

На правах рукописи



Симонов Дмитрий Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО  
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ  
УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

Специальности: 2.5.5 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки; 2.5.6 – Технология машиностроения

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

Москва 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

**Научный руководитель:** **Приходько Вячеслав Михайлович,**  
член-корреспондент РАН РФ, доктор технических наук, профессор

**Официальный оппонент:** **Киселев Евгений Степанович,**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инновационные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Ульяновского государственного технического университета» (УлГТУ)

**Яковлева Анна Петровна,**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Защита состоится «17» апреля 2024 г. в 10:00 часов, на заседании диссертационного совета 24.2.277.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корпус № 4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и по адресу в сети интернет: <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/simonov-dmitriy-sergeevich>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.277.01  
доктор технических наук, доцент

Нагоркин Максим Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Разработка технологий для получения требуемых эксплуатационных свойств изделий транспортной техники является приоритетным направлением инновационного развития России, обеспечения ее технологического суверенитета. К одному из важнейших современных направлений развития машиностроения относится разработка комбинированных и совмещенных технологических процессов с использованием существующих и новых методов обеспечения эксплуатационных свойств поверхностного слоя стальных изделий. Формирование стойких поверхностных слоев на углеродистых и малолегированных сталях способствует увеличению сроков службы изделий, позволяет снизить расход применяемых материалов, издержки на их производство и обработку, что позволяет решить насущную проблему повышения энергоэффективности, ресурсосбережения и интенсификации при механической обработке.

Известны технологии, в частности, поверхностное пластическое деформирование (ППД) с ультразвуком и химико-термическая обработка (ХТО), например, азотирование, которые позволяют улучшить эксплуатационные свойства поверхности изделий, снизить шероховатость и повысить микротвердость, создать остаточное напряжения сжатия. Основным фактором, определяющим эффективность ультразвуковой технологии ППД, является амплитуда смещений рабочего инструмента-индентора, в этой связи актуальна разработка способов повышения энергоэффективности колебательных систем.

Технологии ХТО имеют высокий потенциал управления структурно-фазовым состоянием. Совершенствование способов ХТО идет в направлениях изыскания новых факторов регулирования процесса для получения заданного уровня упрочнения и способов интенсификации процесса, поскольку низкотемпературные процессы, такие как азотирование, требуют значительного времени обработки.

Особую сложность при ППД представляют длинномерные детали, которые относятся к типу нежестких валов ( $L/D > 12$ ) и требуют равномерной обработки по всей длине детали, что может обеспечиваться снижением усилий при ППД с ультразвуком. К таким деталям относятся штоки гидроцилиндров, оси коромысел, цилиндрические направляющие и другие детали цилиндрической формы.

**Цель работы** – повышение эффективности обработки длинномерных цилиндрических деталей из конструкционных сталей путем разработки и применения комбинированных способов обработки ППД с наложением ультразвуковых колебаний и ХТО.

**Объект исследования** – технологические процессы комбинированной обработки поверхности стальных изделий ППД с использованием ультразвука и ХТО.

**Предмет исследования** – влияние комбинированных технологических процессов ППД с ультразвуком и ХТО на параметры качества поверхностного слоя: шероховатость, микротвердость и остаточные напряжения стальных изделий.

**Задачи:**

1. С целью определения рациональных режимов экспериментально исследовать ультразвуковые технологии и ХТО при формировании модифицированного поверхностного слоя изделий при ППД.

2. Для повышения производительности и равномерной обработки ППД нежестких валов разработать способ комбинированной обработки поверхностным пластическим деформированием с использованием ультразвуковых колебаний.

3. Теоретически и экспериментально исследовать специальные УЗКС, обладающие высокими энергетическими характеристиками и позволяющими получать амплитуду смещения инструмента-индентора не менее 15 мкм.

4. Разработать и апробировать на практике технологические рекомендации по реализации комбинированных технологических процессов ППД с ультразвуком и ХТО.

5. Для снижения шероховатости и повышения микротвердости поверхностного слоя нежестких валов разработать совмещенный и комбинированный технологические процессы ППД с ультразвуком.

**Методы исследования** основаны на теоретических положениях технологии машиностроения и математического моделирования. Экспериментальные исследования УЗО ППД проведены на модернизированном металлорежущем станке 1К625. Шероховатость определяли на контактном высокочувствительном приборе профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр». Износостойкость оценивалась посредством УМТ - 2168 «Унитриб». Оценку твердости производили на твердомере модели ТП-2. Микротвердость на поверхности образцов измерялась на приборе ПМТ-3. Металлографические исследования проведены на микроскопе Neophot-21. Исследования параметров тонкой структуры и оценка остаточных напряжений осуществлялись рентгенографическим методом на установке ДРОН-3.

**Достоверность и обоснованность** обеспечивалась использованием современного оборудования, стандартной измерительной аппаратуры при проведении экспериментальных исследований и применением математических методов при обработке и анализе экспериментальных данных. Для получения результатов исследования использовалась теоретическая и методологическая база в виде научно-методологического комплекса управления структурообразованием в инженерии поверхности металлов.

**Научная новизна**

1. Установлено существенное преимущество импульсного по сравнению с традиционным непрерывным способа передачи энергии ультразвуковых

колебаний от инструмента-индентора упрочняемой детали, обеспечивающего в 1,5 раза более высокую степень наклепа и уровень остаточных напряжений, а также большую плотность дислокаций и дисперсность блоков, при этом импульсный способ обеспечивается за счет зазора, величина которого удовлетворяет условию  $\xi > \delta \geq 0$  (п. 2, 3 паспорта научной специальности 2.5.5).

2. Установлена связь между величиной амплитуды смещения рабочей части многополуволновых УЗКС и элементами соединения преобразователя с высокими потерями и инструментом с более низкими потерями, выявлены конструктивные особенности их сопряжения и определены рациональные параметры УЗКС, обеспечивающие высокую амплитуду смещения индентора (п. 3, 4, 7 паспорта научной специальности 2.5.5).

3. С целью повышения производительности ультразвукового ППД нежестких валов и равномерного упрочнения по длине детали разработана технология комбинированной обработки ППД с ультразвуком, заключающаяся в использовании одновременно двух инструментов – инденторов, установленных со смещением, кратным  $0,5S_{\text{ГПР}}$ , одному из которых сообщаются ультразвуковые колебания (п. 4, 9 паспорта научной специальности 2.5.6).

4. Установлено, что предложенная комбинированная технология обработки ППД, сочетающая ХТО (азотирование) и последующее импульсное ультразвуковое ППД, позволяет повысить поверхностную твердость детали из стали в 1,6 раза, увеличить глубину упрочнения в 2 раза, сгладить перепад показателей твердости на границе азотированного слоя (п. 2, 4, 7 паспорта научной специальности 2.5.6).

#### **Практическая значимость:**

1. Разработана методика повышения амплитуды колебаний рабочего торца инструмента-индентора, основанная на подборе элементов связи между низкооборотным преобразователем и высокооборотным инструментом, и обеспечивающая снижение акустических потерь в сочленениях многополуволновой УЗКС.

2. Разработан способ комбинированной обработки ППД с ультразвуком (патент №2794512 от 19 апреля 2023), при котором упрочнение поверхности вращающейся детали при ППД осуществляется с наложением на инструмент-индентор ультразвуковых колебаний.

3. Определены рациональные режимы комбинированного технологического процесса ППД с использованием ультразвуковых колебаний с целью формирования функциональных свойств поверхностного слоя на сталях с учетом эксплуатационных требований к изделиям.

4. Внедрение разработанной технологии комбинированного технологического процесса ППД с применением ультразвука позволяет получить экономический эффект, который складывается из применения недорогих сталей, сокращения количества операций и повышения производительности технологического оборудования.

**На защиту выносятся:**

1. Методика создания комбинированных и совмещенных технологических процессов ППД с ультразвуком и ХТО с целью формирования заданных свойств изделий транспортной техники.
2. Результаты экспериментальных исследований комбинированных и совмещенных технологических процессов ППД с ультразвуком и ХТО.
3. Результаты теоретического и экспериментального исследования ультразвуковых стержневых многополуволновых УЗКС, используемых в комбинированных и совмещенных технологических процессах ППД с ультразвуком.
4. Рекомендации по оптимальным режимам технологических процессов комбинированной обработки ППД с ультразвуком.
5. Способ комбинированной обработки длинномерных деталей (патент №2794512 от 19 апреля 2023) ультразвуковым ППД с целью повышения производительности и равномерного поверхностного упрочнения.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной конференции молодых ученых «Научное наследие Д.К. Чернова» (г. Москва, 2018г.); XI-ой Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе» (г. Калининград, 2019г.); XII-ой Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей "Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении (г. Тамбов, 2020 г.); Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (ICMTMTE 2021), объединенная с 3-ем Международным научным симпозиумом «Перспективные технологии аэрокосмической техники» (ТАКТ-2021) (г. Севастополь, 2021г.); Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2022» (ICMTMTE 2022), объединенная с 4-ым Международным научным симпозиумом «Перспективные технологии аэрокосмической техники (ТАКТ — 2022)» (г. Севастополь, 2022г.); 14-ой Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (г. Брянск, 2022г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, в том числе 5 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, получен 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографического списка. Работа изложена

на 135 страницах, содержит 52 рисунка, 14 таблиц, 3 приложения и список литературы из 130 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматривается современное состояние темы исследования и анализируется возможность повышения качества обработки ответственных изделий машиностроения методом ППД в комбинации с ультразвуком и ХТО. Особую сложность при ультразвуковом ППД представляют удлиненные цилиндрические детали, относящиеся к типу нежестких валов, например, штоки гидроцилиндров, цилиндрические направляющие, оси коромысел, оси и штанги толкателей.

Такие детали подвергаются высоким нагрузкам, изготавливают их, как правило, из стали 45, шлифуют, а для повышения прочности, устойчивости к износу ее поверхность дополнительно подвергается химико-термической и термической обработке (цементация, закалка).

Замена стали специальных дорогостоящих марок на конструкционную, подвергаемую вместо шлифования ультразвуковой обработке (УЗО), и исключение ХТО (цементации и закалки) из технологического процесса изготовления нежестких валов, позволит избежать возможного растрескивания рабочих поверхностей.

Проведен анализ ультразвуковых колебательных систем (УЗКС), применяемых в технологических процессах с использованием ультразвука.

Существенный вклад в изучение ППД, УЗО и комбинированных технологий ППД с УЗО внесли ученые: Розенберг Л.Д., Казанцев В.Ф., Кулемин А.В., Бернштейн М.Л., Лахтин Ю.М., Статников Е.Ш., Смоленцев В.П., Марков А.И., Панов А.П., Агранат Б.А., Муханов И.Н., Абрамов О.В., Макаров А.И., Худобин Л.В., Приходько В.М., Киселев Е.С. и др. Работы вышеупомянутых авторов определили основные направления исследования.

На основе проведенного анализа разработана программа исследования и основные задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена методическим вопросам, в частности, методике общих измерений и методике специальных исследований.

При разработке общих методических вопросов по исследованию ППД деталей ДВС с применением ультразвука основное внимание было уделено: определению технологических характеристик совмещенного и комбинированного процессов ППД с ультразвуком и ХТО; оценке энергетических характеристик ультразвукового оборудования.

Основными технологическими факторами, определяющими эффективность процессов с использованием ультразвуковой обработки, являются:

- излучаемая акустическая мощность,  $N_{уд}$ ;

- амплитуда колебательных смещений излучателя  $\xi$ , мкм;
- подача  $S$  (мм/об), обороты  $n$  (об/мин), частота  $f$  (кГц), сила прижима  $F_N$  (Н), скорость резанья  $V_R$  (м/мин);

К параметрам качества поверхностного слоя ППД были отнесены шероховатость  $Ra$  и  $Rz$ , опорная длина профиля  $tp$ , твердость  $H$  (кгс/мм<sup>2</sup>), микротвердость  $H_\mu$  (МПа) и остаточные напряжения  $\sigma_{ост}$  (МПа).

Во второй главе также приведены принципиальные схемы экспериментальных установок для исследований комбинированных методов упрочнения поверхности стальных изделий.

**В третьей главе** рассматриваются используемые высокоамплитудные УЗКС.

Магнитострикционные преобразователи нуждаются в громоздких системах охлаждения и не удовлетворяют по массогабаритным параметрам. Современные УЗКС на основе пьезокерамики свободны от этих недостатков, однако для их применения при УЗО ППД необходимо повысить амплитуду колебаний инструмента.

Работа УЗКС анализировалась посредством разделения функций электромеханического преобразования воздействия на обрабатываемую среду. Для этого вместо непосредственного соединения преобразователя с высоким уровнем потерь и инструмента с малыми потерями в стык применялось соединение через элемент с высокой гибкостью  $C$  (величина, обратная упругости). Таким элементом может быть, например, шпилька или хвостовик, когда акустический контакт преобразователя и инструмента осуществляется только по ниткам резьбы (рис. 11).

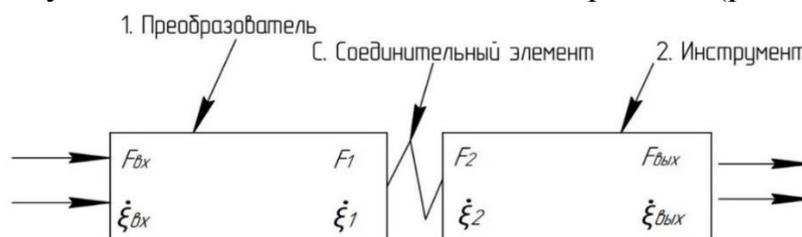


Рис. 1. Высокоамплитудная колебательная система для ППД

Переходное сопротивление системы (отношение амплитуд входной силы и выходной скорости  $\dot{Z} = \frac{F_{вх}}{\xi_{вых}}$ ) в случае пренебрежения потерь будет чисто мнимым и в системе приближения Webster:

$$\dot{Z} = i[Z_{01} \sin(kl)_1 \cos(kl)_2 + Z_{01} \sin(kl)_1 \cos(kl)_2 - Z_{01}Z_{02} \omega C \sin(kl)_1 \sin(kl)_2], \quad (1)$$

где  $Z_0$  - характеристические сопротивления,  $(kl)$  - волновые длины элементов УЗКС; индексы 1 и 2 относятся к преобразователю и инструменту соответственно,  $C$  – гибкость соединительного элемента.

При рассмотрении системы с потерями в переходном сопротивлении появляется действительная часть:

$$P = \frac{1}{2} z_{01} \varepsilon_1 (\cos(kl)_2 - \omega C z_{02} \sin(kl)_2) ((kl)_1 \cos(kl)_1 - \sin(kl)_1) + \frac{1}{2} z_{02} \varepsilon_2 (\cos(kl)_1 - \omega C z_{01} \sin(kl)_1) ((kl)_2 \cos(kl)_2 - \sin(kl)_2) + \left( \frac{1}{2} (kl)_1 z_{02} \varepsilon_2 + \frac{1}{2} (kl)_2 z_{01} \varepsilon_1 + \omega C z_{01} z_{02} \varepsilon_c \right) \sin(kl)_1 \sin(kl)_2, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{1,2}$  – коэффициенты потерь.

Модуль переходного сопротивления

$$\Psi = P + i\chi; \Psi = \Psi \exp(i\theta); Z = \sqrt{P^2 + \chi^2}; \theta = \arctg \frac{\chi}{P}; \quad (3)$$

На практике коэффициенты потерь преобразователей много больше коэффициентов потерь инструментов и элемента связи, т.е.

$$\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2; \varepsilon_1 \gg \varepsilon_c$$

Поэтому амплитуда смещения  $\xi_m$  на резонансной частоте определяется прежде всего свойствами преобразователя, т.е. элементом с высокими потерями.

На частоте, определяемой выражением

$$\sin(kl)_2 \approx \operatorname{tg}(kl)_2 = \omega_2 C Z_{02} \quad (4)$$

первое слагаемое (2) обращается в нуль и действительная часть переходного сопротивления теперь становится малой. Частота, определяемая (4), не является резонансной и мнимая часть переходного сопротивления равна

$$\frac{\chi}{z_{02}} = \sin(kl)_2 \cos(kl)_1 \approx -\omega_2 C Z_{02} \quad (5)$$

Переходное сопротивление минимально при резонансе преобразователя т.е. при  $(kl)_1 \approx \pi$ . УЗКС при этом работает не в резонансе.

Показано, что заметное увеличение по амплитуде смещения выходного торца УЗКС возможно при выполнении неравенств

$$\omega_2 C Z_{02} \ll \varepsilon_2 \ll \varepsilon_1 \ll 1.$$

В эксперименте максимальный результат по амплитуде смещения получается тогда, когда собственная частота преобразователя немного ниже собственной частоты инструмента. Иными словами, УЗКС наиболее эффективны, когда совпадает настройка преобразователя и системы инструмент – сосредоточенная гибкость.

Максимальный прирост по амплитуде смещения теоретически имеет порядок  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ , что на современном уровне даст величину порядка ста единиц, при этом экспериментально удалось достигнуть показателя по амплитуде в 4,5 раза, а при ультразвуковом ППД более чем в 2,5 раза. Такая разница в значениях обусловлена сложностью настройки высокоамплитудных УЗКС.

**В четвертой главе** представлены основные результаты экспериментального исследования методов ультразвукового ППД, позволяющих формировать структуру, повышать микротвердость поверхностного слоя, снижать шероховатость, изменять знак и уровень остаточных напряжений, что влияет на усталостную прочность и долговечность деталей.

В работе рассмотрены два варианта взаимодействия инструмента-индентора с упрочняемой поверхностью: 1 – при непрерывной передаче

энергии ультразвуковых колебаний очагу деформации, НпрУЗО, 2 – при импульсной – ИУЗО, когда  $\xi_m > \delta \geq 0$ , рис. 2, где 1- вращающаяся деталь,

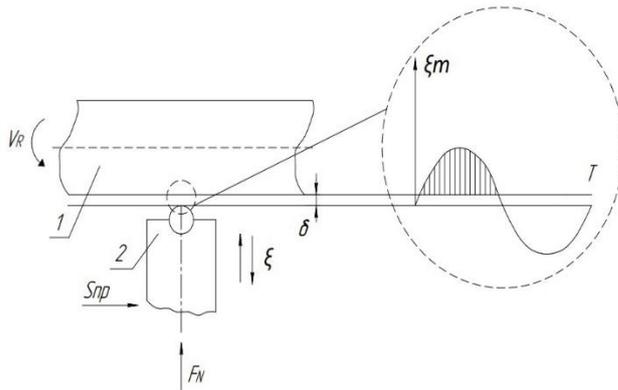


Рис. 2. Принципиальная схема ультразвукового упрочнения

прижимается к обрабатываемой детали статической силой  $F_N$  с тем, чтобы обеспечивался непрерывный контакт между ними. ИУЗО отличается тем, что между инструментом-шариком, свободно сидящем в специальном гнезде излучателя и обрабатываемой поверхностью создают зазор  $\delta$ .

На рисунке 3 представлены профилограммы поверхности предварительно закаленных и прошлифованных образцов стали 45 до и после ультразвуковой обработки. После УЗО поверхность приобретает более регулярный рельеф, а средняя высота выступов и впадин значительно уменьшается. В частности, для приведенных условий обработки  $R_a$  уменьшается с 0,63 до 0,16 мкм. При этом возрастает относительная опорная длина  $t_{0,5}$  с 50% до 80%.

Определяющими факторами при упрочняющей ультразвуковой обработке являются сила прижима  $F_N$  и амплитуда колебаний инструмента-индентора  $\xi_m$ , это подтверждают результаты на рис. 3 и рис. 4.



а)



б)

Рис. 3. Профилограммы поверхности образцов из стали 45 до (а) и после (б) ультразвуковой обработки

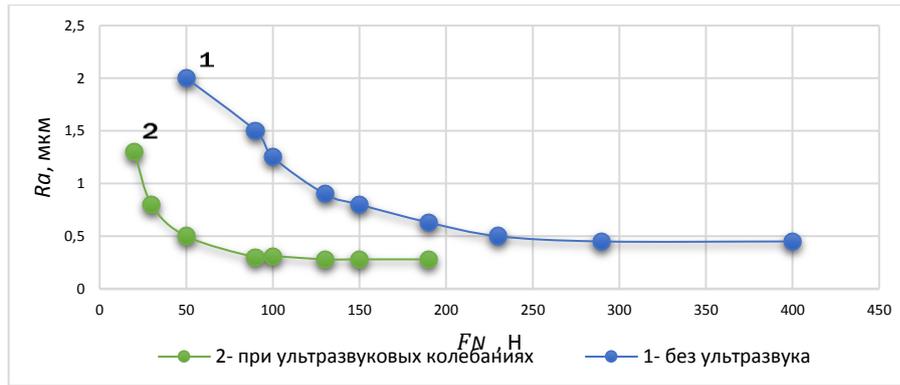


Рис.4. Зависимость высоты неровностей  $Ra$  на образцах из стали 45 от силы прижима  $F_N$  индентора с радиусом головки  $r = 5$  мм без ультразвука (1) и при УЗО с  $\xi_m = 12$  мкм (2)

На рис. 4 видно, что шероховатость поверхности образцов из стали 45 с увеличением силы прижима  $F_N$  вначале плавно снижается, а уже при  $F_N = 100$  Н почти не изменяется, находясь в пределах 0,8...0,4 мкм (при исходном  $Ra = 2,5...1,25$  мкм). Повышение амплитуды колебательных смещений, как и увеличение силы прижима, приводит к снижению высоты микронеровностей, рис. 5.

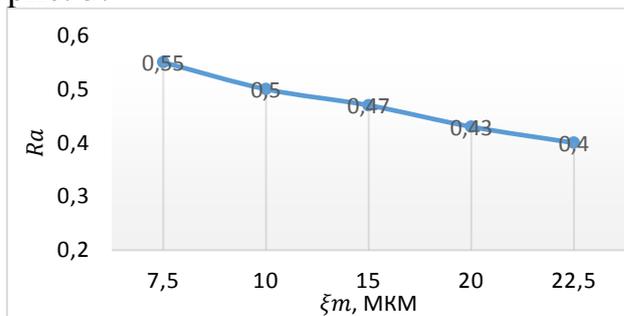


Рис. 5. Зависимость средней высоты микронеровностей  $Ra$  от  $\xi_m$

Характерным для упрочняющей ультразвуковой обработки, равно как и для любого вида обработки ППД, является создание сжимающих остаточных напряжений. Исследован характер остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое в результате ППД обычным и ультразвуковым инструментом. На рис. 6 приведено распределение остаточных напряжений по глубине слоя при ППД без УЗО и с ультразвуком.

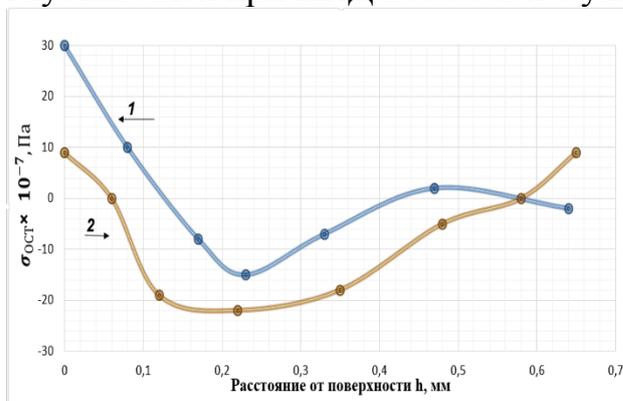


Рис. 6. Остаточные напряжения  $\sigma_{ост}$  по глубине слоя  $h$  в закаленной стали 45 без ультразвука (1) и с ультразвуком (2)

Шероховатость поверхности, получаемая в результате упрочняющей ультразвуковой обработки, зависит также от ряда других факторов: исходной шероховатости  $Ra$ , окружной скорости вращения детали  $v_R$ , подачи  $S_{пр}$ , числа проходов  $i$ .

Экспериментальная оценка износостойкости осуществлялась в качестве одного из критериев сравнения различных упрочняющих технологий и режимов упрочнения. Испытания проводились на образцах из углеродистой стали 45 и Ст3 по типу «вал – втулка» без смазывающего материала с учетом

требований ГОСТ 30480-97, при  $F = 500$  Н, скорость вращения  $n = 150$  об/мин. Время нагружения 240 минут, материал «контртела» чугун СЧ-18, диаметр 5 мм.

Влияние силы прижима на износостойкость образцов при ультразвуковом ППД оценивалось по длине лунок износа на поверхности полированного и упрочненного образцов. При этом износостойкость полированных образцов была принята за единицу. Результаты получены при разных силах прижима в процессе НпруЗО с постоянной амплитудой 13 мкм (табл. 1).

Таблица 1

Материал	Сила прижима, Н	Глубина канавки на поверхности образца, $\frac{h_{(2)}}{h_{(1)}}$
Сталь 45	50	1,22
	100	1,45
	150	1,49
Ст3	50	1,11
	100	1,34
	150	1,45

В табл. 2 приведены сравнительные результаты упрочнения стали 45 с ультразвуком и без него.

Таблица 2

Показатели качества поверхности	Вид обработки	
	ППД без ультразвука (выглаживание)	ППД с ультразвуком
Шероховатость $Ra$ , мкм (исходная – $Ra = 10..2,5$ мкм)	0,63..0,24	0,16
Степень упрочнения (наклепа), %	1,06	1,49
Остаточные напряжения, МПа	от 300 до -150	от 100 до -210
Относительная износостойкость, %	45-56	66-81

С использованием метода математического планирования экспериментов были получены уравнения регрессии для шероховатости и микротвердости при импульсном ультразвуковом ППД и на их основе определены оптимальные значения режима обработки:  $F_N$ ,  $\xi_m$ ,  $V_R$ , таблица 3.

Таблица 3

Материал	Оптимальные режимы обработки			Результаты обработки	
	$F_N$ , Н	$\xi_m$ , мкм	$V_R$ , м/мин	$Ra$ , мкм	H, МПа
Ст3	100	13	7	0,18	2800
Сталь 45	140	13	6	0,16	5000
Сталь 40X	140	13	6	0,18	3500
Сталь 38ХМЮА	100	13	7	0,15	8700

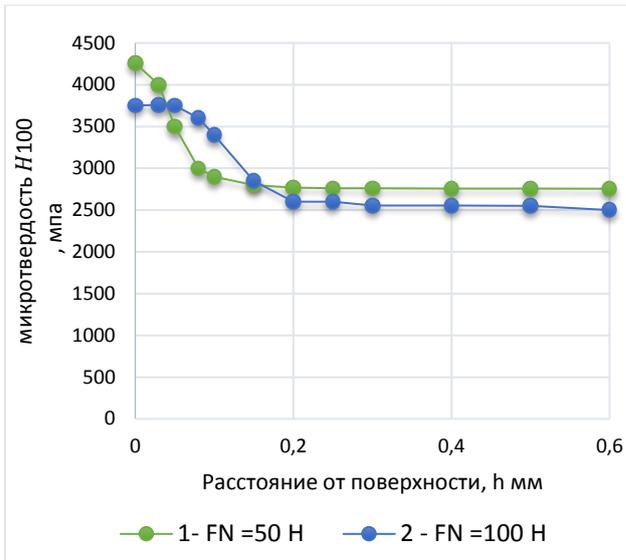


Рис. 7. Изменение микротвердости  $H_{100}$  по глубине слоя образца из стали 45 после ультразвуковой обработки.

1-  $F_N = 50$ Н; 2 -  $F_N = 100$ Н.

Режимы обработки:  $n = 80$  об/мин;  $S = 0,07$  мм/об;  $\xi = 10$  мкм;  $f = 18$  кГц;  $d_{шр} = 5$  мм

Из рис. 7 видно, что при ультразвуковой обработке предварительно закаленной стали 45 имеет место увеличение микротвердости поверхностного слоя в 1,6 раза, глубина упрочнения составляет 0,15-0,6 мм.

Принципиальная схема комбинированной обработки низкоуглеродистой стали Ст3 азотированием с последующим ультразвуковым ППД представлена на рис. 8. Такая последовательность обработки выбрана в связи с тем, что процесс азотирования проводится при температуре выше температуры рекристаллизации, что приводит к снятию эффекта наклёпа при использовании последовательности «азотирование + ППД с ультразвуком».

Процесс азотирования проводился в насыщающей среде (50%  $NH_3$ +50% воздуха). Изотермическая выдержка в течение 1 ч выполнялась при температуре  $570^\circ C$ .

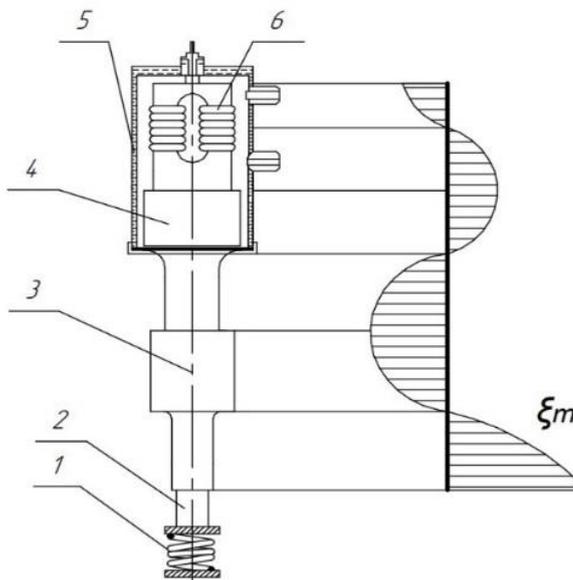


Рис. 8. Схема ультразвукового ППД: 1 – основание с пружиной; 2 – образец; 3 – излучатель; 4 – волновод; 5 – кожух охлаждения; 6 – преобразователь

Излучатель УЗКС 3 прижимался к образцу 2, размещаемому на основании 1. Питание УЗКС осуществлялось от ультразвукового генератора УЗГ 2,0/22. Параметры обработки: сила прижима  $F_N = 25$  Н, время обработки  $t = 10$  с, амплитуда колебаний торца излучателя  $\xi_m = 12$ , частота колебаний  $f = 19700$  Гц.

Твердость образцов из углеродистой стали в зависимости от способа обработки представлена на рис. 9, где: 1 – без обработки; 2 – после азотирования; 3 – после ультразвукового ППД; 4 – после азотирования с последующим ультразвуковым ППД.

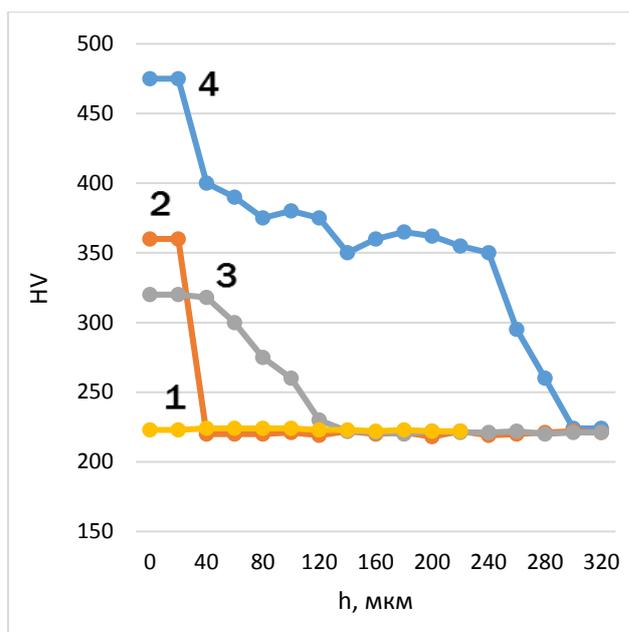


Рис. 9.

Максимальный эффект как по величине упрочнения, так по глубине упрочненного слоя получен в результате азотирования и последующее ультразвукового ППД. Анализ кривой 4 показывает, что твердость на поверхности при силе прижима 150 Н возросла до 475 *HV*; далее на глубине с 40 мкм происходит снижение до 405 *HV*, после располагается относительно ровный участок до 240 мкм, на котором происходит незначительно снижение твердости до начального уровня.

Возрастание твердости объясняется ультразвуковым упрочнением азотированного слоя, а увеличение глубины связано с повышением эффективности передачи и распространения ультразвуковой энергии в образцах.

В результате выполненного исследования по комбинации ХТО и УЗО ППД предложена технология комбинированной обработки азотированием с последующим ультразвуковым ППД. Данный способ упрочнения приводит к повышению твердости на поверхности до 50%, уменьшает резкий перепад на границе азотированного слоя и обеспечивает увеличение глубины упрочнения в 2 раза.

**В пятой главе** представлены технологические рекомендации к совмещенным и комбинированным процессам обработки стальных изделий с использованием ультразвуковых колебаний.

С целью определения влияния различных способов ультразвукового упрочнения было проведено исследование следующих вариантов упрочняющей обработки закаленной стали 45:

- ультразвуковая обработка при непрерывной передаче энергии (НпрУЗО)
- импульсная ультразвуковая обработка (ИУЗО)
- комбинация НпрУЗО с последующей импульсной обработкой (ИУЗО).

4. ИУЗО предварительно нагретого образца с помощью (ТВЧ).

На рис. 10 представлены результаты металлографических исследований образцов из закаленной стали 45 с последующей НпрУЗО, ИУЗО, комбинацией НпрУЗО+ИУЗО и предварительно нагретого образца + ИУЗО.

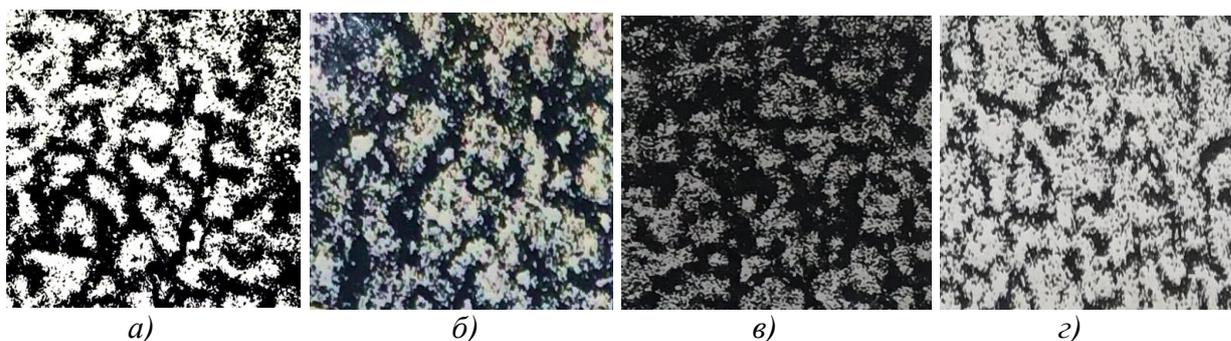


Рис. 10. Микроструктура закаленной стали 45 после: (а) НпрУЗО; (б) ИУЗО; (в) НпрУЗО+ИУЗО; (з) нагретого образца + ИУЗО ( $\times 400$ )

Анализ рисунка 10 показывает, что в структуре образцов наблюдается дробление фрагментов мартенситной матрицы, что подтверждает возрастание показателя уширения дифракционных линий  $\beta(211)$  (табл. 4), полученных методом рентгеноструктурного анализа.

Таблица 4

Вид обработки	$\beta(211)$ , рад.	Плотность дислокаций $\rho$ , $\text{см}^{-2}$	$H_\mu$ (МПа)
ТВЧ	0,032	$2,2 \cdot 10^{10}$	4000
ТВЧ+НпрУЗО	0,037	$7,66 \cdot 10^{10}$	7500
ТВЧ+ИУЗО	0,067	$4,72 \cdot 10^{11}$	8500
ТВЧ+НпрУЗО+ИУЗО	0,085	$7,8 \cdot 10^{11}$	9300
ТВЧ + нагрев +ИУЗО	0,038	$7,54 \cdot 10^{10}$	7300

Плотность дислокаций рассчитана по эмпирической формуле (6),

$$\rho_d = 3,46 \times 10^{15} \times \beta^2 \text{см}^{-2}, \quad (6)$$

которая многократно возрастает при НпрУЗО по сравнению с исходной закалкой ТВЧ. При этом микротвердость увеличивается более чем в 1,6 раза, при ИУЗО – более чем в 3, а после их комбинации - в 3,2 раза. Отсюда следует, что деформационное упрочнение является основным фактором повышения твердости.

Анализ экспериментальных данных (по 4-м схемам УЗО) позволяет сделать следующие выводы:

- из рассмотренных четырех вариантов наилучшие результаты по шероховатости и микротвердости получены при совмещении ППД с импульсным способом ультразвуковых колебаний;

- ультразвуковое ППД, как при непрерывной передаче энергии колебаний, так и импульсной, увеличивает микротвердость поверхностного слоя предварительно закаленной стали 45 в 2-2,5 раза и уменьшает шероховатость поверхности с  $Ra = 0,63$  мкм до  $Ra = 0,16-0,12$  мкм;

- при импульсной ультразвуковой обработке (ИУЗО) более интенсивно протекают процессы деформационного упрочнения, и как следствие этого, большее увеличение микротвердости, микродеформации, плотности дислокации; величина сжимающих напряжений 1-го рода достигает большого значения, чем при непрерывной ультразвуковой обработке. Наличие зазора между демпфирующим элементом инструмента и обрабатываемой поверхностью приводит к увеличению эффективности передачи энергии,

износостойкость деталей, изготовленных из стали 45 увеличивается на большую величину;

- комбинация сначала ультразвуковой и затем импульсной ультразвуковой обработки приводит к мелкоблочной структуре с повышенной плотностью дислокаций и с повышенными значениями сжимающих макронапряжений, что наряду со снижением шероховатости приводит к повышению величины микротвердости;

- при ультразвуковой обработке предварительно нагретого металла увеличивается степень пластической деформации, что проявляется в изменении формы зерна, в появлении их вытянутости, это, видимо, происходит за счет увеличения числа генерируемых дислокаций и создания условий для их движения.

Предпочтение, как правило, импульсной схеме обработки связано с неустойчивостью работы УЗКС при непрерывной передаче ультразвуковых колебаний, что объясняется тем, что реактивная составляющая нагрузки не равна 0. Комбинирование ППД с ультразвуком и с ХТО, несмотря на относительную сложность и высокую стоимость технологического оборудования находит применение в тех случаях, когда требуется большая глубина упрочняемого слоя.

Для упрочнения поверхности длинномерных деталей предложен новый способ, когда ППД осуществляется одновременно с воздействием на поверхность ультразвуковых колебаний, при этом используют два рабочих инструмента, установленных перпендикулярно поверхности с возможностью их перемещения вдоль детали с продольной подачей  $S_{пр}$ . Согласно изобретению (патент №2794512: заяв. 28.06.2022: опубл. 19.04.2023) упомянутые рабочие инструменты установлены по разные стороны от обрабатываемой детали супротивно друг другу в горизонтальной плоскости со смещением их осей, которое назначают кратным значению продольной подачи  $S_{пр}$ .

На рисунках 11 и 12, поясняющих способ комбинированной обработки, изображены следующие элементы: патрон 1; обрабатываемая деталь 2; прижимная гайка 3; корпус 4; пружина 5; инструменты 6 и 7; концентратор ультразвуковых колебаний 8; ультразвуковой преобразователь 9; кожух охлаждения 10; задняя бабка 11. При этом рабочий инструмент 7 одновременно- излучатель УЗКС.

На чертежах приняты следующие обозначения:  $F_{пр1}$  и  $F_{пр2}$ ,  $R_1$  и  $R_2$  – соответственно сила прижима и радиусы поверхности рабочих инструментов, воздействующих на обрабатываемую деталь;  $n$ ,  $\xi$  и  $f$  – соответственно частота вращения обрабатываемой детали, амплитуда и частота ультразвуковых колебаний ультразвуковой системы;  $\Delta$  – смещение осей рабочих инструментов.

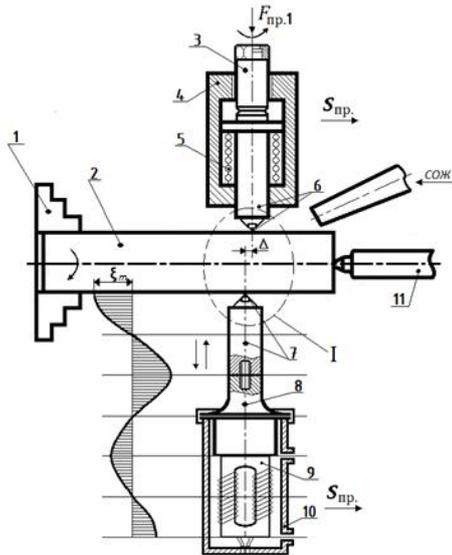


Рис. 11. Схема комбинированной обработки

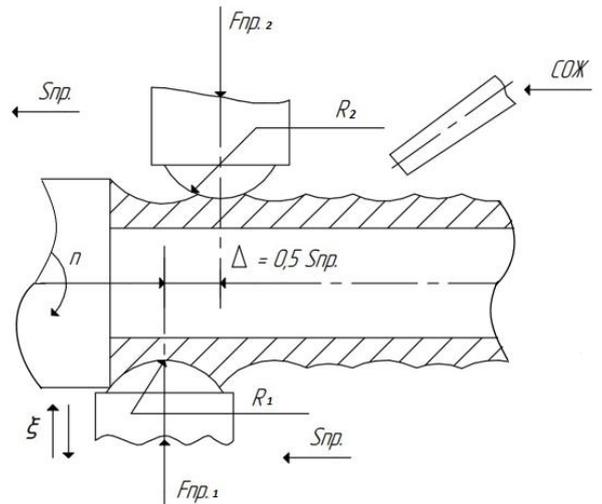


Рис. 12. Шаг установки инструментов в увеличенном масштабе на выносном элементе I

Предложенный способ обработки обеспечивает повышение производительности поскольку обработка осуществляется одновременно двумя инструментами за один проход.

#### Технологические рекомендации по УЗО ППД нежестких валов

1. Назначение: ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование нежестких валов из стали 45 ( $l/d \geq 12$ ).
2. Оборудование: модернизированный токарно-винторезный станок 1К625 с дополнительным оборудованием, устанавливаемом на суппорте.
3. Источник ультразвука: ультразвуковой генератор УЗГ 5-1,6, выходная мощность 1,6 кВт.
4. Инструмент: оригинальная 3-х полуволновая УЗКС.

Таблица 5

Материал	Материал инструмента	Режим упрочнения							Технологические характеристики			
		Сила пр $F_N$ , Н	Число об. об/мин	Амплитуда $\xi_{тв}$ мкм	Зазор инструмент – деталь $\Delta$ , мм	Прод. под $S_{пр}$ , мм/об	Чис пр. $i$ ,	Частота $f$ , кГц	До упрочнения		После упрочнения	
									Ra, мкм	$H_{\mu}$ , МПа	Ra, мкм	$H_{\mu}$ , МПа
Сталь 45	ВК8 (r = 5 мм)	75	50..100	13	0	0,08...0,1	1	22	0,63	4000	0,12	8500

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного исследования решена научно-практическая задача повышения производительности и качества обработки нежестких валов из малолегированных и углеродистых сталей путем замены шлифования на совмещенный и комбинированный способы обработки ППД с наложением ультразвуковых колебаний.

2. При исследовании различных видов комбинирования ППД определено, что происходит повышение комплекса механических свойств стали 45. При ультразвуковой обработке износостойкость увеличивается в 1,6 раза, при ТВЧ нагретого образца более чем в 2 раза, при ТВЧ+НпрУЗО при непрерывной передаче колебаний – в 3 раз, при комбинации ультразвуковой и импульсной в 3,2 раза, при этом глубина упрочненного слоя при всех вариантах обработки колеблется от 0,6 до 1,2 мм.

3. Комбинация поверхностного пластического деформирования (ППД) с ультразвуковой (УЗО) и химико-термической обработкой (ХТО) поверхности стальных изделий позволяет получить повышение твердости на 60% до  $HV = 475$ , уменьшает резкий перепад значений микротвердости на границе азотированного слоя и обеспечивает увеличение глубины упрочнения в 2 раза.

4. Комбинация методов ультразвукового ППД термообработанных ТВЧ образцов приводит к увеличению микротвердости на  $40 \div 80\%$  и достигает 9300 МПа. Такой технологический результат, по-видимому, связан с созданием в поверхностном слое металла мелкоблочной структуры с более равномерным распределением дислокаций за счет термической активации движения дислокаций, что приводит к повышению износостойкости.

5. Разработана схема комбинированной обработки, включающая импульсное и последующее ППД, отличающаяся от других способов УЗО ППД высокой эффективностью передачи энергии ультразвуковых колебаний в очаг деформации и в 2 раза большей скоростью деформации, наилучшими достижимыми параметрами качества поверхностного слоя (шероховатость – до  $Ra = 0,12$  мкм, микротвердость – до  $H_{\mu} 8500$  МПа).

6. На основе проведенного теоретического анализа ультразвуковых высокоамплитудных УЗКС для повышения амплитуды смещения рабочего торца инструмента-индентора и снижения акустических потерь в сочленениях многополуволновой УЗКС разработана конструкция УЗКС, применяемая для комбинированной обработки ППД с ультразвуковым.

7. С целью повышения эффективности ультразвукового ППД длинномерных деталей за счет повышения производительности и их равномерной обработки разработан способ комбинированной обработки ППД с ультразвуком (патент №2794512 от 19 апреля 2023), заключающийся в использовании одновременно двух инструментов – инденторов, установленных со смещением кратным  $0,5S_{\text{пр}}$ , одному из которых сообщаются ультразвуковые колебания.

8. На основе проведенных исследований разработаны комбинированные технологические процессы ППД с применением ультразвука. Технологии

переданы для опытно-промышленного внедрения на ООО "МЕРКАТОР ХОЛДИНГ"; ожидаемый экономический эффект складывается из применения недорогих сталей, сокращения количества операций и повышения производительности технологического оборудования.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

#### **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных списком ВАК:**

1. Приходько, В. М. Ультразвук в комбинированных технологиях машиностроения / В. М. Приходько, Р. И. Нигметзянов, Д. С. Симонов [и др.] // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 9(111). – С. 21-26. – DOI 10.30987/2223-4608-2020-9-21-26.

2. Нигметзянов, Р. И. Исследование воздействия ультразвуковых колебаний на процесс сборки резьбовых соединений / Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов, Д. С. Фатюхин, Д. С. Симонов // СТИН. – 2021. – № 3. – С. 35-37.

3. Приходько, В. М. Ультразвук в гибридных технологиях производственных процессов / В. М. Приходько, Д. С. Симонов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3(77). – С. 191-196. – DOI 10.34771/UZSERU.2022.77.3.037.

4. Приходько, В. М. Применение гибридных ультразвуковых технологий для получения функциональных покрытий / В. М. Приходько, Д. С. Симонов, А. В. Сухов [и др.] // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 3(129). – С. 27-31. – DOI 10.30987/2223-4608-2022-3-27-31.

5. Чудина, О. В. Комбинированная технология поверхностного упрочнения конструкционных сталей (закалка ТВЧ + ультразвуковая обработка) / О. В. Чудина, В. М. Приходько, Д. С. Симонов, П. Брингулис // СТИН. – 2022. – № 9. – С. 19-22.

#### **Статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Scopes и Web of Science:**

6. Nigmatzyanov R. I., Sundukov S. K., Fatyukhin D. S., Sukhov A. V., Simonov D. S. Ultrasonic Preparation of Coating Surfaces // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 398. – С. 01041.

7. Chudina O. V., Prikhodko V. M., Simonov D. S. Theory and Practice of Creation Highly Effective Combined Processes for Surface Hardening of Parts of Transport Engineering // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 398. – С. 01042.

8. Chudina O. Simonov D. et al. Effective combined surface hardening processes of structural steels using ultrasound // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 431. – С. 06024.

#### **Свидетельство о государственной регистрации патента и программы для ЭВМ:**

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666260 Российская Федерация. Расчет поверхностно-пластического деформирования с ультразвуком по заданным параметрам: № 2022665524: заявл. 16.08.2022: опубл. 29.08.2022 / Д. С. Симонов, В. С. Ершов, А. А. Акулов, Д. С. Талдыкин.

10. Патент № 2794512 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Способ комбинированной обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием с использованием ультразвуковых колебаний: № 2022117488: заявл. 28.06.2022: опубл. 19.04.2023 / В. М. Приходько, Д. С. Симонов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет.

#### **Публикации в материалах конференций:**

11. Чудина, О. В. К вопросу разработки высокоэффективных комбинированных процессов поверхностного упрочнения деталей транспортного машиностроения / О. В. Чудина, В. М. Приходько, Д. С. Симонов // Технологическое обеспечение и повышение

качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли: сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей, Брянск, 05–07 октября 2022 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2022. – С. 178-183.

12. Приходько, В. М. Комбинированные технологии ультразвукового пластического деформирования и азотирования / В. М. Приходько, Д. С. Симонов // Наука и техника в дорожной отрасли: Материалы конференции, Москва, 18 марта 2021 года. Том 2. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 85-86.

13. Приходько, В. М. Повышение эффективности технологических процессов жизненного цикла поверхностно-модифицированных изделий транспортной техники / В. М. Приходько, Э. Дьедоне, Д. С. Симонов // Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении: материалы XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей, Тамбов, 06–09 октября 2020 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 124-129.

14. Приходько, В. М. Комбинирование технологии ультразвукового пластического деформирования и азотирования / В. М. Приходько, Д. С. Симонов, Л. Я. Кеблани, Э. Дьедонне // Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе: Материалы XI Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей, Калининград, 10–13 сентября 2019 года. – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2020. – С. 85-94.