схема реверсивного выглаживания поверхности заготовки двухрадиусным роликом (далее ролик) приведена на рис. 1, а. Закрепленную в трехкулачковом патроне 1 заготовку 3 поддерживает задняя бабка 2. Ролик 4 совершает поступательное и реверсивное движения относительно оси заготовки, обеспечивая формирование поверхностного слоя с заданными характеристиками упрочнения. Принцип реверсивного вращения ролика показан на рис. 1, б,

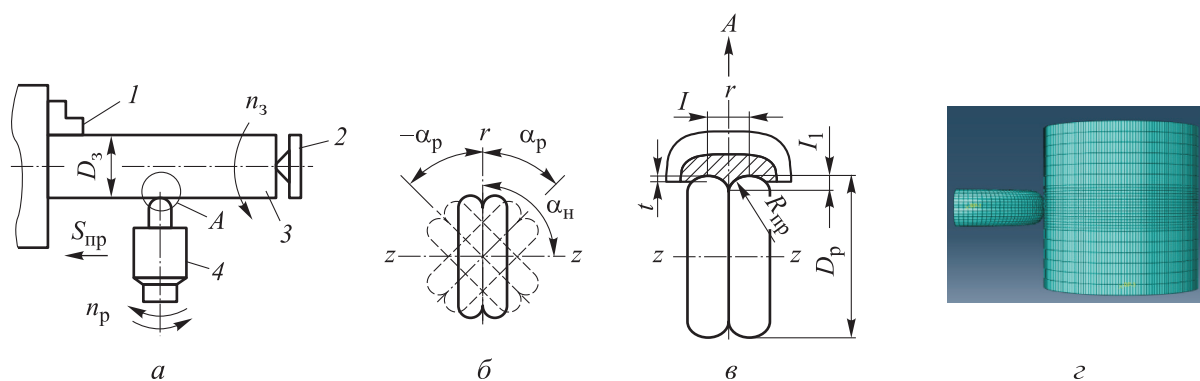


Рис. 1. Реверсивное выглаживание поверхности заготовки роликом:

а — схема обкатки роликом;
б и в — схема реверсивного вращения ролика и его геометрические параметры;
г — конечно-элементная модель рабочего процесса

его геометрические параметры — на рис. 1, в, конечно-элементная модель этого процесса — на рис. 1, г.

Методика численного моделирования. Для определения влияния материала ролика на НДС и характеристики пластической деформации заготовки в процессе реверсивного выглаживания применено численное моделирование с использованием метода конечных элементов [15, 16]. Выбор такого подхода обусловлен его способностью учитывать сложные взаимодействия между роликом и заготовкой, включая нелинейные эффекты пластической деформации, контактные явления и распределение напряжений в поверхностном слое. Моделирование проведено в программном комплексе Abaqus/Explicit, который позволяет эффективно симулировать динамические процессы с высокой степенью точности, особенно в условиях многократных циклов деформации, характерных для реверсивного выглаживания [8, 9].

Геометрические и технологические параметры модели. Трехмерная модель системы РИ — заготовка включала в себя ролик ($D_p = 30$ мм, $I = 2$ мм, $R_{np} = 2,5$ мм) и цилиндрическую заготовку из стали Ст45 ($D_3 = 30$ мм, $L_3 = 50$ мм). Заготовку моделировали как деформируемое тело, ролик также рассматривали как деформируемое тело, чтобы отразить влияние упругопластических свойств его материала на процесс реверсивного выглаживания. Технологические параметры процесса были следующими: продольная подача $S_{np} = 0,1$ мм/об; частота вращения заготовки $n_3 = 300$ мин⁻¹; радиальный натяг $t = 0,1$ мм; угол реверса ролика $\alpha_p = \pm 30^\circ$; начальный угол установки ролика $\alpha_n = 90^\circ$; реверсивная частота вращения ролика $n_p = 300$ дв.ход/мин.

Свойства материалов. В качестве материала заготовки выступала сталь 45 со следующими характеристиками: модуль упругости $E = 200\,000$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; плотность $\rho = 7,7 \cdot 10^{-9}$ т/мм³; предел текучести $\sigma_t \approx 360$ МПа; предел прочности $\sigma_b \approx 630$ МПа.

Для определения влияния материала ролика на НДС и характеристики пластической деформации заготовки выбраны четыре типа материалов, физико-механические характеристики которых указаны в таблице.

Обоснование выбора материалов ролика. SKD-11 — высокоуглеродистая хромистая инструментальная сталь (японская сталь, соответствует американской стали D2 по AISI) — содержит около 12 % хрома, что обеспечивает высокую износостойкость и сопротивление абразивному износу. После термической обработки достигает твердости 58...62 HRC и предела прочности около 2000 МПа. Широко применяется для изготовления штампов холодной деформации, пуансонов и РИ. Выбрана как эталонный материал для обеспечения максимальной эффективности упрочнения.

42CrMo4 — среднелегированная хромомолибденовая сталь. Обладает оптимальным сочетанием прочности ($\sigma_b \approx 1100$ МПа), твердости (50...55 HRC после термообработки) и вязкости. Молибден повышает прокаливаемость и снижает склонность к отпускной хрупкости. Используется для изготовления ответственных деталей машин, работающих при ударных нагрузках. Выбрана для оценки баланса между эффективностью деформации и ресурсом РИ.

40Cr — хромистая среднеуглеродистая сталь — относится к наиболее распространенным конструкционным легированным сталям.

Физико-механические характеристики материалов ролика

Марка стали	E , ГПа	σ_t , МПа	σ_b , МПа	Твердость, HRC	Отличительные особенности
SKD-11	210	~1500	~2000	58...62	Высокая износостойкость, минимальная деформация
42CrMo4*	210	~900	~1100	50...55	Оптимальное сочетание прочности и вязкости
40Cr*	210	~700	~1000	45...55	Конструкционная легированная сталь
Ст45 (закаленная)	200	~600	~800	45...50	Низкая устойчивость к контактным нагрузкам

* Для обозначения марок сталей использован международный стандарт ISO/EN.

Твердость после закалки составляет 45...55 HRC, предел прочности — около 1000 МПа. Применяется для выполнения валов, осей и зубчатых колес средней нагруженности. Включена в исследование как представитель материалов средней твердости, позволяющий оценить влияние частичной деформации РИ на НДС и характеристики пластической деформации заготовки.

Ст45 закаленная — углеродистая конструкционная сталь после термообработки. Предел прочности составляет около 800 МПа, твердость — 45...50 HRC, что представляет нижнюю границу твердости, при которой материал можно использовать для роликов при ППД. Служит для количественной оценки потерь эффективности при применении мягких материалов для изготовления ролика.

Параметры конечно-элементной модели. Конечно-элементная сетка реверсивного выглаживания сгенерирована с помощью гексаэдрических конечных элементов (КЭ) C3D8R для заготовки и ролика (размер КЭ в зоне контакта — 0,5 мм, общее количество КЭ — около 600 000). Для предотвращения искажений КЭ в области интенсивной деформации использована адаптивная перестройка сетки. Граничные условия: заготовка закреплена от осевого перемещения на торцах, ролик имеет заданную траекторию согласно кинематике процесса. Контактное взаимодействие ролика и заготовки смоделировано с применением закона трения Кулона при коэффициенте трения $\mu = 0,15$. Критерий сходимости по энергии составлял 10^{-4} .

Расчетные параметры. Компоненты напряжений — осевые σ_z , радиальные σ_r и окружные (тангенциальные) σ_ϕ , — возникающие при нагружении цилиндрической заготовки, приве-

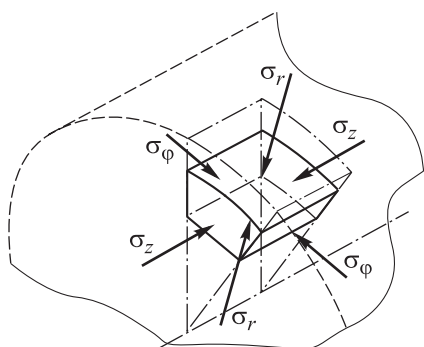


Рис. 2. Схема цилиндрической заготовки с компонентами напряжений, возникающими при нагружении

дены на рис. 2. Они определяют характер распределения нагрузок в объеме материала и служат базой для дальнейшего анализа НДС при обработке.

Для анализа напряженного состояния в различных точках цилиндрической заготовки с учетом главных компонент тензора напряжений (см. рис. 2) рассчитана интенсивность временных и остаточных напряжений. Интенсивность остаточных напряжений определена с помощью критерия Мизеса [17, 18]

$$\sigma_i^{\text{ост}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_z^{\text{ост}} - \sigma_\phi^{\text{ост}})^2 + (\sigma_\phi^{\text{ост}} - \sigma_r^{\text{ост}})^2 + (\sigma_r^{\text{ост}} - \sigma_z^{\text{ост}})^2 \right]},$$

где $\sigma_z^{\text{ост}}$, $\sigma_r^{\text{ост}}$ и $\sigma_\phi^{\text{ост}}$ — осевые, радиальные и тангенциальные компоненты остаточных напряжений, действующие по соответствующим осям.

По аналогичной формуле рассчитана и интенсивность временных напряжений σ_i^{BP} .

Для нахождения ЭПД заготовки использована формула

$$\bar{\epsilon}^p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \left[(d\epsilon_z^p - d\epsilon_\phi^p)^2 + (d\epsilon_\phi^p - d\epsilon_r^p)^2 + (d\epsilon_r^p - d\epsilon_z^p)^2 \right]} dt,$$

где ϵ_z^p , ϵ_ϕ^p и ϵ_r^p — компоненты пластической деформации вдоль соответствующих осей.

В численных методах (например, в среде Abaqus) расчет выполняется шаг за шагом, и ЭПД обновляется на каждом временном шаге:

$$\bar{\epsilon}_{n+1}^p = \bar{\epsilon}_n^p + d\bar{\epsilon}^p,$$

где $d\bar{\epsilon}^p$ — дифференциальная ЭПД, аккумулируемая по мере развития процесса деформации.

НЭПД заготовки определена как объемный интеграл работы пластических деформаций

$$W_{\text{пл}} = \int \left(\int_0^{\bar{\epsilon}^p} \sigma_{\text{экв}} d\bar{\epsilon}^p \right) dV,$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ — эквивалентное напряжение (по Мизесу); V — объем обрабатываемой зоны.

В программном комплексе Abaqus НЭПД вычислялось автоматически как объемный интеграл работы пластических деформаций и накапливалось в процессе пошагового нагружения, что обеспечивало корректный энергетический учет пластического течения материала.

Результаты моделирования. Для анализа влияния упругих и пластических деформаций ролика на НДС заготовки выполнено сравнение результатов моделирования ролика из стали SKD-11 как абсолютно жесткого тела (взяты из работ [2, 15]) и как деформируемого материала. Выбор стали SKD-11 в качестве примера обусловлен тем, что для других материалов влияние деформаций на НДС заготовки будет аналогичным. Такое сравнение позволило определить, насколько деформация ролика влияет на распределение напряжений и пластических деформаций в обрабатываемой заготовке.

Распределение интенсивности временных σ_i^{BP} и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений по глубине заготовки R_z при реверсивном выглаживании абсолютно жестким и деформируемым (с учетом реальных упругопластических свойств материала) роликами из стали SKD-11 показано на рис. 3. Видно, что максимальные значения интенсивности напряжений достигаются на поверхности заготовки и монотонно уменьшаются по мере удаления вглубь материала, что соответствует локализованному характеру очага пластической деформации при реверсивном выглаживании [2].

Сравнение результатов моделирования при обработке абсолютно жестким и деформируемым роликами показало, что различия уровней временных и остаточных напряжений в заготовке не превышают 10 %. Для абсолютно жесткого ролика максимальная интенсивность временных напряжений составила 515 МПа, для деформируемого — 480 МПа, тогда как

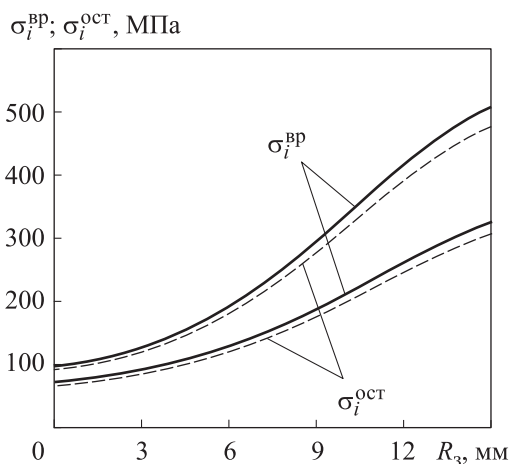


Рис. 3. Распределение интенсивности временных σ_i^{BP} и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений по глубине заготовки R_z при реверсивном выглаживании абсолютно жестким (—) и деформируемым (---) роликами из стали SKD-11

$\sigma_i^{BP}, \sigma_i^{ост}$, МПа

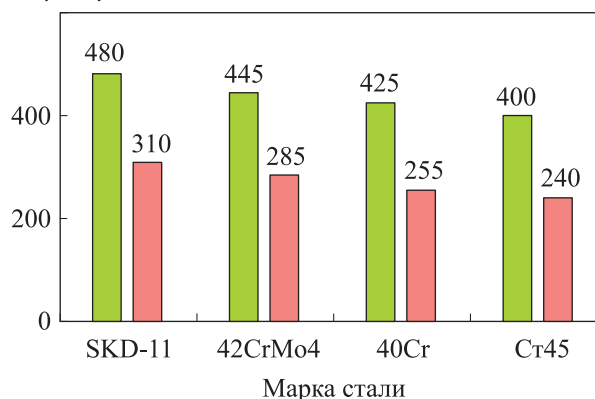


Рис. 4. Зависимости максимальной интенсивности временных σ_i^{BP} (■) и остаточных $\sigma_i^{ост}$ (■) напряжений в заготовке от марки стали ролика

остаточные напряжения уменьшились соответственно с 330 до 310 МПа.

Относительно небольшая разница значений (в пределах 10 %) обусловлена тем, что у ролика из стали SKD-11 твердость и модуль упругости значительно больше, чем у заготовки из стали 45, и это существенно ограничивает собственную деформацию РИ. Однако наблюдаемое уменьшение напряжений свидетельствует о том, что учет упругопластических свойств ролика все же приводит к перераспределению контактного давления и некоторому снижению как временных и остаточных напряжений в заготовке.

Таким образом, использование в численном моделировании абсолютно жесткого ролика из высокопрочной инструментальной стали можно рассматривать как допустимое приближение, не вносящее существенной погрешности в оценку НДС заготовки. В связи с этим далее рассмотрено влияние материала ролика на НДС заготовки при неизменных технологических параметрах обработки.

Зависимости максимальной интенсивности временных σ_i^{BP} и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений в заготовке от марки стали ролика приведены на рис. 4.

Видно, что у ролика из высокопрочной стали SKD-11 максимальная интенсивность напряжения значительно выше, чем у ролика из закаленной стали 45: временные σ_i^{BP} — на 20 % (480 против 400 МПа), остаточные $\sigma_i^{ост}$ — на 29 % (310 против 240 МПа). Для сталей 42CrMo4 и 40Cr увеличение интенсивности по временным напряжениям составило 11 и 19 % соответственно, а по остаточным — около 6 %. Таким образом, наблюдается четкая корреля-

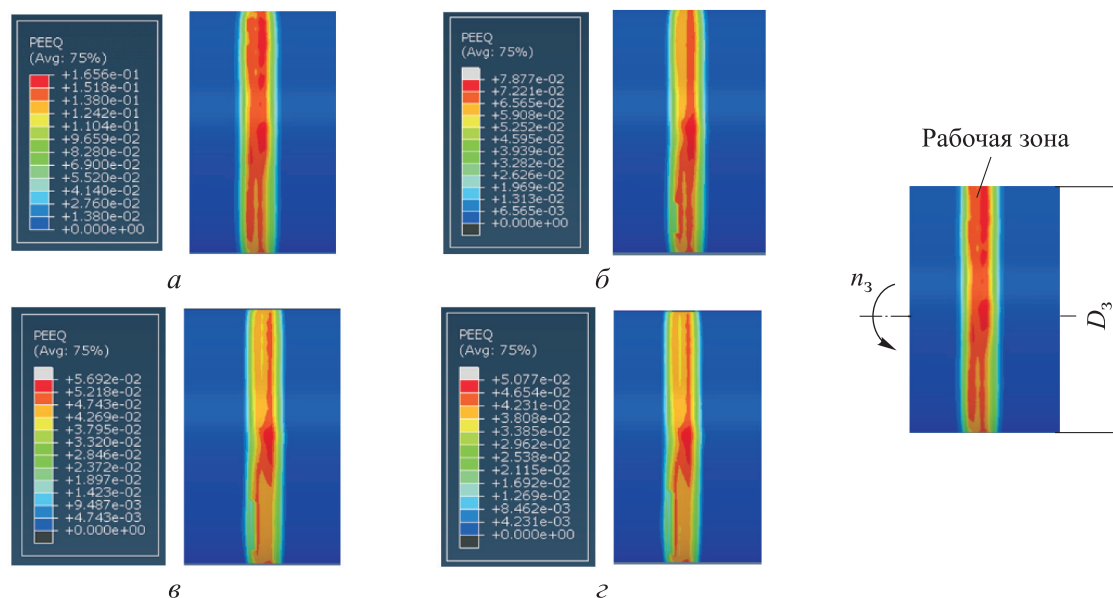


Рис. 5. Распределение ЭПД по цилиндрической поверхности заготовки после реверсивного выглаживания роликом, выполненным из сталей SKD-11 (а), 42CrMo4 (б), 40Cr (в) и Ст45 (г)

ция между прочностью материала ролика и уровнем напряжений в заготовке.

Установленная закономерность обусловлена различием в распределении энергии деформации между элементами системы РИ — заготовка. Сталь SKD-11, прочность которой ($\sigma_b \approx 2000$ МПа) в 2,5 раза выше, чем у закаленной стали Ст45 ($\sigma_b \approx 800$ МПа), почти не деформируется при контакте с заготовкой, обеспечивая концентрацию всей приложенной нагрузки на деформирование обрабатываемого материала. Стали средней прочности 42CrMo4 ($\sigma_b \approx 1100$ МПа) и 40Cr ($\sigma_b \approx 1000$ МПа) занимают промежуточное положение: их частичная деформация приводит к некоторому рассеиванию энергии, но их прочность, в 1,4 и 1,25 раза превышающая прочность Ст45, все еще обеспечивает значительное упрочнение заготовки. При использовании закаленной Ст45 существенная часть энергии расходуется на деформирование ролика, что снижает эффективность передачи напряжений в заготовку и уменьшает достигаемый уровень упрочнения.

Распределение ЭПД по цилиндрической поверхности заготовки после реверсивного выглаживания роликом, выполненным из различных марок стали показано на рис. 5, а гистограмма максимальных ЭПД заготовки — на рис. 6. Анализ полученных данных позволяет установить зависимость интенсивности пластической деформации заготовки от материала ролика.

Как видно из рис. 6, самая максимальная ЭПД (0,166) достигается при использовании ролика из стали SKD-11, которая более чем в 2 раза выше, чем для стали 42CrMo4 (0,079) и почти в 3 раза, чем для сталей 40Cr (0,057) и Ст45 (0,051). При этом зона пластической деформации (рис. 5, а) выражена наиболее интенсивно и отличается наибольшей протяженностью вдоль поверхности заготовки. При применении в качестве материала ролика сталей 42CrMo4, 40Cr и Ст45 (рис. 5, б–г) наблюдается последовательное снижение как максимальных значений ЭПД, так и размера зоны пластической деформации.

Полученные различия обусловлены совокупностью механических свойств сталей, из

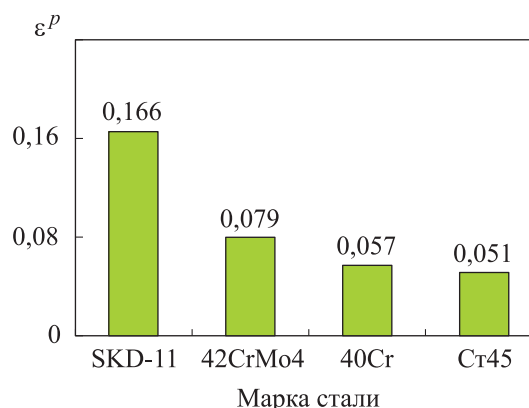


Рис. 6. Зависимость максимальной ЭПД заготовки ϵ^p от марки стали ролика после реверсивного выглаживания

которых изготовлен ролик. Высокие твердость и прочность стали SKD-11 обеспечивают наиболее эффективную передачу контактного давления и энергии деформации в заготовку, что приводит к формированию интенсивного очага пластической деформации. Для стали 42CrMo4 характерен промежуточный уровень ЭПД, обусловленный сочетанием повышенной прочности и достаточной вязкости материала. Стали 40Cr и Ст45 демонстрируют более низкую эффективность деформационного воздействия вследствие меньшей жесткости и частичного перераспределения энергии в ролике.

Сопоставление данных, приведенных на рис. 5 и 6, показывает, что увеличение максимальной ЭПД сопровождается расширением и повышением интенсивности зоны пластической деформации в поверхностном слое заготовки. Это свидетельствует о том, что выбор материала РИ определяет не только уровень ЭПД, но и характер ее пространственного распределения.

Зависимость НЭПД заготовки $W_{пл}$ от времени τ при реверсивном выглаживании роликом из стали SKD-11 приведена на рис. 7. Полученная кривая учитывает реверсивный характер вращения ролика, являясь интегральной величиной, суммирующей энергию всех циклов его вращения как по ходу часовой стрелки, так и против ее хода. НЭПД представляет собой монотонно возрастающую функцию времени, характер изменения которой позволяет выделить четыре стадии процесса реверсивного выглаживания.

На первой стадии (0–0,3 с) наблюдается интенсивный рост энергии от 0 до ~14 кДж со скоростью ~47 кДж/с, что соответствует

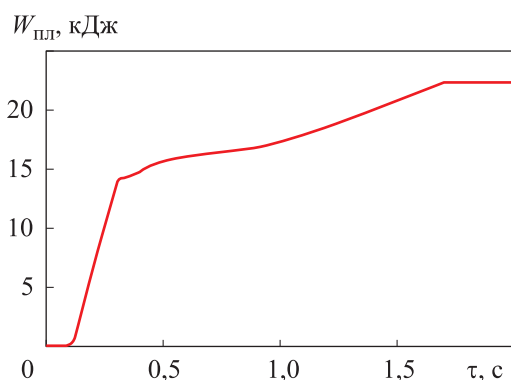


Рис. 7. Зависимость НЭПД заготовки $W_{пл}$ от времени τ при реверсивном выглаживании роликом из стали SKD-11

начальному внедрению ролика в заготовку, преодолению предела текучести материала и формированию первичного очага пластической деформации в поверхностном слое.

Вторая стадия (0,3...0,6 с) характеризуется резким замедлением темпа нарастания энергии до ~6,7 кДж/с (возрастание от ~14 до ~16 кДж), что обусловлено деформационным упрочнением материала в зоне контакта и переходом к циклическому реверсивному нагружению.

На третьей стадии (0,6...1,8 с) кривая приобретает стабильный линейный характер с постоянной скоростью накопления энергии ~5,4 кДж/с (увеличение от ~16 до ~22,5 кДж), что свидетельствует о достижении квазистационарного режима обработки, при котором происходит постепенное распространение пластической деформации вглубь материала и формирование упрочненного слоя заданной толщины с благоприятным распределением остаточных напряжений сжатия.

Четвертая стадия (после 1,8 с) соответствует отводу ролика от поверхности заготовки и завершению процесса деформирования, причем кривая выходит на горизонтальное плато на уровне ~22,5 кДж, фиксируя суммарную необратимую работу, затраченную на формирование упрочненного слоя.

В связи с этим далее выполнен сравнительный анализ влияния материала ролика на НЭПД заготовки при реверсивном выглаживании. Полученные результаты (рис. 8) свидетельствуют о выраженной зависимости энергетических характеристик процесса от материала ролика.

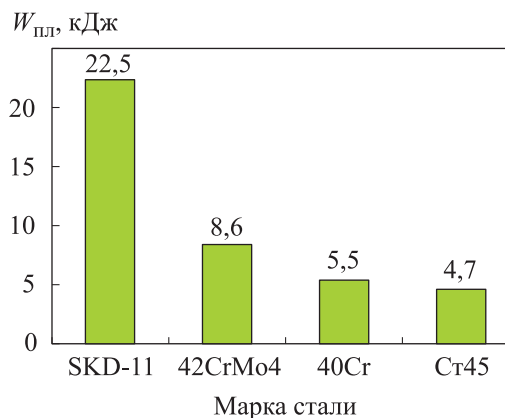


Рис. 8. Зависимость максимальной НЭПД заготовки $W_{пл}$ от марки стали ролика после реверсивного выглаживания

Наибольшее значение НЭПД наблюдается при использовании ролика из стали SKD-11 и составляет около 22,5 кДж. Для стали 42CrMo4 оно существенно ниже (на уровне 8,6 кДж), тогда как для марок 40Cr и Ст45 НЭПД уменьшается соответственно до 5,5 и 4,7 кДж. Таким образом, при переходе от высокопрочной инструментальной стали к менее жестким материалам наблюдается последовательное снижение НЭПД заготовки.

Сопоставление значений НЭПД с ранее рассмотренными ЭПД показывает, что более высокие значения НЭПД соответствуют не только увеличению максимальной ЭПД, но и расширению зоны пластической деформации в поверхностном слое заготовки. Высокие твердость и прочность стали SKD-11 обеспечивают самую эффективную передачу энергии деформации в заготовку, тогда как использование ролика из сталей 42CrMo4, 40Cr и Ст45 приводит к снижению суммарной ЭПД вследствие частичного перераспределения энергии в ролике.

Полученные результаты подтверждают, что выбор материала ролика является эффективным средством управления напряженно-деформированным и энергетическим состояниями заготовки при реверсивном выглаживании. Для практического применения можно рекомендовать:

- SKD-11 — для достижения максимального упрочнения и формирования интенсивного очага пластической деформации в условиях высоких контактных нагрузок;
- 42CrMo4 — для обеспечения баланса между эффективностью деформационного воздействия и стойкостью ролика при умеренных нагрузках;
- 40Cr и закаленная Ст45 — для обработки при пониженных нагрузках, когда требования к интенсивности упрочнения невысоки, а также для обработки цветных сплавов (алюминиевых, медных, магниевых) и мягких сталей.

Выводы

1. Численным моделированием установлено, что материал ролика оказывает определяющее влияние на основные параметры процесса реверсивного выглаживания, включая НДС заготовки, ЭПД и НЭПД в зоне обработки.

2. Показано, что увеличение прочности и твердости материала ролика сопровождается устойчивым ростом уровней НДС, ЭПД и НЭПД заготовки при неизменных технологических параметрах. Эта зависимость обусловлена снижением упругопластической деформации ролика и более эффективной передачей энергии деформации в заготовку.

3. Среди исследованных сталей марка SKD-11 обеспечивает наибольшие значения параметров деформационного воздействия. По сравнению с закаленной сталью Ст45 максимальная интенсивность временных напряжений возрастает примерно на 20 %, остаточных напряжений — на 29 %, ЭПД — в 3,25 раза, а НЭПД — в 4,8 раза. Это свидетельствует о формировании более интенсивной и протяженной зоны пластической деформации в поверхностном слое заготовки.

4. Полученные результаты подтверждают, что выбор материала ролика является эффективным инструментом управления напряженно-деформированным и энергетическим состояниями заготовки при реверсивном выглаживании. Приведенные зависимости интенсивности напряжений, остаточных напряжений и НЭПД от материала ролика могут быть использованы для обоснованного выбора материала ролика в рамках численного анализа.

5. Установленные закономерности имеют практическое значение для выбора материала ролика: SKD-11 рекомендована для достижения максимального упрочнения, 42CrMo4 — для обеспечения баланса между эффективностью и стойкостью ролика, 40Cr и закаленная Ст45 — для обработки при умеренных нагрузках.

Литература

- [1] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 299 с.
- [2] Нгуен Хью Хай. *Повышение эффективности упрочнения цилиндрических деталей машин реверсивным выглаживанием*. Дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, ИрННТУ, 2024. 207 с.
- [3] Одинцов Л.Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 1987. 328 с.

- [4] Швецов А.Н., Скуратов Д.Л. Влияние параметров процесса алмазного выглаживания на качество поверхностного слоя деталей при производстве изделий авиационной техники. *Вестник МАИ*, 2023, т. 30, № 4, с. 220–231. EDN: HLALUU
- [5] Аль-Обайди Л.М.Р., Попов М.Е. Учет влияния износа и стойкости инструмента на точность обработки длинномерных валов. *Молодой исследователь Дона*, 2020, № 2, с. 1–9. EDN: JULDNR
- [6] Букатый А.С., Костичев В.Э., Денискина Е.А. Динамический метод исследования концентраторов напряжений коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 с учетом упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва*, 2013, № 3–2, с. 40–45. EDN: SNWTYX
- [7] Нго К.К. *Повышение качества малоожестких валов поверхностным пластическим деформированием в стесненных условиях*. Дисс. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2018. 156 с.
- [8] Rojek J., Lumelskyj D., Nosewicz S. et al. Numerical and experimental investigation of an elastoplastic contact model for spherical discrete elements. *Comp. Part. Mech.*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 383–392, doi: <https://doi.org/10.1007/s40571-018-00219-8>
- [9] Ristić S., He S., Van Bael A. et al. Texture-based explicit finite-element analysis of sheet metal forming. *Mater. Sci. Forum*, 2015, vol. 495–497, pp. 1535–1541, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.495-497.1535>
- [10] Liu Y., Wang L., Wang D. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, vol. 211, no. 12, pp. 2106–2113, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.009>
- [11] Teimouri R., Skoczypiec S. A bottom-up multi-physics model correlating burnishing factors to fatigue life. *Measurement*, 2024, vol. 234, art. 114872, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114872>
- [12] Kowalik M., Trzepieciniski T., Kukielka L. et al. Experimental and numerical analysis of the depth of the strengthened layer on shafts resulting from roller burnishing with roller braking moment. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 19, art. 5844. <https://doi.org/10.3390/ma14195844>
- [13] Yang H., Sinha S.K., Feng Y. et al. Energy dissipation analysis of elastic–plastic materials. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 2018, vol. 331, pp. 309–326, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.11.009>
- [14] Wentzel H., Olsson M. Mechanisms of dissipation in frictional joints-Influence of sharp contact edges and plastic deformation. *Wear*, 2008, vol. 265, no. 11–12, pp. 1814–1819, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.026>
- [15] Ferencsik V. FEM investigation of the roughness and residual stress of diamond burnished surface. *J. Exp. Theor. Anal.*, 2024, vol. 2, no. 4, pp. 80–90, doi: <https://doi.org/10.3390/jeta2040007>
- [16] Lee H.M., Kwak H.M., Choi J.M. et al. Novel finite element analysis model for three-roller fillet rolling focusing on its strength of accuracy and practicability. *J. Mater. Res. Technol.*, 2025, vol. 37, pp. 3788–3800, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.083>
- [17] Rashid A., Gopaluni A. A review of residual stress and deformation modeling for metal additive manufacturing processes. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2023, vol. 2, no. 4, art. 100102, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2023.100102>
- [18] Wakchaure M.B., Misra M., Menezes P.L. Finite element simulation of the laser shock peening process on 304L stainless steel. *Materials*, 2025, vol. 18, no. 3, art. 2958, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18132958>

References

- [1] Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of Hardening Parts by Surface Plastic Deformation.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 299 p. (In Russ.).
- [2] Nguen Khyu Khay. *Povyshenie effektivnosti uprochneniya tsilindricheskikh detaley mashin reversivnym vyglazhivaniem*. Diss. kand. tekhn. Nauk [Improving the efficiency of hardening cylindrical machine parts by reverse smoothing. Kand. tech. sci. diss.]. Irkutsk, IrNITU Publ., 2024. 207 p. (In Russ.).

- [3] Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p. (In Russ.).
- [4] Shvetsov A.N., Skuratov D.L. Diamond burnishing process parameters impact on the surface layer quality of the parts while aviation technology products manufacturing. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2023, t. 30, no. 4, pp. 220–231. EDN: HLALUU (In Russ.).
- [5] Al-Obaydi L.M.R., Popov M.E. Accounting for the effects of wear and tool life for the precision machining of long shafts. *Molodoy issledovatel Dona* [Young Don Researcher], 2020, no. 2, pp. 1–9. EDN: JULDNR (In Russ.).
- [6] Bukatyy A.S., Kostichev V.E., Deniskina E.A. Dynamic method of investigating stress concentrators of the YMZ-238 engine crankshaft considering surface hardening plastic deformation. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2013, no. 3–2, pp. 40–45. EDN: SNWTYX (In Russ.).
- [7] Ngo K.K. *Povyshenie kachestva malozhestkikh valov poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem v stesnennykh usloviyakh*. Diss. kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2018. 156 p. (In Russ.).
- [8] Rojek J., Lumelsky D., Nosewicz S. et al. Numerical and experimental investigation of an elastoplastic contact model for spherical discrete elements. *Comp. Part. Mech.*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 383–392, doi: <https://doi.org/10.1007/s40571-018-00219-8>
- [9] Ristić S., He S., Van Bael A. et al. Texture-based explicit finite-element analysis of sheet metal forming. *Mater. Sci. Forum*, 2015, vol. 495–497, pp. 1535–1541, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.495-497.1535>
- [10] Liu Y., Wang L., Wang D. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, vol. 211, no. 12, pp. 2106–2113, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.009>
- [11] Teimouri R., Skoczypiec S. A bottom-up multi-physics model correlating burnishing factors to fatigue life. *Measurement*, 2024, vol. 234, art. 114872, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114872>
- [12] Kowalik M., Trzepiecinski T., Kukielka L. et al. Experimental and numerical analysis of the depth of the strengthened layer on shafts resulting from roller burnishing with roller braking moment. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 19, art. 5844. <https://doi.org/10.3390/ma14195844>
- [13] Yang H., Sinha S.K., Feng Y. et al. Energy dissipation analysis of elastic–plastic materials. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 2018, vol. 331, pp. 309–326, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.11.009>
- [14] Wentzel H., Olsson M. Mechanisms of dissipation in frictional joints-Influence of sharp contact edges and plastic deformation. *Wear*, 2008, vol. 265, no. 11–12, pp. 1814–1819, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.026>
- [15] Ferencsik V. FEM investigation of the roughness and residual stress of diamond burnished surface. *J. Exp. Theor. Anal.*, 2024, vol. 2, no. 4, pp. 80–90, doi: <https://doi.org/10.3390/jeta2040007>
- [16] Lee H.M., Kwak H.M., Choi J.M. et al. Novel finite element analysis model for three-roller fillet rolling focusing on its strength of accuracy and practicability. *J. Mater. Res. Technol.*, 2025, vol. 37, pp. 3788–3800, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.083>
- [17] Rashid A., Gopaluni A. A review of residual stress and deformation modeling for metal additive manufacturing processes. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2023, vol. 2, no. 4, art. 100102, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2023.100102>
- [18] Wakchaure M.B., Misra M., Menezes P.L. Finite element simulation of the laser shock peening process on 304L stainless steel. *Materials*, 2025, vol. 18, no. 3, art. 2958, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18132958>

Статья поступила в редакцию 14.01.2026

Информация об авторах

НГУЕН Хыу Хай — кандидат технических наук, преподаватель. Офицерское училище Военно-Воздушных Сил (650000, Нячанг, Вьетнам, e-mail: nquan6799@gmail.com).

ЗАЙДЕС Семен Азикович — доктор технических наук, профессор, 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).

Information about the authors

NGUYEN Huu Hai — Candidate of Science (Eng.), Lecturer. Air Force Officer College (650000, Nha Trang, Viet Nam, e-mail: nquan6799@gmail.com).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А. Влияние материала рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние деталей при реверсивном выглаживании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 48–59.

Please cite this article in English as:

Nguyen Huu Hai, Zaides S.A. Influence of Tool Material on the Stress–Strain State of Components during Reversible Burnishing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 48–59.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебно-методическое пособие**

«Определение потребного объема смазочно-охлаждающей жидкости при лезвийной обработке»

Авторы: Д.В. Виноградов, Р.И. Пенджола, С.Ю. Шачнев

Кратко описаны этапы жизненного цикла смазочно-охлаждающих жидкостей, используемых при обработке металлов, — приготовление, применение, регенерация, утилизация. Рассмотрена система применения — подсистемы подачи, очистки, рекуперации, микробиологической защиты и стабилизации качества смазочно-охлаждающих жидкостей. Представлены методика и порядок укрупненного и детального расчетов годовой потребности в смазочно-охлаждающих жидкостях на операциях лезвийной обработки. Приведены необходимые для выполнения расчетов справочные данные, а также пример расчета.

Для студентов, изучающих курс «Смазочно-охлаждающие технологические средства в механической обработке» в рамках направления подготовки 15.05.01/02 «Проектирование технологических машин и комплексов — Проектирование инструментальных комплексов в машиностроении».

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>