

*На правах рукописи*



**НГУЕН ХЫУ ХАЙ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН РЕВЕРСИВНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена  
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении  
высшего образования  
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

**Научный руководитель:****Зайдес Семён Азикович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий (г. Иркутск)

**Официальные оппоненты:****Кузнецов Виктор Павлович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», (г. Екатеринбург)

**Кропоткина Елена Юрьевна**

доктор технических наук, профессор кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», (г. Москва)

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», (г. Кемерово)

Защита состоится «08» февраля 2024 г. в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: <http://www.istu.edu>.

Автореферат разослан «14» декабря 2023 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

Е-mail: [vulix2011@yandex.ru](mailto:vulix2011@yandex.ru)

Тел./факс: (3952)40-51-17

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.т.н., доцент



Н.В. Вулых

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Важнейшей задачей современного машиностроения является повышение качества выпускаемых изделий, которое во многом зависит от состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств отдельных деталей.

Цилиндрические детали типа валов и осей применяются во многих машинах и механизмах. Они изготавливаются обычно из конструкционных среднеуглеродистых и легированных сталей. При эксплуатации на валы влияют переменные силовые и температурные воздействия, силы трения и разнообразные внешние факторы. Под их действием валы в целом и отдельные их поверхности подвержены деформации, различным видам изнашивания и разрушениям.

В производственной практике повысить качество поверхностного слоя ответственных деталей машин типа валов и осей можно финишными и отделочно-упрочняющими методами обработки, в том числе поверхностным пластическим деформированием (ППД), позволяющим увеличить прочность поверхностного слоя, сгладить микронеровности, сформировать в поверхностных слоях сжимающие остаточные напряжения. Сущность процесса ППД заключается в обработке поверхностного слоя деталей деформирующим инструментом (шарики, ролики, гладилки), при которой не образуется стружка, а происходит пластическое деформирование тонкого поверхностного слоя заготовки. В результате деформационной упрочняющей обработки повышается усталостная прочность, износо- и коррозионная стойкость, снижаются силы трения в зоне контакта трущихся пар и т. д.

В связи с мероприятиями по экономии материальных ресурсов в машиностроительных отраслях стали проектировать и изготавливать детали с меньшими размерами поперечных сечений, например, цилиндры с более тонкими стенками, валы и оси с меньшими диаметральными размерами, панели с более тонкими перегородками и ряд других изделий, которые получили название нежестких деталей. Такие детали обычно являются нетехнологичными, так как при обработке возникают проблемы по сохранению их формы и размеров. Например, при механической обработке нежестких валов они легко изгибаются, что не позволяет обеспечить заданную форму и размеры деталей. При обработке таких деталей поверхностным пластическим деформированием сложно получить стабильное качество по длине обработки – это касается и твердости, и шероховатости, и остаточных напряжений. Если снизить величину радиальной нагрузки, т. е. уменьшить величину радиального натяга рабочего инструмента, то не удастся обеспечивать заданные показатели качества поверхностного слоя деталей машин.

Техническая идея по решению указанной проблемы основана на усложнении кинематики технологического процесса, которая позволяет повысить напряженно-деформированное состояние в очаге упруго-пластической деформации без изменения радиального натяга рабочего инструмента.

В связи с вышеизложенным актуальность темы исследования заключается в необходимости интенсификации напряженного состояния в зоне деформации без увеличения силы внешнего воздействия и повышении качества поверхностного слоя упрочненных деталей. Для решения поставленной задачи предлагается использовать реверсивное выглаживание. Особенность данного способа заключается в новой кинематике рабочего инструмента, реализующей реверсивное круговое движение тороидального ролика.

**Целью диссертационной работы** является разработка повышения эффективности упрочнения цилиндрических деталей машин путем интенсификации напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя **реверсивным выглаживанием**.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. По результатам обзора литературных источников выявить проблемы при механической обработке цилиндрических деталей типа валов и осей и установить пути их решения.
2. Разработать способ ППД на основе реверсивного вращения рабочего инструмента,

позволяющий повысить качество поверхностного слоя деталей машин типа валов и осей за счет повышения напряженного состояния в очаге упруго-пластической деформации.

3. На основе метода конечных элементов (МКЭ) и компьютерного моделирования построить модель реверсивного выглаживания, позволяющую определить влияние основных параметров технологического процесса на напряженное состояние в очаге деформации, температуру поверхностного слоя, остаточные напряжения, внеконтактную деформацию, глубину упрочнения при реверсивном выглаживании.

4. По результатам экспериментальных исследований определить качество цилиндрических деталей, упрочненных реверсивным выглаживанием и с помощью компьютерной программы *Microsoft Visual Studio 2012* определить рациональные параметры процесса реверсивного выглаживания.

5. Оценить эксплуатационные характеристики деталей, упрочненных реверсивным выглаживанием. Разработать технологические рекомендации для получения необходимых характеристик качества поверхностного слоя деталей, упрочненных реверсивным выглаживанием.

**Теоретическая значимость работы** заключается в установлении закономерностей формирования качества поверхностного слоя при интенсификации напряженно-деформированного состояния очага деформации методом реверсивного выглаживания.

**Практическая значимость работы:**

- разработана технология упрочнения реверсивным выглаживанием, обеспечивающая повышение качества цилиндрических деталей типа валов, осей. Определены рациональные режимы обработки для получения минимальной шероховатости поверхности и максимальных механических свойств упрочненного слоя;

- спроектировано и изготовлено устройство для реверсивного выглаживания цилиндрических деталей типа валов, осей. Разработаны новые конструкции других устройств для реверсивного движения рабочего инструмента;

- разработаны технологические рекомендации для внедрения реверсивного выглаживания на производстве.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- новый процесс отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающий повышение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и качество поверхностного слоя цилиндрических деталей типа валов и осей;

- результаты моделирования и численного расчета напряженно-деформированного состояния образцов при разной кинематике ППД;

- экспериментальные результаты при исследовании влияния основных технологических параметров реверсивного выглаживания на качество поверхностного слоя деталей машин;

- оценка эксплуатационных характеристик упрочненных деталей и технологические рекомендации для отделочно-упрочняющей обработки реверсивным выглаживанием.

**Научная новизна работы:**

1. Предложена новая кинематика отделочно-упрочняющей обработки реверсивным круговым вращением рабочего инструмента, обеспечивающая повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей машин типа валов и осей.

2. Разработана конечно-элементная модель процесса реверсивного выглаживания, позволяющая определить напряженно-деформированное состояние в очаге деформации, сжимающие остаточные напряжения поверхностного слоя упрочненных деталей и величину температуры в зоне деформации в зависимости от основных технологических параметров реверсивного выглаживания.

3. На основании экспериментальных исследований и численных расчетов установлено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на качество поверхностного слоя упрочненных деталей. Теоретически обоснована и экспериментально

апробирована технология реверсивного выглаживания, отличающаяся локальным способом нагружения поверхностного слоя, обеспечивающая высокую микротвердость (до  $470 HV_{0,1}$ ) с получением мелкозернистой структуры ( $1,3 \div 1,5$  мкм), при исходном размере зерна ( $38,2 \div 44,7$  мкм) без разрушения поверхностного слоя упрочненных деталей.

4. Установлены корреляционные зависимости между микротвердостью и средними размерами зерен упрочненного поверхностного слоя, между сжимающими остаточными напряжениями и температурой в зоне контакта рабочего инструмента с обрабатываемой поверхностью.

**Методы и оборудование при моделировании и экспериментальных исследованиях.** При разработке конечно-элементного моделирования использована компьютерная программа *ANSYS Workbench 19.2*. Для проведения расчетов, создания графиков и чертежей был задействован программный пакет *Microsoft Excel*, КОМПАС – 3D V11, *Microsoft Visual Studio 2012* и др.

Экспериментальные исследования проведены с использованием современных средств измерения:

- для определения параметров шероховатости и волнистости поверхности упрочненных деталей использован профилометр *Form Talysurf i200* производства компании *Taylor Hobson* с компьютерным управлением;

- для измерения отклонения от круглости обработанных цилиндрических образцов использовали портальную координатно-измерительную машину (КИМ) *CONTURA G2*;

- для определения остаточных напряжений на поверхности упрочненных деталей использован метод на основе шумов Баркгаузена. Измерения проводили с помощью цифрового анализатора шумов Баркгаузена *Rollscan 300*;

- для подготовки металлографических шлифов и определения твердости, микротвердости и микроструктуры упрочненных деталей использованы специальный отрезной станок модели *Labotom-5*, автоматический пресс ПОЛИЛАБ С50А, шлифовально-полированный станок модели *Tegramin-25*, металлографический микроскоп *MET-2*, твердомер *HBRV-187,5* и микротвердомера *HMV-G21*;

- для измерения температуры на цилиндрической поверхности опытных образцов использован тепловизор *FLIR* серии *SC7000*;

- для испытания на изгиб использована универсальная машина двухколонного напольного типа модели 5980 (*INSTRON*).

**Достоверность результатов** обеспечена обоснованным использованием теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью выбранных методов исследования, применением известных численных методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов расчетов с экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертационной работы изложены и обсуждены на семинарах, всероссийских, международных научно-технических конференциях: на Международной научно-практической конференции «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (г. Курск, 01 ноября 2022 г.); на XIII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2022)» (г. Барнаул, 23–25 ноября 2022 г.); в журнале «Современные материалы, техника и технологии» (г. Курск, 2022 г.); на научном семинаре «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющих и виброволновых технологий» (г. Ростов-на-Дону, 28 февраля 2023 г.); на XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, 27 марта 2023 г.); на Всероссийской национальной научно-технической конференции «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Воронеж, 13–14 апреля 2023 г.); на Международной научно-технической конференции «Технологии и техника: Пути инновационного развития» (г. Воронеж, 9 июня 2023 г.); на XI и XII Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до

утилизации)» (г. Иркутск, 2021, 2022 г.).

**Публикации.** Результаты работы отражены в 31 (тридцати одной) публикации. Из них в журналах из рекомендуемого перечня ВАК РФ опубликовано 14 статей, в изданиях, включенных в международную базу *Scopus* – 3 статьи, получены 5 патентов РФ на изобретение.

**Объем и структура работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 157 наименований. Работа содержит 196 страниц машинописного текста, включая 11 таблиц и 98 рисунков; имеется 4 приложения.

### Краткое содержание работы

**Во введении** приведена общая характеристика диссертационной работы: обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методы и оборудование для исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

**В первой главе** проведен анализ влияния способов ППД и их кинематических схем на физико-механические свойства упроченных деталей, который позволил выявить перспективные направления по повышению качества поверхностного слоя деталей машин. Большой вклад в развитие ППД внесли отечественные и зарубежные ученые: В.Ю. Блюменштейн, С.А. Букатый, В.Н. Емельянов, М.М. Жасимов, С.А. Зайдес, А.Н. Исаев, А.В. Киричек, Е.Ю. Кропоткина, В.П. Кузнецов, И.В. Кудрявцев, О.В. Мартыненко, Г.В. Мураткин, Л.Г. Одинцов, А.Е. Пашков, В.Г. Подпоркин, В.А. Прилуцкий, В.Л. Сахненко, В.М. Смелянский, В.П. Смоленцев, Д.Л. Соловьев, А.Г. Сулов, М.А. Тамаркин, Ю.Г. Шнейдер, Н.П. Щапов, *Reza Teimouri, Marcin Grabowski, Sebastian Skoczywiec, Yu Liu, Dongpo Wang, Wenqian Zhang, Xuelin Wang, Liang Tan, Zheng Zhou, Yusuf Kaynak, Nihal Yaman* и многие другие.

Рассмотрены проблемы при механической обработке нежестких цилиндрических деталей и пути повышения их качества. Показано, что в настоящее время разработано достаточно большое количество разнообразных способов ППД для решения конкретных производственных задач, но для упрочнения цилиндрических деталей типа валов и осей малой жесткости возникают проблемы, связанные с обеспечением стабильного качества по длине обработки. Проблема заключается в том, что для обеспечения необходимого качества поверхностного слоя требуется приложить к рабочему инструменту деформирующую силу, которая совместна с центробежными силами, возникающими при вращении заготовки, вызывают ее искривление, что не позволяет получить стабильные механические свойства по длине изделия. Для снижения искривления заготовки можно снизить частоту ее вращения или уменьшить радиальный натяг инструмента, но при этом невозможно получить заданные характеристики качества поверхностного слоя либо избежать снижения производительности обработки. В этой связи возникает задача по интенсификации напряженного состояния в очаге упруго-пластической деформации процесса ППД без увеличения радиального натяга.

В заключение первой главы сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследования, необходимые для ее достижения.

**Во второй главе** представлена кинематическая схема реверсивного выглаживания и изложены результаты конечно-элементного моделирования ППД с разной кинематикой рабочего инструмента. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, остаточных напряжений и глубины упрочнения в поверхностном слое в зависимости от основных параметров реверсивного выглаживания и геометрии рабочего инструмента.

Схема реверсивного выглаживания цилиндрической заготовки представлена на рис. 1, где показана конструкция деформирующего элемента, его рабочая зона и конечно-элементная модель реверсивного выглаживания.

Особенность данного способа заключается в том, что деформирующий элемент выполнен в виде двухрадиусного ролика, вершины которого располагаются относительно друг друга на некотором расстоянии  $l$ , при этом ось вращения деформирующего элемента расположена параллельно оси заготовки, а рабочему инструменту (РИ) сообщают реверсивное вращение с круговой амплитудой угла  $\alpha_p$  относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющую два ролика деформирующего элемента и перпендикулярную оси заготовки (см. рис. 1).

Для численного расчета напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при обработке деталей реверсивным выглаживанием и определения влияния основных параметров данного способа упрочнения на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей была построена конечно-элементная модель в виде цилиндра и двухрадиусного ролика в программе *Ansys Workbench 19.2* (см. рис. 1, з).

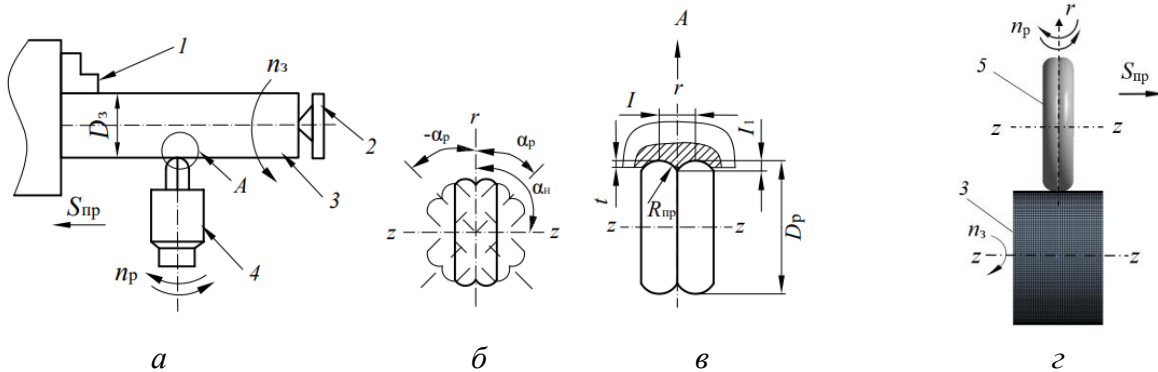


Рисунок 1 – Схема реверсивного выглаживания двухрадиусным роликом (а), схема реверсивного вращения рабочего инструмента (б), рабочей зоны (в) и конечно-элементная модель процесса упрочнения (з): 1 – трехкулачковый патрон; 2 – задняя бабка; 3 – заготовка; 4 – рабочий инструмент; 5 – двухрадиусный ролик

Для оценки эффективности предлагаемого способа ППД предварительно было рассмотрено несколько схем локального нагружения тороидального ролика на цилиндрическую поверхность (рис. 2)

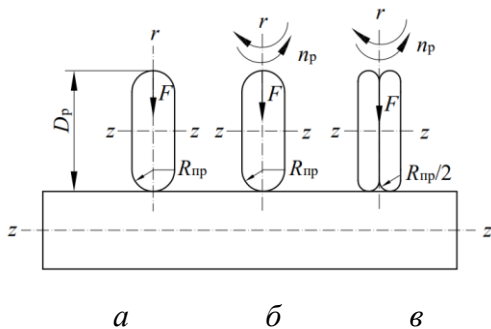


Рисунок 2 – Кинематические схемы нагружения тороидального ролика при разных условиях контакта с цилиндрической поверхностью: а – ролик без вращения; б – однорадиусный ролик с реверсивным вращением относительно оси  $r$ ; в – двухрадиусный ролик с реверсивным вращением относительно оси  $r$ ;

Для проведения расчетов по определению НДС процессов нагружения приняты следующие условия и режимы обработки: тип индентора – одно-и двухрадиусный ролик диаметром  $D = 30$  мм с приведенным радиусом  $R_{np} = 5$  мм и (считаются абсолютно жесткими); модуль упругости  $E = 6 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; величина радиального натяга  $t = 0,1$  мм; частота реверса одно-и двухрадиусного ролика  $n_p = 300$  дв. ход/мин; коэффициент трения в зоне контакта рабочего инструмента с цилиндром  $f = 0,1$ ; амплитуда угла реверсивного вращения  $\alpha = \pm 15^\circ$ .

Характеристики заготовки: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром 30 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  $\sigma_b = 600$  МПа).

Для оценки напряженного состояния в разных точках цилиндрической заготовки с

учетом главных компонент тензора напряжений определена интенсивность временных и остаточных напряжений. При этом, интенсивность остаточных напряжений ( $\sigma_i^{\text{ост}}$ ) определяется как

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

где  $\sigma_z^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_r^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_\varphi^{\text{ост}}$  – главные компоненты остаточных напряжений, действующих по осям  $Oz$ ,  $Or$ ,  $O\varphi$ .

По аналогичной формуле определена и интенсивность временных напряжений ( $\sigma_i^{\text{вр}}$ ).

На рис. 3 представлено влияние кинематики тороидального ролика на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений.

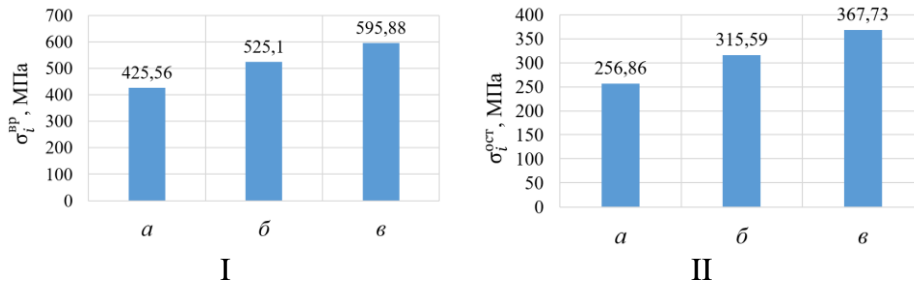


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности максимальных временных (I) и остаточных напряжений (II) от разной кинематики тороидального ролика (см. рис. 2)

Как видно из рис. 3, новая кинематика деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности оказывает существенное влияние на повышение интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений. В работе установлено, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значение интенсивности максимальных временных напряжений более чем на 40 % выше по сравнению со значением интенсивности максимальных временных напряжений при статическом скольжении ролика, а интенсивность максимальных остаточных напряжений больше на 43 %.

Изменение во времени компонент тензора временных напряжений  $\sigma_r^{\text{вр}}$ ,  $\sigma_\varphi^{\text{вр}}$ ,  $\sigma_z^{\text{вр}}$  при разных схемах нагружения тороидального ролика представлено на рис. 4.

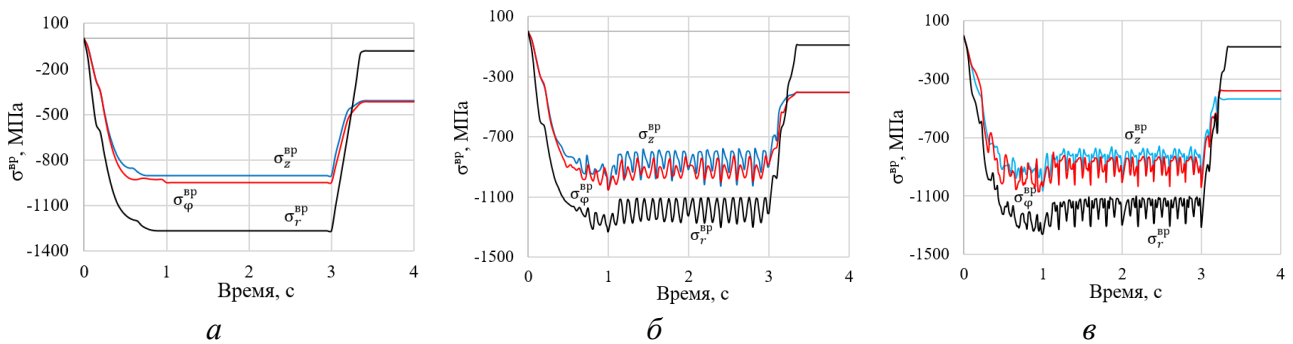


Рисунок 4 – Изменение во времени компонент тензора временных напряжений  $\sigma_r^{\text{вр}}$ ,  $\sigma_\varphi^{\text{вр}}$ ,  $\sigma_z^{\text{вр}}$  при разных схемах нагружения (см. рис. 3)

Анализ компонент тензора временных напряжений в зоне рабочего контакта (см. рис. 4), показывает, что при реверсивном вращении рабочего инструмента кривая пластического деформирования имеет пульсирующий характер, а при статическом воздействии рабочего инструмента эти зависимости представляют собой плавные кривые. Реверсивное вращение двухрадиусного ролика (см. рис. 2, в) характеризуется более пульсирующей кривой интенсивности напряжений. Это объясняется тем, что пластические отпечатки на поверхности детали от воздействия тороидального ролика имеют форму эллипса, который, поворачиваясь циклически, изменяет направление главных осей.



В работе представлены результаты исследования влияния основных технологических параметров реверсивного выглаживания и геометрии РИ на напряженное состояние в очаге упругопластической деформации, остаточные напряжения и глубину пластического слоя в упрочненных деталях.

На рис. 5 показана зависимость интенсивности временных ( $\sigma_i^{BP}$ ), остаточных ( $\sigma_i^{ост}$ ) напряжений от продольной подачи ( $a$ ), частоты вращения заготовки ( $\bar{\omega}$ ) и величины радиального натяга ( $\epsilon$ ).

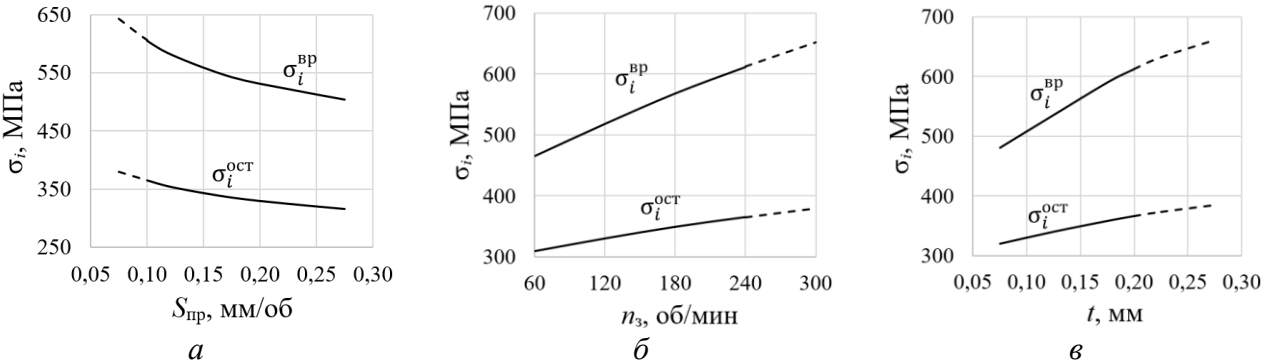


Рисунок 5 – Влияние продольной подачи ( $a$ ), частоты вращения заготовки ( $\bar{\omega}$ ) и величины радиального натяга ( $\epsilon$ ) на интенсивность максимальных временных ( $\sigma_i^{BP}$ ) и остаточных ( $\sigma_i^{ост}$ ) напряжений

Из рис. 5 следует, что при уменьшении продольной подачи ролика от 0,28 до 0,07 мм/об значения интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений увеличиваются, соответственно на 21,8 % и 17,1 %. Следует отметить, что при  $S_{пр} < 0,1$  мм/об возможно появление перенаклепа, который происходит за счет многократного нагружения обрабатываемых зон заготовки. При увеличении частоты вращения заготовки от 60 до 240 об/мин значения интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений увеличиваются соответственно на 28,6 % и 15,3 %. С увеличением величины радиального натяга от 0,07 до 0,20 мм максимальные значения интенсивности временных и остаточных напряжений увеличиваются на 21,5 % и 12,5 %. При натяге  $t \geq 0,20$  мм наблюдается весьма существенный рост интенсивности временных напряжений, значение которых намного больше предела прочности материала заготовки ( $\sigma_B = 600$  МПа), и формируются большие остаточные напряжения сжатия, превышающие предел текучести материала ( $\sigma_T = 360$  МПа). Формирование таких напряжений при большой величине радиального натяга в процессе упрочнения является недопустимым, так как происходит значительное повреждение и разрушение поверхностного слоя деталей машин.

На рис. 6 показано влияние профильного радиуса ( $a$ ), диаметра ролика ( $\bar{b}$ ) и реверсивной частоты его вращения ( $\epsilon$ ) на максимальную интенсивность временных и остаточных напряжений.

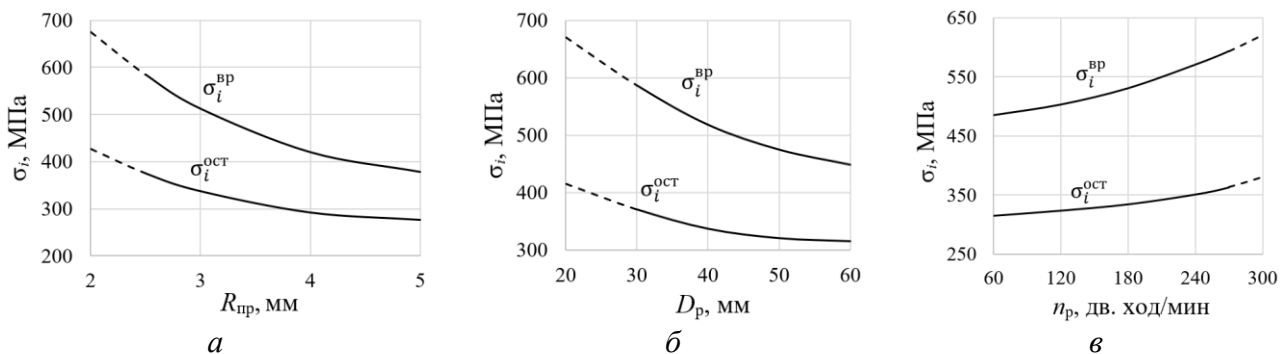


Рисунок 6 – Влияние профильного радиуса ( $a$ ), диаметра ролика ( $\bar{b}$ ) и реверсивной частоты вращения ролика ( $\epsilon$ ) на интенсивность временных и остаточных напряжений

Из рис. 6 следует, что чем меньше профильный радиус и диаметр ролика, тем выше интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений. При уменьшении профильного радиуса ролика от 5 до 2 мм значения интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений увеличиваются соответственно в 1,78 и 1,54 раза. А уменьшение диаметра ролика от 60 до 20 мм приводит к увеличению значения интенсивности временных и остаточных напряжений в 1,49 и 1,32 раза соответственно. При увеличении реверсивной частоты вращения ролика от 60 до 300 об./мин значения интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений увеличиваются соответственно на 21,7 и 17,2 %.

В работе установлено, что физико-механические свойства обрабатываемого материала заготовки значительно влияют на напряженно-деформирующее состояние поверхностного слоя цилиндрических образцов при реверсивном выглаживании. Максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений наблюдаются у металлов, имеющих более высокий предел текучести (конструкционная среднелегированная сталь 30ХГСА и титановый сплав ВТ6). Установлено, что чем выше предел текучести материала, тем больше интенсивность временных и остаточных напряжений. Следует отметить, что при одинаковых условиях упрочнения чем меньше предел текучести материала, тем выше глубина пластической деформации. Максимальная глубина пластической деформации возникает при упрочнении нержавеющей стали 08Х18Н10, а минимальная – при обработке титанового сплава ВТ6.

При реверсивном выглаживании, как и при других способах ППД, возникает внеконтактная деформация. Следует отметить, что под воздействием двухрадиусного ролика упругопластические волны, образующиеся в результате реверсивного выглаживания, обладают характерной конфигурацией. В направлении главного движения вокруг рабочего инструмента создаются упругопластические волны, обладающие практически одинаковой формой и размерами. При этом в направлении продольной подачи упругопластические волны, образующиеся в зоне обработанной и необработанной поверхностей, имеют разные геометрии и отличаются от упругопластических волн в направлении главного движения большими размерами высоты  $h_1$  и длины  $l_1$ . Это объясняется не только наличием продольной подачи, но и ориентацией РИ при ППД.

На рис. 7 показаны зависимости размеров упругопластических волн от величины радиального натяга.

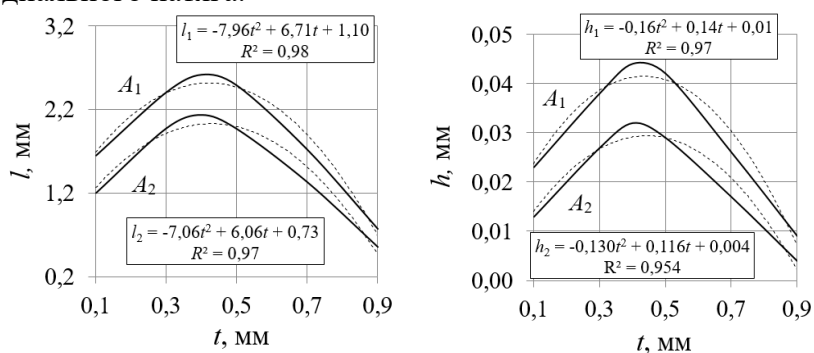


Рисунок 7 – Влияние величины радиального натяга на размер упругопластических волн:  $A_1$  – в направлении продольной подачи;  $A_2$  – в направлении главного движения

Из рис. 7 наглядно видно, что при всех значениях величины радиального натяга ( $t$ ) упругопластическая волна, образующаяся в направлении продольной подачи, имеет большую длину и высоту, чем в направлении главного движения по следующим соотношениям:  $l_1 = (1,2 \div 1,4)l_2$ ;  $h_1 = (1,6 \div 1,8)h_2$ . С увеличением величины радиального натяга ( $t = 0,1 \div 0,4$  мм) линейные размеры упругопластических волн увеличиваются благодаря непрерывному накоплению деформации с повышением напряженного состояния поверхностного слоя, при этом запас пластичности металла постепенно снижается. При  $t = 0,4$  мм линейные размеры упругопластических волн достигают максимального значения. С дальнейшим увеличением величины натяга ( $t$ ) размеры упругопластической волны снижаются.

В направлении продольной подачи с увеличением размеров упругопластической вол-

ны значения максимальной интенсивности временных напряжений в вершине волны возрастают. Расчеты коэффициента корреляции показали достаточно высокую прямую зависимость  $\sigma_{вр}^i$  от размеров упругопластической волны. Коэффициент достоверности аппроксимации, устанавливающий связь максимальной интенсивности напряжений с высотой упругопластической волны, составил 0,96, а с ее длиной – 0,91. Интенсивность временных напряжений в вершине волны достигает максимального значения при  $l = 2,62$  мм и  $h = 0,045$  мм (при  $t = 0,4$  мм).

При реверсивном выглаживании максимальная величина пластической деформации достигает своего значения в поверхностном слое деталей. В слое толщиной  $h > 1,85$  мм величина пластической деформации близка к нулю. Таким образом, зона пластической деформации при нагружении двухрадиусным роликом с принятыми режимами обработки находится в интервале  $0 \leq h \leq 1,85$  мм.

В процессе пластической деформации тонкого поверхностного слоя совершается работа и выделяется тепло, которое при определенных значениях может отрицательно влиять на физико-механические свойства материала. На рис. 8 показано влияние величины радиального натяга на максимальную температуру в очаге деформации (а) и зависимость максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений от величины максимальной температуры при реверсивном выглаживании (б).

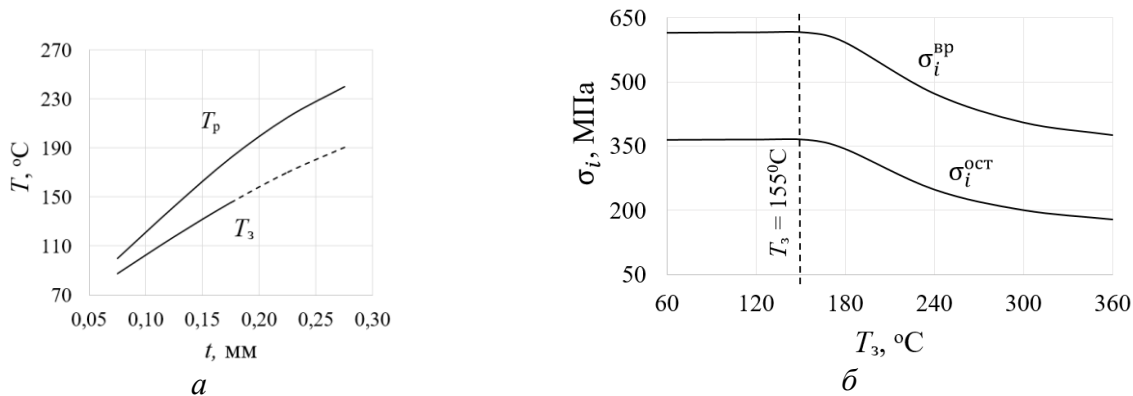


Рисунок 8 – Влияние величины радиального натяга на максимальную температуру в очаге деформации (а) и зависимость максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений от величины максимальной температуры при реверсивном выглаживании (б):  $T_p$  – максимальная температура в очаге деформации рабочего инструмента;  $T_3$  – максимальная температура в очаге деформации заготовки

Из рис. 8, видно, что радиальный натяг значительно влияет на формировании максимальной температуры в очаге деформации рабочего инструмента с заготовкой. При увеличении радиального натяга от 0,07 до 0,28 мм максимальная температура в очаге деформации повышается от 110 °С до 242 °С в заготовке и от 144 °С до 322 °С в рабочем инструменте. Увеличение радиального натяга приводит к повышению площади контакта рабочей части инструмента с заготовкой, повышается сила трения, радиальное давление и, следовательно, тепловыделение будет выше. С увеличением радиального натяга от 0,07 до 0,28 мм максимальная температура в очаге деформации заготовки увеличивается в 2,2 раза, а в РИ – в 2,4 раза. При радиальном натяге  $t > 0,18$  мм наблюдается весьма существенный рост максимальной температуры в очаге деформации заготовки ( $T_3 > 155$  °С). Формирование температуры такой величины в процессе упрочнения является недопустимым, так как это приводит к снижению физико-механических свойств материала. При этом особенно уменьшается твердость, прочность деталей машин, рабочий инструмент быстрее изнашивается, в результате сокращается и время его использования в технологической операции. Следует отметить, что при температуре в очаге деформации до 155 °С интенсивность временных и остаточных напряжений практически не изменяется. При дальнейшем увеличении температуры от 155 °С и

выше интенсивность временных и остаточных напряжений начинает снижаться (см. рис. 8, б). Результаты экспериментального исследования показали, что величина сжимающих остаточных напряжений достигает своего максимального значения при величине радиального натяга  $t = 0,28$  мм, при этом температура на поверхности детали составляет  $120^{\circ}\div 123$  °С. При дальнейшем увеличении величины радиального натяга максимальная температура поверхности детали повышается, а величина остаточных напряжений начинает снижаться, т. к. возникает перенаклеп и шелушение материала.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований по оценке важнейших показателей качества поверхностного слоя упрочненных деталей в зависимости от основных технологических параметров реверсивного выглаживания.

Экспериментальные исследования проведены на токарном станке 1К62, где вместо верхней части суппорта устанавливается устройство для создания реверсивного кругового движения двухрадиусного ролика (рис. 9).

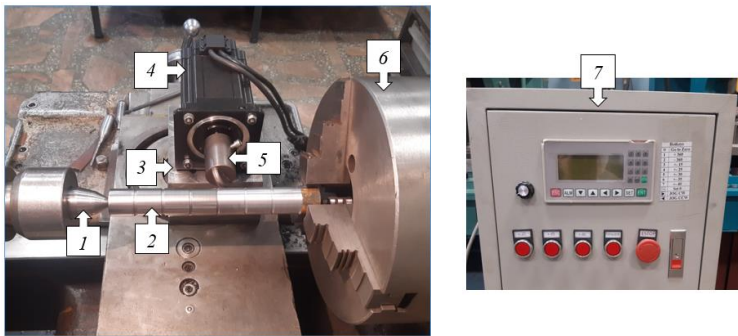


Рисунок 9 – Общий вид устройства для реверсивного выглаживания наружных поверхностей цилиндрических деталей на токарном станке: 1 – задний центр; 2 – обрабатываемый образец; 3 – основание; 4 – шаговый электродвигатель; 5 – рабочий инструмент; 6 – трехкулачковый патрон; 7 – панель управления параметрами движения рабочего инструмента

Геометрические характеристики рабочего инструмента: диаметр рабочего ролика  $D_p = 30$  мм; профильный радиус  $R_{пр} = 2,5$  мм; расстояние между вершинами рабочего ролика  $I = 1,5$  мм; материал – инструментальная сталь SKD-11 (аналоги X12M, X12MФ, X12Ф1). В качестве технологической смазки использовано индустриальное масло И-40А.

Базовые режимы обработки, которые определены по результатам моделирования и предварительного упрочнения реверсивным выглаживанием, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Базовые режимы реверсивного выглаживания

$S_{пр}$ (мм/об)	$n_z$ (об/мин)	$t$ (мм)	$\alpha_n$ (град)	$\alpha_p$ (град)	$n_p$ (дв. ход/мин)
0,07	100	0,07	90	$\pm 15$	120

**Шероховатость поверхности.** На рис. 10 представлено влияние величины радиального натяга на параметры шероховатости упрочненных деталей при реверсивном выглаживании. Наименьшая шероховатость поверхности после реверсивного выглаживания обеспечивается при величине радиального натяга  $t = 0,07\div 0,08$  мм, при этом параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  снижаются в 4,5÷8,3 раза, а шаговый параметр  $S_m$  в 2,1 раза по сравнению с исходной шероховатостью. Небольшая величина радиального натяга ( $t = 0,05$  мм) приводит к неполному деформированию микронеровностей, при этом требуемое удельное давление для полного сглаживания микронеровностей недостаточно и слишком маленький радиальный натяг приводит к скольжению РИ по обрабатываемой поверхности заготовки и происходит прерывистое деформирование, что приводит к незначительному снижению исходной шероховатости поверхности. При большой величине радиального натяга ( $t \geq 0,15$  мм) наблюдается резкий рост удельного давления в очаге деформации, шероховатость при этом растет и возможен перенаклеп, который обычно проявляется в шелушении поверхности и отслаивании частиц металла. Следует отметить, что большая величина радиального натяга приводит к увеличению вибрации в процессе ППД, которая увеличивает шероховатость поверхности.

Кроме величины радиального натяга экспериментальные результаты показали, что основные параметры реверсивного выглаживания значительно влияют на шероховатость поверхности деталей. При этом уменьшение продольной подачи, частоты вращения заготовки и реверсивной частоты вращения РИ высотные параметры шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  уменьшаются в среднем в 4 раза, а шаговой параметр  $Sm$  уменьшается в среднем в 2 раза.

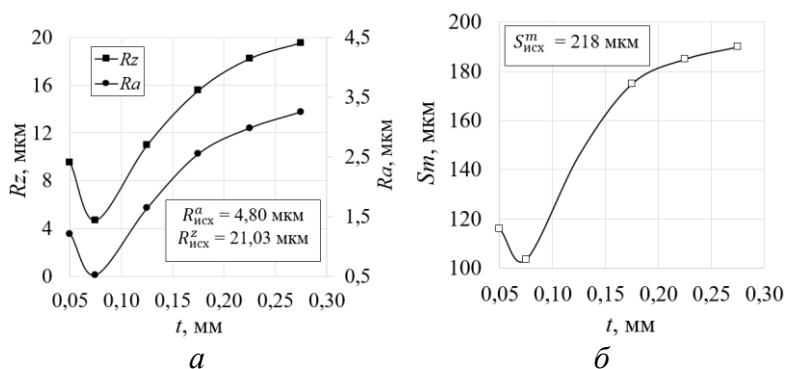


Рисунок 10 – Влияние радиального натяга на параметры шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  (а) и  $Sm$  (б) при упрочнении деталей реверсивным выглаживанием

**Остаточные напряжения.** На рис. 11 представлены экспериментальные и расчетные значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов от основных параметров реверсивного выглаживания. Для измерения остаточных напряжений на поверхности упрочненных деталей использован метод на основе шумов Баркгаузена.

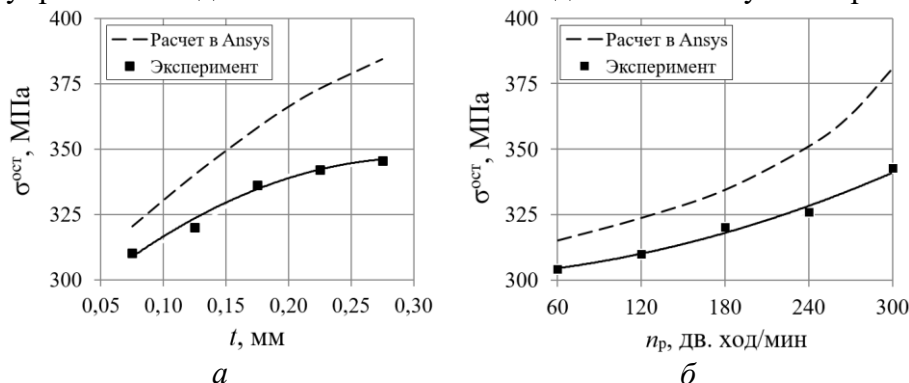


Рисунок 11 – Зависимость сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали при реверсивном выглаживании от величины радиального натяга (а) и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента (б)

Значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов возрастают при увеличении величины радиального натяга и реверсивной частоты вращения РИ. Увеличение величины радиального натяга от 0,07 до 0,28 мм и реверсивной частоты вращения РИ от 60 до 300 дв. ход/мин приводит к увеличению сжимающих остаточных напряжений на 10,2 % и 11,2 % соответственно. Установлено, что характер изменения сжимающих остаточных напряжений в зависимости от реверсивных параметров упрочнения, полученный при экспериментальном определении, практически согласуется с результатами, полученными при моделировании. Расхождение при сопоставлении результатов не превышает 15 %. Кроме того, уменьшение продольной подачи, увеличение частоты вращения заготовки, начального угла установки и амплитуды угла реверсивного вращения РИ экспериментальные значения сжимающих остаточных напряжений увеличиваются в среднем на 25 %.

**Микротвердость упрочненного слоя.** На рис. 12 показана схема распределения средних значений микротвердости образца (а) и микротвердости по сечению детали (б), упрочненной реверсивным выглаживанием при базовых режимах обработки. Анализируя схему распределения микротвердости (см. рис. 12, а), можно отметить, что при реверсивном выглаживании можно выделить наличие следующих трех деформированных областей:

- интенсивно деформированный слой, глубиной от 140 до 150 мкм, для которого характерны высокие значения микротвердости от 450 до 470  $HV$ ;
- деформированный слой, глубиной от 600 до 630 мкм, для которого значения микротвердости варьируются в пределах от 360 до 430  $HV$ ;

– переходный слой между деформированным и исходным состоянием глубиной до 1300 мкм, для которого значения микротвердости варьируются в пределах от 225 до 350 HV.

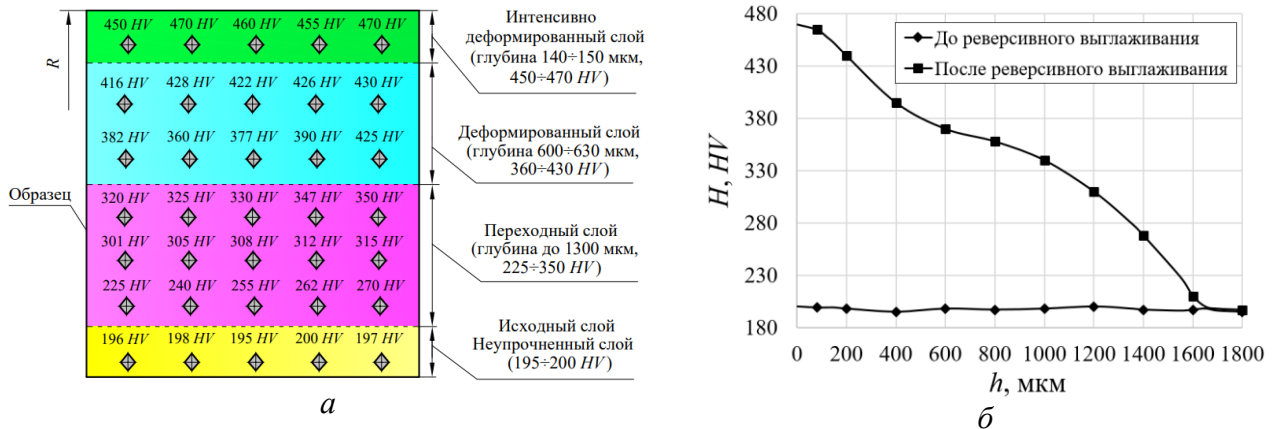


Рисунок 12 – Схема распределения микротвердости (а) и зависимость микротвердости от глубины поверхностного слоя (б) при реверсивном выглаживании (при базовых режимах обработки)

На рис. 13 представлена зависимость микротвердости поверхностного слоя детали от основных параметров реверсивного выглаживания (измерение микротвердости в интенсивно деформированном слое). Уменьшение продольной подачи от 0,28 до 0,08 мм/об, рост величины радиального натяга от 0,08 до 0,28 мм и реверсивной частоты вращения РИ от 60 до 300 дв. ход/мин приводит к повышению микротвердости поверхностного слоя детали на 13,0 %, 30,9 % и 31,8 % соответственно. Кроме того, увеличение частоты вращения заготовки, начального угла установки и амплитуды угла реверсивного вращения РИ экспериментальные значения микротвердости увеличиваются в среднем на 26 %. Экспериментальными исследованиями установлено, что реверсивное выглаживание обеспечивает повышение микротвердости в 2 раза по сравнению с исходной микротвердостью заготовки, что приводит к значительному упрочнению поверхностного слоя детали.

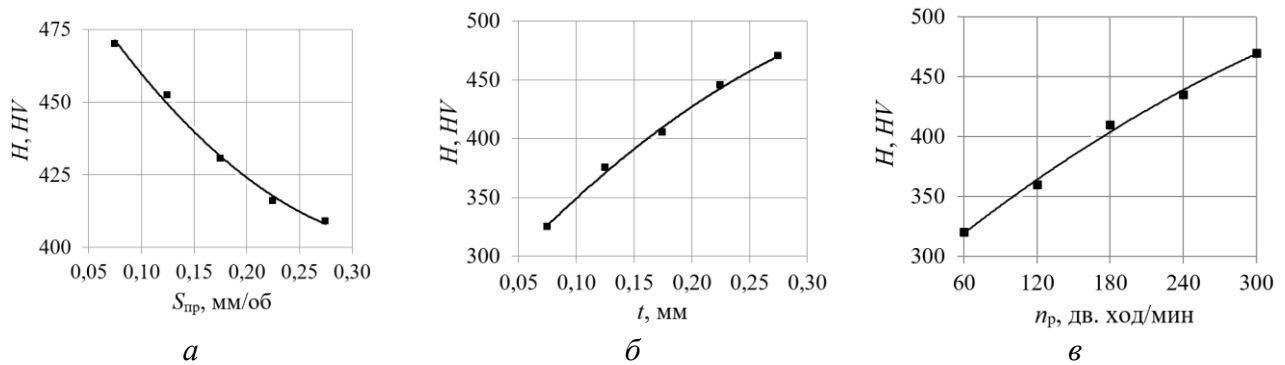


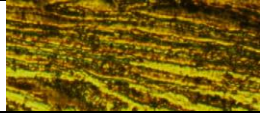
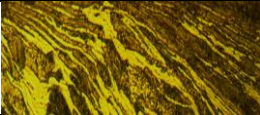
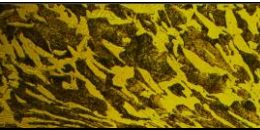
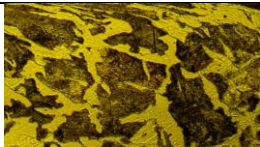
Рисунок 13 – Зависимость микротвердости поверхностного слоя детали при реверсивном выглаживании от продольной подачи (а), величины радиального натяга (б) и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента (в)

**Микроструктуры упрочненного слоя.** В табл. 2 показаны микроструктуры поверхностного слоя упрочненных деталей до и после реверсивного выглаживания (при базовых режимах упрочнения) при увеличении в 500 крат. Результаты измерения зерен с помощью металлографического микроскопа MET-2: средний размер зерен ( $L_{ср}$ ) в образце до упрочнения на глубине около 1,7 мм составляет около 41,5 мкм, границы зерен достаточно четко выражены. Из табл. 2 следует, что в зоне интенсивного деформирования А (ширина 140÷150 мкм) зерна непосредственно подвергаются измельчению и дроблению в результате механи-



ческого воздействия и обладают более мелкозернистым и тонким строением, при этом средний размер зерен составляет около 1,4 мкм. На глубине более 150 мкм от поверхности расположен деформированный слой Б (ширина 460÷480 мкм), в котором зерна также имеют вытянутую форму, но несколько больших размеров, чем в интенсивно деформированном слое. Средний размер зерен в данной области составил около 9,4 мкм. Далее на глубине более 630 мкм от поверхности расположен переходной слой В между деформированным и исходным состоянием (ширина около 670 мкм), в котором можно наблюдать зерна увеличенных размеров. Средний размер зерен на данном участке составил около 27,2 мкм.

Таблица 2 – Микроструктура поверхностного слоя упрочненных деталей до и после реверсивного выглаживания (x 500 крат)

Название слоя	Вид микроструктуры
Интенсивно деформированный слой А (x 1000 крат) (глубина 140÷150 мкм)	
$L_{cp}$ (мкм)	~ 1,4
Деформированный слой Б (глубина 600÷630 мкм)	
$L_{cp}$ (мкм)	~ 9,4
Переходной слой В (глубина около 1300 мкм)	
$L_{cp}$ (мкм)	~ 27,2
Исходный слой (исходное состояние)	
$L_{cp}$ (мкм)	~ 41,5

В четвертой главе изложены результаты экспериментального исследования износостойкости, коррозионной стойкости, изгибной жесткости упрочненных деталей и определение рациональных режимов для реализации реверсивного выглаживания.

На рис. 14 представлено влияние способов ППД на коррозионно-механический износ упрочненных деталей. Экспериментальными исследованиями установлено, что способы ППД оказывают значительное влияние на износостойкость образцов, при этом максимальная износостойкость наблюдается у деталей, упрочненных реверсивным выглаживанием, а минимальная – у неупрочненных деталей. Из рис. 14 следует, что по сравнению с износостойкостью неупрочненных образцов после обкатывания тороидальным роликом, обкатки вращающимся двухрадиусным роликом и реверсивного выглаживания износостойкость деталей повышается в 2,5; 3,1 и 4,0 раза соответственно.

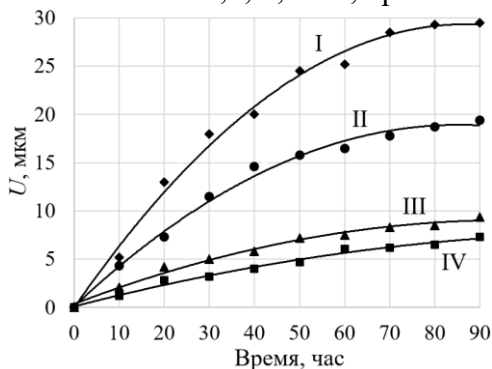


Рисунок 14 – Влияние способов ППД на износостойкость упрочненных деталей: I – неупрочненный образец; II – обкатывание тороидальным роликом; III – обкатка вращающимся двухрадиусным роликом; IV – реверсивное выглаживание

Исследуя коррозионную стойкость упрочненных деталей установлено, что среди способов ППД наименьшая скорость коррозии обеспечивается при реверсивном выглаживании, при этом по сравнению с скоростью коррозии неупрочненного образца после обкатывания тороидальным роликом, обкатки вращающимся двухрадиусным роликом и реверсивного выглаживания скорость коррозии поверхности упрочненных деталей понижается примерно на 34 %; 51 % и 64 % соответственно.

На рис. 15 представлены результаты испытания на изгибную жесткость образцов, упрочненных обкаткой тороидальным роликом и реверсивным выглаживанием. Способность материала сопротивляться изгибной деформации обеспечивается в большей мере при упрочнении реверсивным выглаживанием. По сравнению с неупрочненным металлом и обкатыванием тороидальным роликом реверсивное выглаживание позволяет повысить изгибную жесткость в среднем на 67,5 % и 47,5 % соответственно. Результаты натурных испытаний убедительно подтверждают эффективность применения реверсивного выглаживания при обработке деталей машин типа валов и осей.

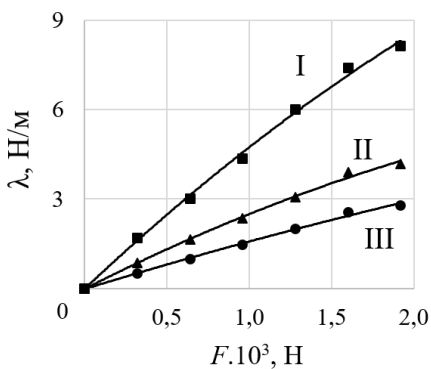


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента механической жесткости ( $\lambda$ ) от способов поверхностного пластического деформирования: I – неупрочненный металл; II – обкатывание тороидальным роликом; III – реверсивное выглаживание

Определение рациональных режимов процесса реверсивного выглаживания, обеспечивающих получение наилучших показателей качества деталей машин, представляет значительный практический интерес. Результаты обработки измерений показателей качества деталей машин выполнены в программе *Microsoft Visual Studio 2012* путем программирования на языке *Python* с выявлением рациональных параметров реверсивного выглаживания. Для снижения геометрических показателей поверхности упрочненных деталей (шероховатость, волнистость и отклонение от круглости) необходимо устанавливать следующие режимы упрочнения:  $S_{\text{пр}} = 0,07 \div 0,10$  мм/об;  $n_p = 60 \div 100$  об/мин;  $t = 0,08 \div 0,10$  мм;  $n_p = 115 \div 120$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 10^\circ \div \pm 20^\circ$ . Для повышения сжимающих остаточных напряжений и механических свойств поверхностного слоя деталей необходимо назначать следующие режимы упрочнения:  $S_{\text{пр}} = 0,07 \div 0,10$  мм/об;  $n_p = 280 \div 300$  об/мин;  $t = 0,25 \div 0,28$  мм;  $n_p = 290 \div 300$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 55^\circ \div \pm 60^\circ$ . По полученным научно-техническим результатам исследования были разработаны технологические рекомендации для применения предлагаемого способа реверсивного выглаживания на производстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По завершению проведенных исследований в диссертационной работе получены следующие научно-практические результаты:

1. Предложен новый способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения при использовании деформирующего инструмента с реверсивной круговой кинематикой рабочего движения, обеспечивающий увеличение значений механических характеристик упрочненного слоя с повышением интенсивности напряженного состояния в очаге деформации и остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое деталей машин. Способ защищен патентом РФ (№ 2758713).



2. На основе метода конечных элементов с использованием программы *ANSYS* разработана расчетная динамическая модель процесса ППД для разной кинематики рабочего инструмента. Результаты исследования показали, что основные технологические параметры реверсивного выглаживания оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации, сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое и глубину пластической деформации цилиндрических деталей. Для интенсификации напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя определены рациональные режимы обработки реверсивным выглаживанием: продольная подача ролика  $0,10 \div 0,15$  мм/об, частота вращения заготовки  $180 \div 240$  об/мин и величина радиального натяга  $0,15 \div 0,20$  мм, реверсивная частота вращения рабочего инструмента  $250 \div 270$  дв. ход/мин, амплитуда угла реверсивного вращения рабочего инструмента  $\pm 50^\circ \div \pm 55^\circ$  и с начальным углом установки рабочего инструмента  $90^\circ$ .

3. Геометрия рабочего инструмента оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние и глубину пластической деформации цилиндрических деталей при реверсивном выглаживании. Для интенсификации напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя рекомендуется использовать двухрадиусный тороидальный ролик диаметром  $25 \div 30$  мм, с профилем радиусом  $2,5 \div 3$  мм и расстоянием между вершинами двухрадиусного ролика около 2 мм.

4. На основе компьютерного моделирования установлено критическое значение температуры в очаге деформации для деталей из стали 45 (при данных условиях обработки  $T_{кр} = 155$  °С), превышение которой приводит к снижению максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений. При реверсивном выглаживании и использовании технологической смазки, температура на поверхности детали при упрочнении варьируется от  $42$  °С до  $123$  °С.

5. Экспериментальными результатами установлено, что после реверсивного выглаживания в поверхностном слое деталей формируются достаточно большие сжимающие остаточные напряжения ( $\sigma^{ост} \sim 340 \div 345$  МПа) по сравнению с другими способами ППД. Полученные положительные результаты подтверждают техническую идею по повышению напряженного состояния в очаге деформации за счет усложнения кинематики процесса упрочнения.

6. Реверсивное выглаживание способствует повышению не только микротвердости, но и глубины наклепа поверхностного слоя цилиндрических деталей, при этом твердость и микротвердость деталей повышаются в среднем на 12 % и 45 % по сравнению с величиной исходной твердости и микротвердости. Глубина наклепа поверхностного слоя детали достигает величины около 1,65 мм, и при изменении режимов реверсивного выглаживания степень упрочнения поверхностного слоя детали варьируется в интервале  $55 \div 80$  %.

7. Способ реверсивного выглаживания значительно снижает микрогеометрические параметры поверхности цилиндрических деталей, при этом параметры шероховатости  $Ra$  и  $Rz$  уменьшаются в 8,3 и 4,4 раза, высота  $Wz$  и шаг  $Sw$  неровности поверхности уменьшаются на 64 % и 47 %, соответственно отклонение от круглости поверхности деталей снижается в 3,6 раза.

8. При реверсивном выглаживании формируются зерна в интенсивно деформированном поверхностном слое, которые в  $25 \div 35$  раз меньше зерен в недеформированном металле. Экспериментальные результаты показывают, что размеры зерен и микротвердость достаточно тесно связаны между собой (коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,98$ ).

9. По результатам множественной регрессии определены рациональные режимы реверсивного выглаживания, обеспечивающие наилучшие показатели качества поверхности деталей. Для снижения микрогеометрических показателей поверхности упрочненных деталей (шероховатость, волнистость и отклонение от круглости) установлены следующие режимы упрочнения:  $S_{пр} = 0,07 \div 0,10$  мм/об;  $n_p = 60 \div 100$  об/мин;  $t = 0,08 \div 0,10$  мм;  $n_p = 115 \div 120$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 10^\circ \div \pm 20^\circ$ . Для повышения сжимающих остаточных напряжений

и механических свойств поверхностного слоя деталей рекомендуются следующие режимы упрочнения:  $S_{пр} = 0,07 \div 0,10$  мм/об;  $n_p = 280 \div 300$  об/мин;  $t = 0,28 \div 0,30$  мм;  $n_p = 290 \div 300$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 55^\circ \div \pm 60^\circ$ .

10. В результате экспериментальных исследований эксплуатационных показателей деталей, упрочненных реверсивным выглаживанием, установлено, что по сравнению с обкаткой тороидальным роликом износостойкость повышается в 3,1 раза, скорость коррозии снижается на 47 %, изгибная жесткость повышается на 47,5 %. Экспериментальные результаты показывают, что высотные показатели шероховатости и скорость коррозии достаточно тесно связаны между собой (коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,99$ ).

#### ***Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы***

Полученные научно-технические результаты диссертационной работы в дальнейшем могут быть использованы в качестве основы для разработки новой конструкции деформирующего инструмента, обеспечивающего более эффективное сглаживание микронеровностей цилиндрических деталей, а также для разработки режущего инструмента на основе реверсивного вращения.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### ***Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ***

1. Зайдес, С.А. Влияние кинематики тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 6 (132). – С. 12–21.
2. Зайдес, С.А. Влияние кинематики тороидального инструмента на остаточное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 7 (748). – С. 33–41.
3. Зайдес, С.А. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании деталей машин / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. № 7 (211). – С. 320–327.
4. Зайдес, С.А. Влияние начальной ориентации рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Технология металлов. – 2022. – № 12. – С. 11–20.
5. Зайдес, С.А. Оценка влияния кинематических параметров рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, И.Н. Рыжиков, **Нгуен Хыу Хай** // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2023. – № 2. – С. 23–32.
6. Зайдес, С.А. Влияние основных параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 3 (55). – С. 7–15.
7. Зайдес, С.А. Влияние кинематики тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние при поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Металлообработка. – 2022. – № 2 (128). – С. 40–48.
8. Зайдес, С.А. Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // *iPolytech Journal*. – 2022. – Т. 26. № 4. – С. 580–592.
9. Зайдес, С.А. Определение температуры в очаге деформации при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Вестник машиностроения. – 2023. – № 8. – С. 658–662.
10. Зайдес, С.А. Оценка геометрических параметров отпечатка и давления в зоне контакта рабочего инструмента при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. –

2023. – № 3 (756). – С. 34–45.

11. Зайдес, С.А. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на шероховатость упроченных деталей / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19. № 1. – С. 120–130.

12. Зайдес, С.А. Влияние геометрии инструмента на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102. № 7. – С. 580–585.

13. Зайдес, С.А. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на параметры волнистости цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 4 (142). – С. 37–48.

14. Зайдес, С.А. Механические свойства упроченного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 19. № 7 (223). – С. 304–311.

***Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих  
в международную реферативную базу данных Scopus***

15. Zaides, S.A. Non-contact deformation with reversible surface plastic deformation / S.A. Zaides, **Nguyen Huu Hai** // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2023. – No. 3. – P. 63–74.

16. Zaides, S.A. Deviation from Roundness of Cylindrical Parts from Steel 45 with Reversible SPD / S.A. Zaides, **Nguyen Huu Hai** // Steel in Translation. – 2023. – Vol. 53. – No. 6. – P. 554–561.

17. Зайдес, С.А. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на изменение зеренной структуры углеродистой стали / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Черные металлы. – 2023. – № 6. – С. 61–70.

***Патенты РФ на изобретение***

18. Пат. № 2758713, Российская Федерация, В24В 39/04 (2006.01). Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021100553, заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021. Бюл. № 31.

19. Пат. № 2763065, Российская Федерация, В24В 39/04; F16H 19/08; F16H 37/04 (2006.01). Устройство для осциллирующего движения рабочего инструмента / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021115960, заявл. 03.06.2021; опубл. 27.12.2021. Бюл. № 36.

20. Пат. № 2764452, Российская Федерация, В24В 39/04 (2006.01). Устройство для круговой осцилляции рабочего инструмента / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай**, В.Н. Москвитин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021106567, заявл. 15.03.2021; опубл. 17.01.2022. Бюл. № 2.

21. Пат. № 2764932, Российская Федерация, F16H 37/00 (2006.01). Устройство для реверсивного вращения рабочего инструмента / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай**, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021118204, заявл. 23.06.2021; опубл. 24.01.2022. Бюл. № 3.

22. Пат. № 2779378, Российская Федерация, В24В 39/04; F16H 19/08; F16H 37/04 (2006.01). Устройство для осциллирующего вращения рабочего инструмента / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021132305, заявл. 08.11.2021; опубл. 06.09.2022. Бюл. № 25.

***Другие публикации***

23. Зайдес, С.А. Способ и устройства для осциллирующего вращения рабочего инструмента / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получе-

- ния до утилизации): материалы XI Всерос. научно-технич. конф. с международным участием (г. Иркутск, 21–23 октября 2021 г.). – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. – С. 38–48.
24. Зайдес, С.А. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на формирование остаточных напряжений / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Жизненный цикл конструкционных материалов: XII Всерос. научно-технич. конф. (г. Иркутск, 06 июня 2022 г.). – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2022. – С. 235–244.
25. До, Ны И. Реверсивное поверхностное пластическое деформирование цилиндрических деталей транспортной техники / До Ны И, **Нгуен Хыу Хай** // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Сборник научных статей 12-й Междунар. научно-практич. конф. (г. Курск, 01 ноября 2022 г.). – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2022. – С. 125–129.
26. Хоанг, Нгок Ань. Влияние кинематики тороидального ролика на напряженно деформированное состояние цилиндрических деталей / Хоанг Нгок Ань, **Нгуен Хыу Хай** // Инновации в машиностроении: Материалы докладов XIII Междунар. научно-практич. конф. ИнМаш-2022. (г. Барнаул, 23–25 ноября 2022 г.). – Барнаул: Изд-во АГТУ им. И.И. Ползунова, 2022. – С. 12–19.
27. Нгуен, Тхань Ван. Влияние параметров тороидального ролика на геометрические характеристики отпечатков и давление в зоне контакта при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / Нгуен Тхань Ван, Нгуен Ван Хинь, **Нгуен Хыу Хай** // Современные материалы, техника и технологии. – 2022. – № 6 (45). – С. 99–103.
28. Буй, Тхань Донг. Влияние геометрии тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / Буй Тхань Донг, **Нгуен Хыу Хай**, Нгуен Ван Хинь // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: Сб. науч. ст. Всерос. научно-технич. конф. (г. Воронеж, 13–14 апреля 2023 г.). – Воронеж: Изд-во ВГТУ. – 2023. – С. 97–102.
29. Хоанг, Нгок Ань. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на механические свойства упрочненного слоя цилиндрических деталей / Хоанг Нгок Ань, **Нгуен Хыу Хай**, Нгуен Ван Хинь // Технологии и техника: Пути инновационного развития: Сб. науч. ст. Междунар. научно-технич. конф. (г. Воронеж, 09 июня 2023 г.). – Воронеж: Изд-во ВГТУ. – 2023. – С. 535–540.
30. Хоанг, Нгок Ань. Оценка геометрических параметров пластического отпечатка и давления в зоне контакта при статическом внедрении рабочего инструмента / Хоанг Нгок Ань, **Нгуен Хыу Хай**, Нгуен Ван Хинь // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): Материалы XIII Всерос. научно-технич. конф. с международным участием (г. Иркутск, 16 мая 2023 г.). – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. – 2023. – С. 171–175.
31. Зайдес, С.А. Оценка параметров волнистости при реверсивном поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **Нгуен Хыу Хай** // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: Сб. тр. науч. семинара, посвященного памяти Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почетного профессора ДГТУ А.П. Бабицева (г. Ростов-на-Дону, 28 февраля 2023 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ. – 2023. – С. 40–46.

Подписано в печать 30.11.2023. Формат 60 x 90 / 16.  
 Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.  
 Тираж 100 экз. Зак. 137. Поз. Плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства  
 ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
 исследовательский технический университет»  
 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83