

На правах рукописи

СУХОВ АЛЕКСАНДР ВАДИМОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ И РАЗБОРКИ
РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Специальность 2.5.6. – Технология машиностроения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 2025

Работа выполнена на кафедре «Технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».

- | | |
|------------------------|---|
| Научный руководитель | - Фатюхин Дмитрий Сергеевич ,
доктор технических наук, доцент |
| Официальные оппоненты: | - Бекренев Николай Валерьевич ,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Техническая механика и мехатроника" ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» |
| | - Польский Евгений Александрович ,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Технология машиностроения" ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» |
| Ведущая организация | - ФГБОУ ВО "Донской государственный технический университет" |

Защита состоится «21» мая 2025 г. в 12:00 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 на сайте <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/sukhov-aleksandr-vadimovich>.

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.277.01
доктор технических наук, доцент

Нагоркин Максим Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Конкурентоспособность современной машиностроительной продукции определяется её качеством и эксплуатационными свойствами. Особые требования предъявляются к изделиям транспортного машиностроения, работающим в тяжёлых условиях эксплуатации, в том числе экстремальных.

Наиболее распространенным видом разборных соединений является резьбовое, позволяющее проводить сборку и разборку изделий без их повреждения, создавать требуемые прочность и жесткость соединения, обеспечивать долговечность и сохраняемость конструкции, а также её ремонтпригодность. Резьбовые соединения размеров М8...М24 и их дюймовые аналоги 5/16"...1" составляют порядка 70% всех соединений транспортных средств (например, болты заднего моста тракторов John Deere), на которые приходится 25 ... 30% трудоемкости сборки и 25...64 % трудоемкости разборочных работ. По разным оценкам, до 15 ... 20% отказов техники в процессе эксплуатации связано с резьбовыми соединениями. Основными причинами нарушения эксплуатационных характеристик резьбовых соединений являются самоотвинчивание соединений и уменьшение осевой силы вследствие действий знакопеременных и вибрационных нагрузок (например, самоотвинчивание колесных болтов). Перечисленные причины могут приводить не только к отказам отдельных сборочных единиц и агрегатов, но и конструкций и изделий в целом.

Вопросам, связанным с повышением эксплуатационных свойств резьбовых соединений при сборке посвящено большое число работ. Значительное их количество направлено на разработку конструктивных изменений деталей соединений или на создание технологий, основанных на использовании клеев и герметиков, что увеличивает трудоемкость и стоимость как проектирования, так и изготовления соединения. Кроме того, перечисленные способы создают значительные трудности при разборке резьбовых соединений. Наиболее важными факторами, определяющими эксплуатационные свойства резьбового соединения как при сборке, так и при разборке, являются деформация элементов соединения и равномерность распределения нагрузки на витках резьбы, которые в основном зависят от характера трения. Перспективным направлением повышения эксплуатационных свойств резьбовых соединений является применение ультразвуковых колебаний (УЗК), которое позволяет изменить характер трения при сборке и разборке, а также не требует увеличения трудоемкости изготовления элементов соединения и дополнительных материалов.

Влиянию ультразвуковых колебаний на повышение эффективности процессов сборки и разборки различных соединений деталей машин посвящено значительное количество исследований, в частности, значительный вклад внесли работы Приходько В.М., Казанцева В.Ф., Неверова А.Н., Елизарова В.А., Шуваева В.Г., Штрикова Б.Л., Теплякова А.Ю. и др. Положительный опыт применения ультразвука для интенсификации процессов сборки и разборки позволяет снизить риск отказов техники, увеличить ресурс и открывает возможности для применения элементов резьбового соединения меньших типоразмеров или уменьшению количества резьбовых деталей в изделии без потери качества.

Анализ показал, что в вышеуказанных работах исследуется воздействие одного типа колебаний (преимущественно продольных, реже крутильных) на соединения одного типоразмера (как правило, в пределах М6...М10). Это не позволяет провести полноценное сравнение эффективности различных типов как для сборки, так и для разборки соединений. Пути совершенствования сборки и разборки резьбовых соединений с применением ультразвука являются: выявление и оптимизация таких значимых технологических характеристик, как амплитуда колебаний излучателя; выбор эффективного вида колебаний (продольных, продольно-крутильных, сдвиговых); создание рациональных технологических решений, обеспечивающих повышение качества резьбовых соединений;

разработка и создание цифровых продуктов, позволяющих выбирать и поддерживать оптимальные технологические режимы.

На основании вышеизложенного можно констатировать, что совершенствование технологий сборочно – разборочных работ, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств резьбовых соединений, является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью является повышение эксплуатационных свойств резьбовых соединений путём создания равномерной нагрузки в витках резьбы, предотвращения самоотвинчивания соединений, обеспечения осевой силы без увеличения начального момента завинчивания при сборке; уменьшения требуемого момента отвинчивания и снижения риска повреждения элементов соединения при разборке, за счёт применения ультразвуковых колебаний.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ эффективности воздействия ультразвуковых колебаний различного типа (продольных, продольно-крутильных, сдвиговых) на равномерность распределения нагрузки по виткам резьбы и изменение силы трения в резьбовом соединении при сборке и разборке.

2. Разработать модели силового взаимодействия элементов резьбового соединения при сборке и разборке при приложении продольных, продольно-крутильных, сдвиговых ультразвуковых колебаний.

3. Выявить закономерности влияния акустико-технологических параметров ультразвука (амплитуда колебаний, время воздействия, температура элементов соединения) на изменения моментов завинчивания и отвинчивания резьбовых соединений различных типоразмеров.

4. Провести экспериментальные исследования влияния ультразвукового воздействия на изменение момента отвинчивания резьбовых соединений различных размеров, собранных при нормативных моментах завинчивания.

5. Разработать инструменты и технологическую оснастку для передачи ультразвуковых колебаний различного типа (продольных, продольно-крутильных, сдвиговых) собираемому или разбираемому соединению.

6. Разработать аппаратно-программный комплекс, позволяющий поддерживать заданные технологические режимы работы ультразвукового оборудования при осуществлении сборки и разборки резьбовых соединений.

7. Разработать технологические рекомендации по совершенствованию процессов сборки и разборки резьбовых соединений различных типоразмеров, в том числе расположенных в труднодоступных местах, с применением продольных, продольно-крутильных и сдвиговых ультразвуковых колебаний.

Объект исследований – технология сборки и разборки резьбовых соединений размеров М8...М24 с применением ультразвуковых колебаний различных типов.

Предмет исследований – выявление рациональных схем сборки и разборки резьбовых соединений размеров М8...М24, как наиболее часто используемых в транспортном машиностроении, с применением ультразвука, а также технологических режимов, обеспечивающих при сборке равномерное распределение напряжений в витках резьбы, предотвращение самоотвинчивания соединений, обеспечение требуемой осевой силы в совокупности со снижением нормативного момента завинчивания; при разборке уменьшение требуемого момента отвинчивания и снижение риска повреждения элементов соединения при разборке.

Методы исследования.

При выполнении работы использованы основополагающие фундаментальные положения теории трения и технологии машиностроения, современный математический аппарат, планирование эксперимента, статистические методы исследования с использованием пакетов Microsoft Excel, Statsoft Statistica 10. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных технических средств, таких как

контурограф модели 200, профилометр модели 130, универсальная испытательная машина (разрывная машина) УТС-110М-50-0У.

Достоверность результатов подтверждается взаимодополняющими экспериментальными исследованиями с применением широкого спектра современных методов, использованием поверенного современного измерительного оборудования, статистическим подтверждением адекватности предложенных моделей и результатов экспериментальных исследований, которые не противоречат данным, опубликованным другими авторами.

Научная новизна полученных результатов:

1. Выявлена и описана полиномиальными зависимостями взаимосвязь основных акустико-технологических параметров процесса сборки (амплитуды колебаний, массы и температуры элементов соединения) с относительным моментом отвинчивания, характеризующим осевую силу, создаваемую в соединении для трех типов колебаний – сдвигового, продольного и продольно-крутильного (п. 3 паспорта научной специальности 2.5.6.).

2. В зависимости от типа колебаний при сборке достигнуто повышение момента отвинчивания на 25...50%, при разборке – снижение требуемого усилия отвинчивания на 8...50%. Установлено, что применение колебаний сдвигового типа в 1,7 раза эффективнее колебаний продольного типа и в 2 раза эффективнее колебаний продольно-крутильного типа (п. 4 паспорта научной специальности 2.5.6.).

3. Разработан метод сборки и разборки резьбовых соединений, основанный на применении ультразвуковых колебаний сдвигового типа, обеспечивающий снижение динамической нагрузки на срез на 23% (п. 4, 5 паспорта научной специальности 2.5.6.).

Практическая значимость работы заключается в:

1. Разработке технологических рекомендаций по сборке и разборке резьбовых соединений, в том числе расположенных в труднодоступных местах, с применением продольных, продольно-крутильных и сдвиговых ультразвуковых колебаний.

2. Разработке ультразвуковых инструментов и оснастки, обеспечивающих передачу колебаний различных типов собираемым или разбираемым резьбовым соединениям.

3. Разработке программного комплекса, включающего в себя базы данных технических характеристик ультразвукового оборудования и программу мониторинга ультразвуковой колебательной системы, которая позволяет поддерживать заданный технологический режим.

Положения выносимые на защиту:

1. Структура, этапы проведения и реализации комплекса исследований для выявления взаимосвязей факторов, позволяющих усовершенствовать процессы сборки и разборки резьбовых соединений, с эксплуатационными свойствами соединений.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния акустико-технологических факторов при сборке: на распределение напряжений в витках резьбы, предотвращение самоотвинчивания соединений, обеспечение требуемой осевой силы в совокупности со снижением нормативного момента завинчивания; при разборке: уменьшение требуемого момента отвинчивания и обеспечение разборки в щадящем режиме.

3. Усовершенствованные способы сборки и разборки резьбовых соединений с применением ультразвука, инструменты и оснастка для наложения ультразвуковых колебаний различного типа на элементы резьбового соединения.

4. Технологические рекомендации по выбору схем и режимов ультразвукового воздействия, обеспечивающие повышение эффективности процессов сборки и разборки резьбовых соединений различных типоразмеров, в том числе расположенных в труднодоступных местах, с применением продольных, продольно-крутильных и сдвиговых ультразвуковых колебаний

Апробация результатов работы. Материалы диссертации докладывались на международных конференциях и семинарах: XXXV сессия Российского акустического

общества (г. Москва, 2023 г.); XV Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (г. Москва, 2023 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты» (г. Махачкала, 2024 г.), ежегодные научно-методические конференции МАДИ в 2020 – 2025 гг.

Публикации. Основные результаты работы отражены в 9 печатных работах в различных журналах и сборниках трудов конференций, из которых 3 работы опубликованы в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных, и 3 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

По результатам исследований получен патент на полезную модель «Устройство для сборки и разборки резьбовых соединений» № 209808 U1 и патент на изобретение «Способ сборки и разборки резьбовых соединений» №RU 2822128 C1. Также разработано ПО, позволяющее осуществлять автоматический выбор технологии и оборудования для выбранного типоразмера соединения (Свидетельство № 2023621701, № 2022623243, № 2022682618), поддерживать заданный технологический режим, отображать акустико-технологические параметры в реальном масштабе времени, а также реализовать работу оборудования по специально заданной программе или в интерактивном режиме, в том числе при управлении процессом от внешнего компьютера (Свидетельство №2022663082).

Объём и структура диссертационной работы. Текст работы состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка источников, включающего в себя 134 наименования. Работа состоит из 182 страниц и включает в себя 85 рисунков, 28 таблиц и 138 формул.

Область исследований соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.5.6. - «Технология машиностроения» по следующим пунктам - №3, №4, №5.

Внедрение результатов работы

Результаты исследований внедрены в рабочий процесс предприятия ООО «Агро-Строительные Технологии», Государственного бюджетного учреждения города Москвы "Автомобильные дороги Юго-Западного административного округа", а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» на кафедре «Технология конструкционных материалов».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении приведено обоснование актуальности решаемой проблемы, цель, задачи, практическая ценность и научная новизна исследования.

В первой главе проведен анализ литературных источников, посвященных проблемам сборочно-разборочных операций резьбовых соединений, а также решению этих проблем с помощью ультразвуковых колебаний. Наиболее распространённые причины отказов резьбовых соединений связаны с ослаблением предварительной затяжки.

Определены наиболее значимые параметры, влияющие на повышение качества затяжки резьбового соединения – это сила трения на опорной поверхности и витках резьбы, амплитуда ультразвуковых колебаний, тип приложения ультразвуковых колебаний.

На основе проведенного анализа поставлены цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе обосновывается выбор материалов резьбового соединения, оборудования и методология проведения исследования. Представлены сведения о способах, схемах и режимах применения ультразвука для исследуемых соединений.

В работе рассмотрены болтовые соединения, состоящие из болта, гайки и шайбы, выполняющей роль проставки. Такие соединения широко распространены в автомобилестроении (крепление кузовных элементов, элементов обшивки, деталей подвески и навесного оборудования). В качестве элементов с наружной резьбой использовались оцинкованные болты М8...М24 с крупным шагом резьбы, нормальной точности, класс прочности 5.8. Контролировались такие параметры, как момент завинчивания, амплитуда, частота колебаний и температура резьбового соединения.

Исследовались относительный момент отвинчивания, геометрические параметры болта и параметры шероховатости. В качестве влияющих факторов рассматривались амплитуда колебаний, температура соединения и его масса. Амплитуда варьировалась в диапазоне 0...9 мкм, частота колебаний составляла 22 кГц, что обусловлено балансом эффективности и требований по безопасности.

В работе использовался комплекс ультразвукового оборудования, включающий в себя задающий генератор ГЗ-33, ультразвуковой генератор УЗГ-1.6-22, и магнитострикционную колебательную систему. Данный комплекс позволяет работать в широком диапазоне амплитуд и частот, а также имеет возможность смены инструмента.

Колебания классифицированы по способу передачи продольных колебаний излучателя относительно оси резьбового соединения: продольные; направленные перпендикулярно к оси болта, которые будем называть колебаниями сдвигового типа; продольно-крутильные колебания. Сравнение влияния на сборку резьбового соединения трех типов проведено с вариантами закрепления, приведенными на рисунке 1 (а-в). При продольных колебаниях инструмент колеблется вдоль оси соединения, крепление инструмента на соединение осуществляется с помощью фиксирующей крышки. При продольно-крутильных колебаниях предполагается установка собираемого соединения в торцевую головку, которая фиксируется в ультразвуковом инструменте, крутильную составляющую обеспечивают специальные вырезы на инструменте. Инструмент для сдвиговых колебаний представляет собой ступенчатый ультразвуковой излучатель с двумя скобами, между которыми закрепляются элементы резьбового соединения.

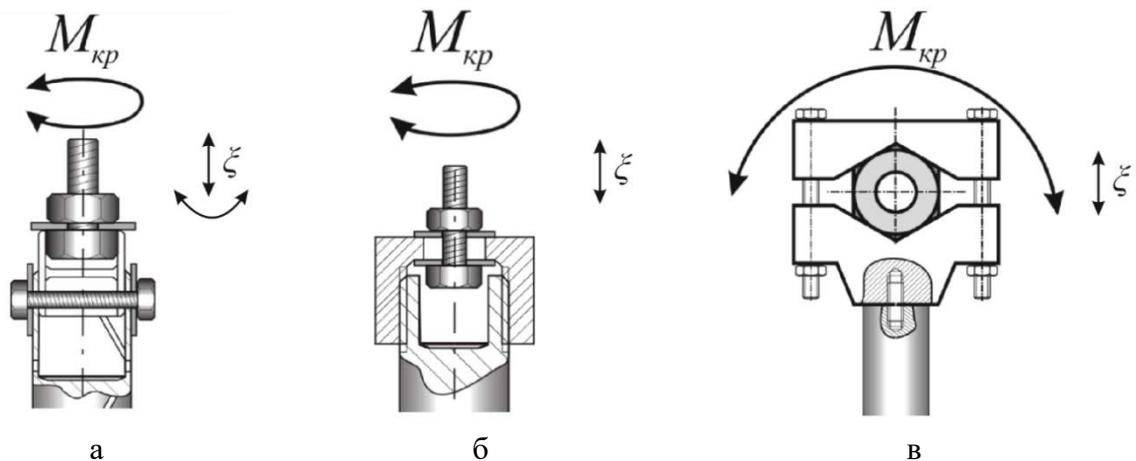


Рисунок 1 – Варианты закрепления резьбового соединения в инструменте для продольно-крутильных (а), продольных (б) и сдвиговых колебаний (в).

Анализ геометрии и параметров шероховатости выполнялся с использованием контурографа 220 и профилометра 130 (согласно ГОСТ 2789-73). Испытания на сдвиг проводились по оригинальной методике, позволяющей определить как усилие сдвига, так и динамику сдвиговых перемещений элементов соединения. Обработка результатов экспериментов проводилась в программе Statistica 10.

В третьей главе рассмотрены силы, возникающие в резьбовом соединении в процессах сборки и разборки с применением ультразвука и взаимосвязи между ними.

Наибольшее влияние на усилие затяжки оказывает коэффициент трения, который зависит в т. ч. и от геометрических параметров резьбового соединения, удельного давления, наличия и вида покрытия резьбы, шероховатости поверхностей трения, наличия и вида смазочного материала, повторяемости сборки, скорости завинчивания, а также жесткости соединения.

При рассмотрении силового взаимодействия, в случае применения ультразвуковых колебаний разных типов, при сборке был принят ряд упрощений и допущений – процесс сборки рассматривается как движение материальной точки по наклонной поверхности, за

материальную точку принята гайка, рассматривается момент времени перед началом движения гайки от болта после момента соударения, рассматривается соединение без резьбовых смазок и герметиков. При этом не учитывается неравномерность распределения нагрузки по виткам резьбы, шероховатость поверхности и деформации материала. Основными силами, действующими на соединение при сборке, являются такие силы, как сила завинчивания на ключе $F_{закр}$; сила трения $F_{тр}$, направленная в проекции в противоположную $F_{закр}$ сторону; осевая сила F_0 , направленная от головки болта; сила тяжести mg ; сила, возбуждаемая перемещением соединения с ультразвуковой частотой $F_{уз} = F \cos \omega t$; силы инерции $F_{ин}$.

При рассмотрении различных схем наложения ультразвуковых колебаний на собираемое соединение становится видно, что при разных схемах уравнения движения будут отличаться из-за различного направления действия сил (рисунок 2). Следует отметить, что ранее в работах, связанных с ультразвуковыми сборкой и разборкой, этому аспекту внимания практически не уделялось.

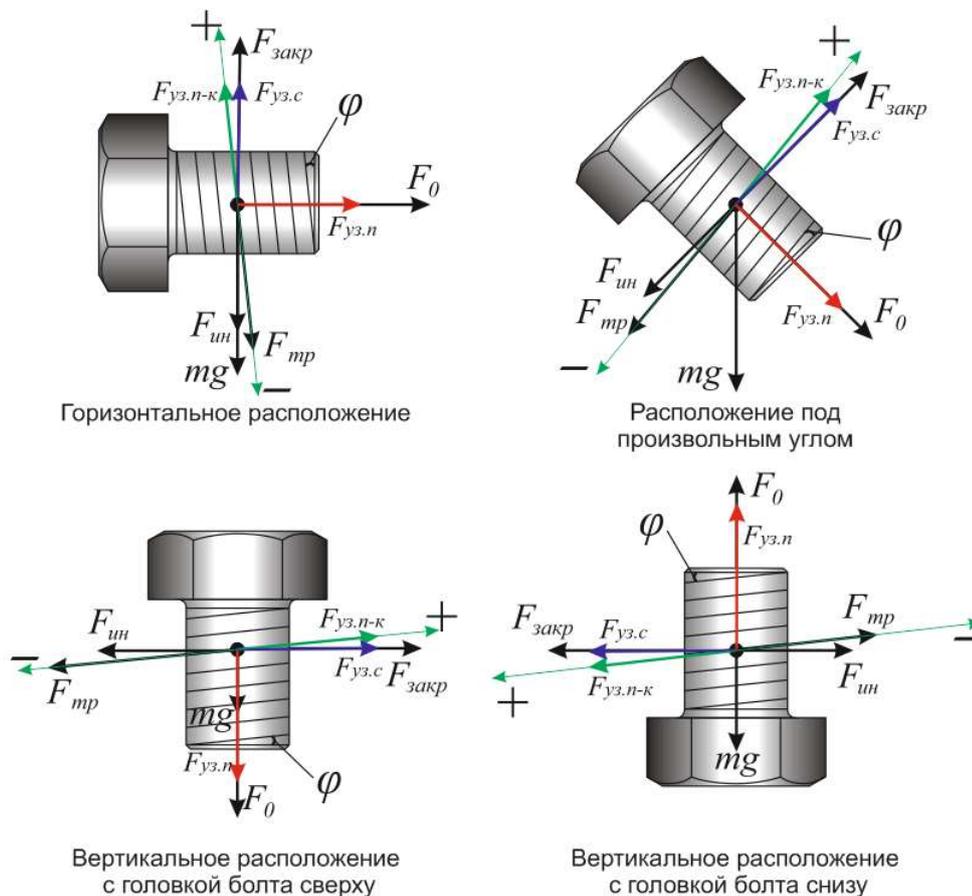


Рисунок 2 – схемы сил при наложении ультразвуковых колебаний продольного, продольно-крутильного и сдвигового типов на соединение при различных пространственных положениях

Так, при рассмотрении гайки как материальной точки, движущейся по наклонной плоскости в случае применения сдвиговых колебаний ($F_{уз.с}$) при вертикальном расположении соединения с головкой болта снизу, на нее действуют следующие силы (1):

$$F_{закр} \cos \varphi + F \cos \omega t \cos \varphi + mg \sin \varphi - F_{тр} - F_0 \sin \varphi - F_{ин} \cos \varphi = ma \quad (1)$$

Уравнение (1) в результате преобразования путем подстановки полных выражений сил принимает вид (2):

$$\frac{M_{кл}}{l} \cos \varphi + F \cos \omega t \cos \varphi + mg \sin \varphi - K P_c S - \frac{M_{кл}}{0.2d} \sin \varphi - (F_{ин} \sin^2 \omega t) \cos \varphi = ma, \quad (2)$$

Уравнение перемещений для (2) выглядит следующим образом (3):

$$\frac{M_{кл} * t^2}{2 * l * m} * \cos\varphi + \frac{F * \cos(\omega t) * \cos\varphi}{\omega^2 * m} + 0,5 * g * t^2 * \sin\varphi - \frac{K * P_c * S * t^2}{2 * m} - \frac{5 * M_{кл} * \sin\varphi * t^2}{2 * m * d} -$$

$$-(0,375 * \xi_m^2 * \omega^2 * k * t^2 * \sin 2kx * \cos\varphi * tg\varphi + 0,1875 * \xi_m^2 * k * \cos 2\omega t * \sin 2kx * \cos\varphi * tg\varphi) = s \quad (3)$$

Из (3) видно, что основными параметрами, влияющими на перемещение, являются масса m , амплитуда колебаний ξ_m , коэффициент трения K . В случае применения колебаний крутильного типа колебания могут направляться как в плоскости угла наклона резьбы φ , так и под некоторым углом наклона оси соединения к наклону резьбы, в зависимости от конструкции инструмента. Однако, даже в случае отсутствия параллельности винтовой линии резьбы и направления приложения колебаний движение гайки относительно болта задействует меньшую часть зазора между гайкой и болтом, в сравнении с продольным и крутильным типом колебаний.

В четвертой главе экспериментально рассмотрено влияние на сборку и разборку резьбового соединения с ультразвуком амплитуды. Для определения влияния массогабаритных параметров собираемого соединения на сборку были проведены исследования по сборке с помощью ультразвука различных типоразмеров соединений и сборке соединения одного типоразмера, но разной массы. Результаты исследования влияния амплитуды на сборку соединений различных типоразмеров для сдвиговых и продольных колебаний представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

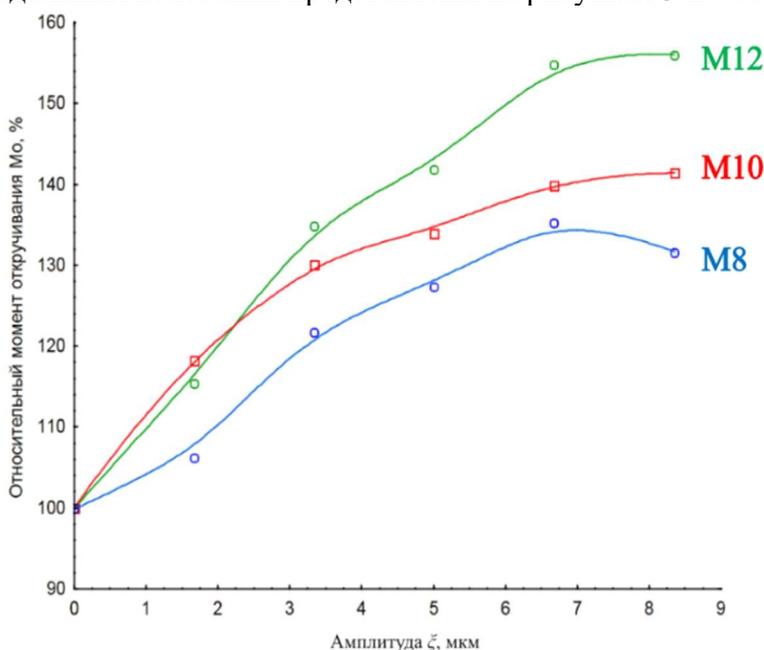


Рисунок 3 – Зависимость момента отвинчивания M_o от амплитуды колебаний для колебаний продольного типа

Вывявлено, что рост значений момента отвинчивания при продольных колебаниях наблюдается до амплитуды 7 мкм, после чего M_o либо начинает снижаться (для размера M8), либо значения M_o стабилизируются (для размеров M10 и M12) (рисунок 3). Кроме того, разные размеры имеют различное приращение значения момента отвинчивания. В случае колебаний сдвигового типа зависимости имеют сходный вид (рисунок 4). Рост момента отвинчивания замедляется на значениях амплитуды 5-6 мкм. Для размера M8 заметное снижение эффективности колебаний происходит уже после 5 мкм вследствие нагрева.

Различное приращение при продольных колебаниях объясняется влиянием массы элементов соединения на процесс сборки. Известно, что при продольных колебаниях тело на винтовой поверхности подвергается воздействию силы, стремящейся его сдвинуть в сторону узла механических деформаций. В исследовании соединение располагается вертикально, и помимо силы, способствующей самоотвинчиванию, на соединение действует сила тяжести, направленная в противоположную сторону. Поскольку с увеличением размера соединения увеличиваются масса гайки и болта, влияние силы

Вывявлено, что рост значений момента отвинчивания при продольных колебаниях наблюдается до амплитуды 7 мкм, после чего M_o либо начинает снижаться (для размера M8), либо значения M_o стабилизируются (для размеров M10 и M12) (рисунок 3). Кроме того, разные размеры имеют различное приращение значения момента отвинчивания. В случае колебаний сдвигового типа зависимости имеют сходный вид (рисунок 4). Рост момента отвинчивания замедляется на значениях амплитуды 5-6 мкм. Для размера M8 заметное

самоотвинчивания заметно снижается, что объясняет различное приращение значений момента отвинчивания.

Рост значений момента отвинчивания до амплитуды в 7 мкм объясняется влиянием температуры. Поскольку при данной схеме колебания передаются равномерно на соединение, гайка и болт начинают нагреваться одновременно вследствие потерь. Однако из-за разности масс гайка нагревается быстрее болта, поскольку обладает меньшей теплоемкостью. После нагрева гайки до 150 °С температура передается на инструмент, что влияет на условия сборки. Поскольку ультразвуковое воздействие является кратковременным, этот эффект проявляется только на размере М8, так как масса гайки относительно размеров М10 и М12 меньше в 2 и 3 раза соответственно.

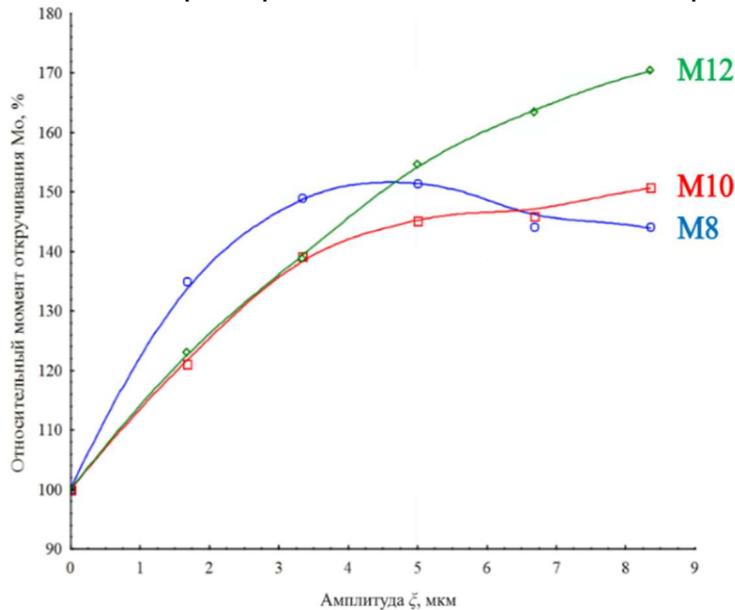


Рисунок 4 – Зависимость момента отвинчивания M_o от амплитуды колебаний для колебаний сдвигового типа

С целью определения влияния габаритных характеристик на акустико-технологические параметры была проведена оптимизация амплитуд для типоразмеров М8-М24, в качестве параметра оптимизации был определен M_o . Анализ показал, что для размеров М20 и выше значение амплитуды достигает 10 мкм, после чего рост прекращается (рисунок 5). Рост при увеличении размеров соединения свидетельствует о необходимости передачи большего количества

энергии для колебаний элементов резьбового соединения с целью преобразования трения в квазивязкое.

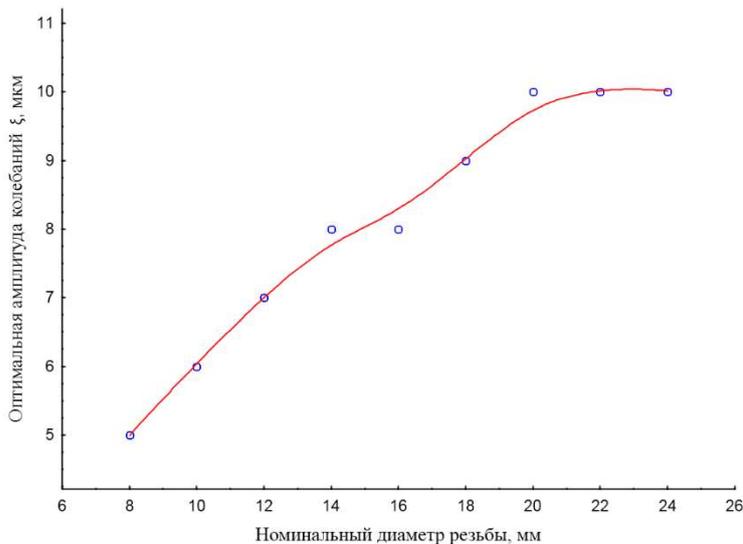


Рисунок 5 – Зависимость оптимальной амплитуды колебаний от номинального диаметра резьбы

Исследование влияния ультразвука на сборку соединения одного типоразмера с различной массой показали, что зависимость близка к линейной. Это объясняется линейным изменением массы за счет изменения длины болтов.

В рамках предварительных исследований был отмечен нагрев соединения при наложении ультразвука, в связи с чем в качестве влияющего фактора также рассматривалась температура. Для определения влияния температуры собираемого соединения были проведены

исследования по сборке с помощью ультразвука в диапазоне температур -15 °С ... 80 °С. В данном случае коэффициент детерминации $R^2=0,11$, коэффициент корреляции $R=0,33$ для остальных моделей значения R^2 и R меньше указанных. Значение F -статистики = 2,98 при

уровне значимости $p < 0,03722$, значение стандартной ошибки оценки = 3,6910. Учитывая вышеизложенное можно утверждать, что связь между фактором и откликом является слабой и практически не значимой, из чего можно сделать вывод, что на величину M_o температура соединения влияет незначительно.

Для определения одновременного влияния на собираемое соединение амплитуды колебаний, массы и температуры были проведены исследования по сборке с помощью ультразвука типоразмера М8. Анализ уравнения, полученного по методике Вознесенского В.А., показывает, что наибольшее влияние оказывает амплитуда колебаний, масса соединения влияет незначительно, а температура не влияет вообще (4).

$$Y = 140,95 + 36,75x_1 + 3,50x_3 \quad (4)$$

Анализ методом факторного анализа без поворота осей в среде Statistica показал схожий характер, за исключением наличия минимального отрицательного влияния температуры (5).

$$Y = 141,41 + 27,78x_1 - 0,17x_2 + 2,65x_3 \quad (5)$$

Факт такого расхождения косвенно подтверждается пограничным коэффициентом корреляции для зависимости M_o от температуры. Кроме того, результаты показывают отсутствие корреляции между факторами. Таким образом, можно утверждать, что значимыми факторами являются амплитуда и масса, и чем больше амплитуда колебаний и масса соединения – тем больше эффективность применения ультразвука на этапе сборки соединения в сравнении с традиционным методом сборки.

Наряду с массой и температурой влияющим фактором также является тип наложения колебаний на соединение, поскольку возникает разное количество энергетических потерь вследствие особенностей контакта инструмента и соединения. Для определения эффективности различных типов прилагаемых колебаний экспериментально рассмотрено влияние продольно-крутильных, продольных и сдвиговых ультразвуковых колебаний на сборку резьбового соединения. Сравнительный анализ полученных моделей показывает, что наиболее эффективным типом являются сдвиговые колебания (рисунок 6).

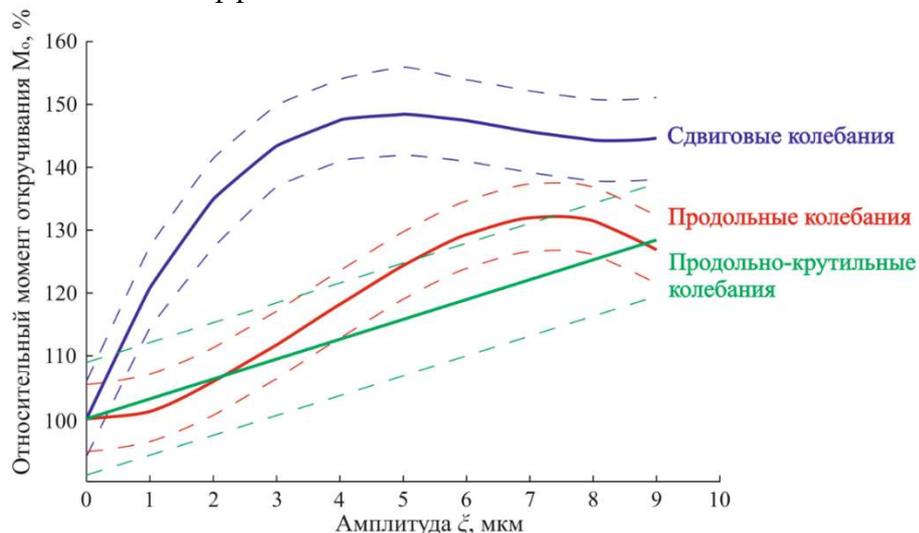


Рисунок 6 - Зависимости относительного момента отвинчивания M_o от амплитуды колебаний для размера М8 при различных типах колебаний, построенные по полученным математическим моделям

Сравнительный анализ полученных моделей показал, что диапазон оптимальных амплитуд составляет 5...8 мкм в зависимости от типа колебаний. Рост значений M_o до определенной амплитуды с последующим снижением, в случае продольного и сдвигового типов колебаний, объясняется увеличивающейся пластической деформацией микронеровностей, а также фактором массы, которая в зависимости от типа приложенных колебаний по-разному влияет на сборку. Более низкие значения эффективности для продольно-крутильных и продольных колебаний объясняются особенностями обеспечения

контакта инструмента с соединением и, как следствие, увеличением возникающих акустических потерь. Кроме того, рост M_o связан с более эффективным перераспределением напряжений по виткам резьбы, что подтверждается приведенными ниже экспериментальными данными.

В качестве примера приведены данные резьбового соединения с болтом M12-6h7h класса прочности 5.8. Установлено, что при завинчивании до 24,5 Н*м профиль резьбы болта не подвергается пластической деформации. Первые признаки прохождения порога деформации становятся заметны при 27 Н*м, при 29,5 Н*м деформация проявляется сильнее, что видно по второму витку резьбы болта, а при 32 Н*м происходит окончательный срыв резьбы на 2-4 витках при сильной деформации 5 витка.

В результате воздействия ультразвука при значениях $M_{закр}$ 29,5 и 32 Н*м признаков пластической деформации не наблюдается, и порог деформации смещается до 42 Н*м. Это подтверждает увеличение допустимого $M_{закр}$ при отсутствии повреждений собираемого соединения, и, как следствие, повышения эксплуатационных свойств соединения. Удлинение шага резьбы от витка резьбы для сравниваемых методов сборки при максимальном $M_{закр}$ приведено на рисунке 7.

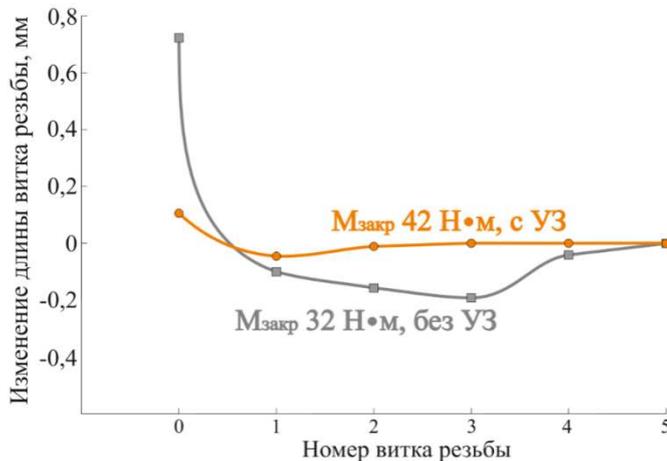


Рисунок 7 – Зависимость удлинения расстояния между витками резьбы от номера витка резьбы

Для болта, который не подвергался завинчиванию, характерен разброс значений длины витка, составляющий не более 1,5 %, что обуславливается погрешностями изготовления. В случае сборки без ультразвука при значении $M_{закр}$ 42 Н*м видно, что для первого витка его ширина изменяется на 8 %. На втором и третьем витках резьбы ширина изменяется до 12,6 % и 15,4 % соответственно, после чего изменение ширины снижается и на четвертом и пятом витках составляет уже 3,3 % и 0,15 % соответственно. В случае использования ультразвука ширина первого витка изменяется на 3,6 %, а для остальных витков разница в ширине становится равномерной и не превышает 1,3%, что сопоставимо с геометрическими параметрами болта до сборки. Также необходимо отметить, что нулевым витком в данном случае является виток, на месте которого установлена шайба, расположенная между головкой болта и гайкой. При таком расположении в первую очередь деформироваться начинает данный виток резьбы, а не переход «головка болта – стержень болта», вследствие чего упрощается фиксация изменения геометрии под воздействием пластических деформаций. Полученные результаты показывают увеличение равномерности распределения нагрузки по виткам резьбы в случае применения ультразвука за счет интенсификации процессов восстановления напряжений затяжки.

Увеличение M_o вследствие применения ультразвука происходит из-за изменения силы трения на опорных поверхностях и витках резьбы, что было проверено экспериментально. Исследование влияния ультразвуковых колебаний сдвигового типа при сборке на параметры шероховатости опорной поверхности гайки показало их изменения. Значения основных высотных и шаговых параметров шероховатости опорной поверхности гайки представлены в таблице 1, примеры профилограмм, полученных в результате измерений, приведены на рисунке 8.

Таблица 1 - Значения параметров шероховатости опорной поверхности гайки

Параметр	Гайка без завинчивания	Гайка, завинченная без применения УЗ	Гайка, завинченная с применения УЗ
Ra	0,47	0,32	0,28
Rz	3,05	1,94	1,56
Rmax	5,65	3,19	2,98
Sm	47,30	63,91	72,83
t _{p40}	15,68	23,52	49,14

Установлено, что при сборке с ультразвуком поверхность подвергается деформациям микрорельефа сильнее, чем при сборке без воздействия ультразвука. Так, если при обычной сборке высотные параметры снижаются на 30%, то при сборке с ультразвуком происходит снижение на 40%. При этом повышаются значения шаговых параметров, рост которых составляет 35% и 54% для обычной сборки и сборки с ультразвуком соответственно. Изменения шероховатости увеличивают силу трения на опорной поверхности, вследствие чего усилие на отвинчивание становится больше, что приводит к снижению вероятности самоотвинчивания соединения и, как следствие, повышению его эксплуатационных свойств. Также стоит отметить изменение относительной опорной длины профиля, значение которой при ультразвуке растет больше, чем при обычной сборке. Данные результаты объясняют рост M_o при использовании ультразвука на этапе сборки резьбового соединения.

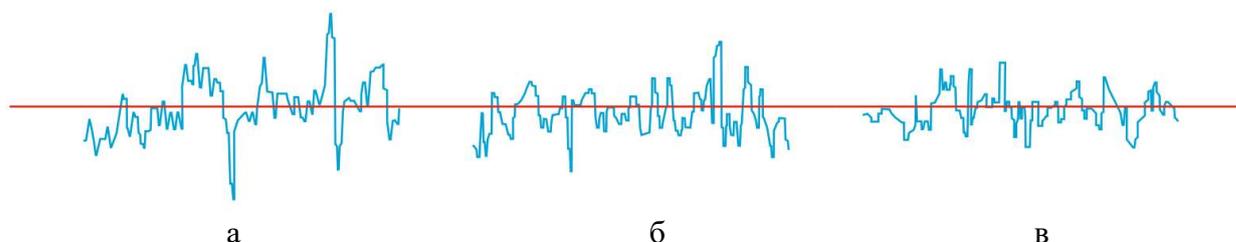


Рисунок 8 – Примеры профилограмм, полученных на гайке без завинчивания (а), гайке, завинченной без применения ультразвука (б) и гайке, завинченной с применением ультразвука (в)

Вышеописанные результаты характеризуют в том числе повышение осевого усилия в соединении при сборке с нормативным $M_{закр.}$ вследствие создания большей силы трения. Для подтверждения данного предположения было проведено испытание на сдвиг резьбовых соединений, сборка которых выполнялась с использованием сдвиговых колебаний и без использования ультразвука. После сравнительной оценки полученных результатов (рисунок 9) выявлено различие в прилагаемом усилии.

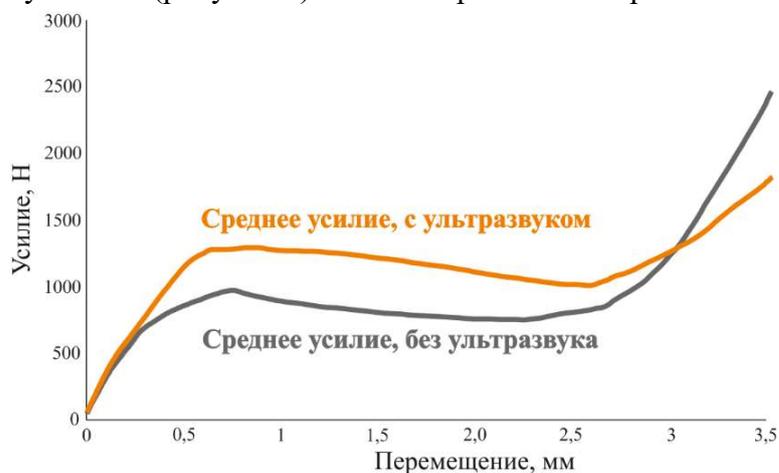


Рисунок 9 – Зависимость усилия сдвига от перемещения для различных методов сборки

Результаты показали, что среднее усилие на сдвиг для соединения, собранного с использованием ультразвука, превышает аналогичное усилие для соединения, собранного без ультразвука, на 45%. Результат обуславливается в том числе лучшим распределением нагрузки по виткам резьбы в сравнении со сборкой без применения ультразвука и повышением осевого усилия.

На рисунке 10 представлены изображения разреза наиболее нагруженных витков соединения, которые визуальнo демонстрируют равномерность зазора при применении ультразвука, и, как следствие повышение равномерности распределения нагрузки по виткам резьбы.

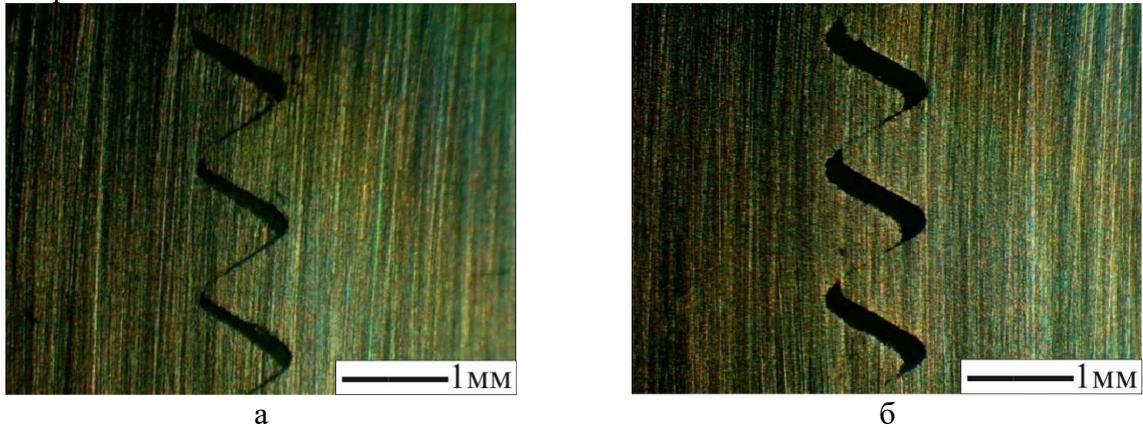


Рисунок 10 - Соединение, полученное без применения ультразвука (а) и с применением ультразвука (б)

При исследовании разборки сравнительный анализ показал, что наиболее эффективным типом колебаний также является сдвиговой (рисунок 11). Согласно полученным моделям, снижение показателя M_o для всех трех типов наложения колебаний происходит линейно. При этом при амплитуде 9 мкм эффективность различная – для колебаний сдвигового типа M_o снижается на 50%, для продольного – на 13%, а для продольно-крутильного – на 7%. В данном случае энергия, возникающая вследствие наложения колебаний, идет не на формирование осевой силы, а только на преодоление сил трения на опорной поверхности и на витках резьбы. Однако кривые имеют различный угол наклона, что обуславливается особенностями обеспечения контакта инструмента с соединением и, как следствие, возникающими потерями.

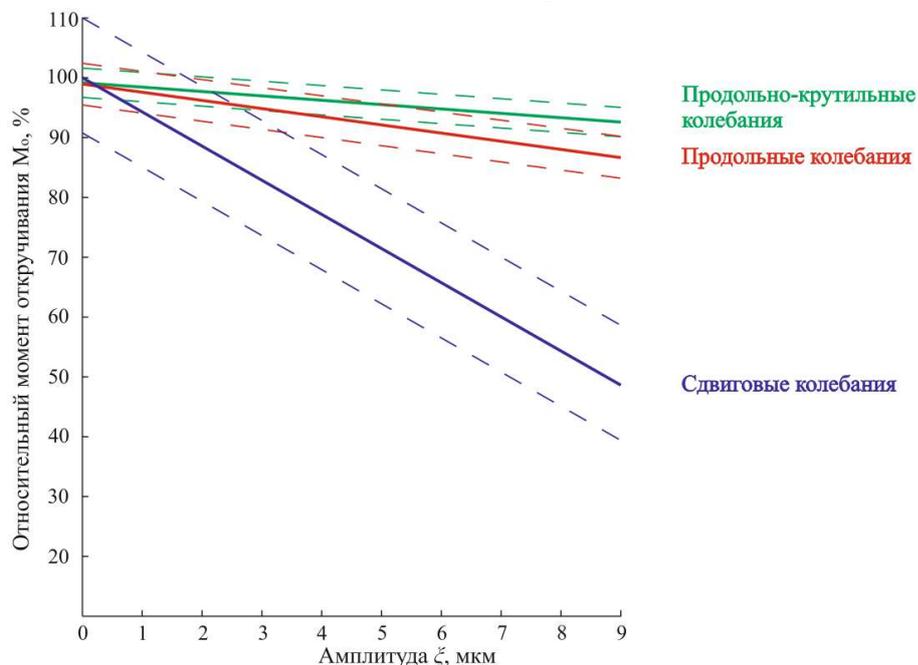


Рисунок 11 – Сравнительный график для трех типов колебаний при разборке соединения

Также было определено влияние ультразвука на разборку различных типоразмеров соединений при сдвиговых колебаниях (рисунок 12).

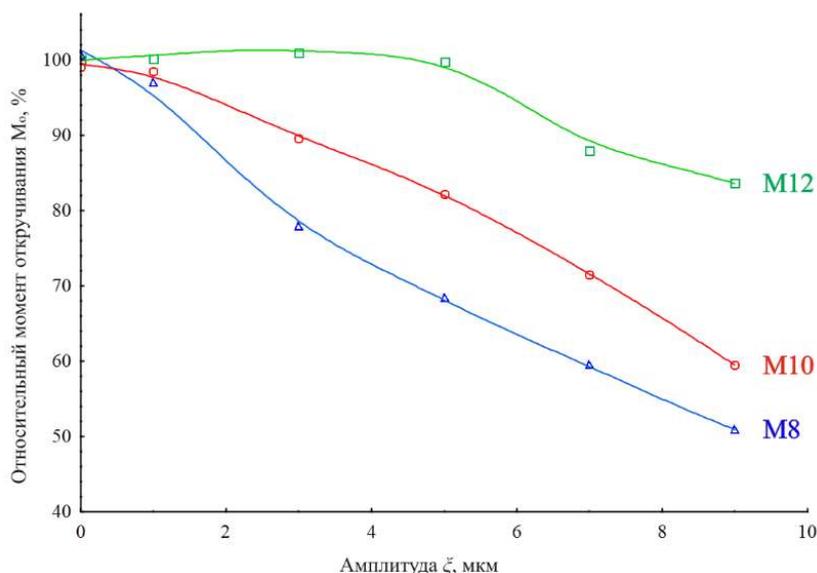


Рисунок 12 – Зависимость момента отвинчивания M_o от амплитуды колебаний сдвигового типа для типоразмеров M8, M10 и M12

разработанные ультразвуковые инструменты.

Предлагаемая технология за счет использования колебаний сдвигового типа позволяет проводить сборочно-разборочные операции в 1,7 раза эффективнее в сравнении с колебаниями продольного типа и в 2 раза эффективнее колебаний продольно-крутильного типа.

Технологические рекомендации по сборочным операциям с применением ультразвука представлены ниже (таблица 2):

1. Назначение: операция сборки резьбовых соединений типоразмеров M8...M24.
2. Оборудование: ультразвуковой генератор УЗГ-2-22, оригинальная 3-х полуволновая магнестрикционная колебательная система.
3. Инструмент: оригинальный комплект ультразвуковых концентраторов.

Таблица 2 - Технологические рекомендации по сборочным операциям с применением ультразвука

Параметр	Амплитуда колебаний, мкм			Время воздействия УЗК, сек.	Частота колебаний, кГц
	Сдвиговые	Продольные	Продольно-крутильные		
M8	5	6	7	2	22
M10	6	7	7		
M12	7	7	8		
M14	8	8	8		
M16	8	9	9		
M18	9	9	9		
M20	10	10	10		
M22	10	10	10		
M24	10	10	10		

Технологические рекомендации по разборочным операциям с применением ультразвука представлены ниже (таблица 3):

1. Назначение: операции сборки и разборки резьбовых соединений типоразмеров M8...M24.
2. Оборудование: ультразвуковой генератор УЗГ-2-22, оригинальная 3-х полуволновая магнестрикционная колебательная система.
3. Инструмент: оригинальный комплект ультразвуковых концентраторов.

Результаты показали снижение эффективности воздействия ультразвука при увеличении типоразмера соединения, то есть при одной амплитуде для большего типоразмера эффективность меньше, что объясняется увеличением необходимого количества передаваемой энергии для снижения сил трения на опорной поверхности и витках резьбы.

В пятой главе приведены разработанные рекомендации по применению ультразвука при сборке и разборке резьбовых соединений и

Примерами операций, где предполагаются к использованию предлагаемые рекомендации, являются такие операции, как: регулировка натяга в заднем мосту с планетарными шестернями трактора John Deere 7830 в рамках ремонтных воздействий, операции закрепления стяжных болтов надрамника, задних кронштейнов надрамника, осей опор рычагов торсионов, рессор задних опор кабины КАМАЗ 65115 в рамках операций ТО-2. Кроме того, за счет достигнутых эффектов возможно изменение периодичности для операций проверки и закрепления гаек крепления колес и болтов крепления ступиц, болтов крепления бортовых редукторов к корпусу заднего моста, лонжеронов к переднему брусу и к корпусу муфты сцепления самоходных машин на шасси МТЗ-82.1 с ТО-2 (500 м/ч) на ТО-3 (1000 м/ч).

Таблица 3 - Технологические рекомендации по разборочным операциям с применением ультразвука

Параметр	Амплитуда колебаний, мкм			Время воздействия УЗК, сек.	Частота колебаний, кГц
	Сдвиговые	Продольные	Продольно-крутильные		
М8	9	9	9	1	22
М10					
М12					
М14					
М16					
М18					
М20					
М22					
М24					

На основании установленных параметров акустико-технологического воздействия разработаны и рассчитаны рабочие инструменты – концентраторы для трех типов колебаний (рисунок 13), выполненные из титанового сплава ВТЗ-1.



Рисунок 13 – Концентраторы для сдвиговых колебаний (слева), продольных колебаний (по центру), продольно-крутильных колебаний (справа)

Концентратор для продольных колебаний представляет собой ступенчатый излучатель с полостью, предназначенной для установки торцевой головки, присоединяемой за счет резьбы с мелким шагом. Концентратор для продольно-крутильных колебаний аналогичен концентратору для продольных колебаний, за исключением выполненных вырезов, обеспечивающих крутильную составляющую. Концентратор для сдвиговых колебаний представляет собой ступенчатый излучатель с двумя скобами, между которыми закрепляются элементы резьбового соединения (Патент № 209808 U1).

Поскольку сборка и разборка резьбовых соединений большого диаметра требует высокого уровня излучаемой мощности, а также больших моментов закручивания – это создаёт дополнительные сложности использования ультразвукового оборудования.

В этих случаях колебания передаются от источника колебаний (колебательной системы) элементу разбираемого или собираемого соединения через ключ. Это создает значительные механические напряжения на колебательной системе, что снижает эффективность передачи колебаний, а также может приводить к деформации и разрушению

колебательной системы. С целью устранения перечисленных негативных последствий предложен способ и устройство для его реализации, при котором крутящий момент к элементу резьбового соединения прикладывают с помощью ключа, а ультразвуковое воздействие осуществляют излучателем, жестко соединенным с любым из элементов резьбового соединения - болтом или гайкой, передавая упомянутому элементу ультразвуковые колебания в продольном или поперечном направлениях к оси резьбы (Патент № 2822128 С1).

Также разработано и получены свидетельства на ПО, позволяющее повысить эффективность управления технологическим процессом (свидетельства на БД № 2023621701, № 2022623243, программы для ЭВМ № 2022663082, № 2022682618). ПО позволяет автоматически определить резонансные параметры ультразвуковой колебательной системы во время работы с последующей их корректировкой для соответствия их условиям работы на основании данных из БД.

Результаты внедрения предлагаемой технологии в производственный процесс ООО «Агро-Строительные Технологии» показали, что применение ультразвука позволяет не только повысить ремонтпригодность соединения, но и проводить регулировочные операции. Так, при регулировке натяга в заднем мосту с планетарными шестернями трактора John Deere 7830, которая осуществляется путем завинчивания болта с заглушкой размерами 25,3 x 101,6 мм, применение ультразвука позволяет снизить момент завинчивания на 15...20% без изменения эксплуатационных характеристик заднего моста. Также результаты внедрены в производственный процесс ГБУ города Москвы «Автомобильные дороги ЮЗАО».

Заключение.

Работа содержит комплекс технических и технологических решений, направленных на повышение эксплуатационных свойств резьбовых соединений (при сборке: равномерное распределение напряжений в витках резьбы, предотвращение самоотвинчивания соединений, обеспечение требуемой осевой силы в совокупности со снижением нормативного момента завинчивания; при разборке: уменьшение требуемого момента отвинчивания и снижения риска повреждения элементов соединения при разборке) за счёт применения ультразвуковых колебаний. Получены следующие основные выводы, научные и практические результаты:

1. На основании выполненных исследований решена научно-практическая задача, заключающаяся в обеспечении повышенных эксплуатационных свойств резьбовых соединений путём создания равномерной нагрузки в витках резьбы, предотвращения самоотвинчивания соединений, повышения осевой силы без увеличения начального момента завинчивания при сборке; уменьшения требуемого момента отвинчивания и снижения риска повреждения элементов соединения при разборке, за счёт применения ультразвуковых колебаний.

2. Предложены способы сборки и разборки резьбовых соединений, основанные на использовании продольных, продольно-крутильных и сдвиговых колебаний. В результате проведения экспериментальных исследований получены зависимости распределения напряжений в витках резьбы и требуемого начального момента завинчивания от акустико-технологических режимов применения ультразвука, которые обеспечивают повышение усилия на сдвиг соединения на 45%, а также возможность снижения нормативного момента завинчивания на 30% без уменьшения осевого усилия.

3. Аналитическими и экспериментальными исследованиями и методами сравнительных испытаний обоснована и доказана эффективность применения ультразвука при сборочно-разборочных операциях. В зависимости от способа передачи колебаний при сборке достигнуто повышение требуемого момента отвинчивания на 25...50%, при разборке – снижение требуемого усилия отвинчивания на 8...50%. Установлено, что колебания сдвигового типа в 1,7 раза эффективнее колебаний продольного типа и в 2 раза эффективнее колебаний продольно-крутильного типа.

4. Предложены физические модели и их математические интерпретации, описывающие изменения характера трения и механического взаимодействия элементов резьбового соединения при наложении высокочастотных колебаний различного типа (продольных, продольно-крутильных, сдвиговых). Установлено, что значимыми факторами при использовании всех перечисленных типов колебаний одновременно являются амплитуда колебаний ξ_m и масса соединения.

5. Установлены зависимости требуемого момента отвинчивания от акустических параметров при приложении продольных и сдвиговых колебаний. Определены акустические параметры, обеспечивающие повышение требуемого момента отвинчивания на 30...70% для типоразмеров соединений М8...М24. При частоте работы колебательной системы 22 кГц оптимальным является диапазон амплитуд $\xi_m=5...10$ мкм.

6. Спроектированы и изготовлены технологическое оборудование и оснастка, предназначенные для реализации предлагаемых технологических решений. Получены патенты на ультразвуковой инструмент № 209808 U1 и способ сборки и разборки резьбовых соединений № 2822128 C1.

7. Разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять автоматический выбор технологии и оборудования для выбранного типоразмера соединения (Свидетельство № 2023621701, № 2022623243, № 2022682618, № 2023623731), поддерживать заданный технологический режим, отображать акустико-технологические параметры в реальном масштабе времени, а также реализовать работу оборудования по специально заданной программе или в интерактивном режиме, в том числе при управлении процессом от внешнего компьютера(Свидетельство №2022663082).

8. Разработаны технологические рекомендации по сборке и разборке резьбовых соединений, позволяющие повысить их эксплуатационные свойства. Для сборки частота колебаний составляет 22 кГц, время сборки 2 с, амплитуда колебаний для сдвигового типа 5...10 мкм, для продольных 6...10 мкм, для продольно-крутильных 7...10 мкм в зависимости от собираемого размера. Для разборки частота колебаний составляет 22 кГц, время разборки 1 с, амплитуда колебаний 9 мкм.

9. Результаты работы внедрены в ООО «Агро-Строительные Технологии», ГБУ города Москвы «Автомобильные дороги ЮЗАО» и используются в учебном процессе Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Особенности сборки резьбовых соединений различных размеров при использовании сдвиговых ультразвуковых колебаний / Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов, Д. С. Фатюхин // Научно-технические в машиностроении. – 2021. – № 12(126). – С. 26-30. – DOI 10.30987/2223-4608-2021-12-26-30.

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

3. Сборка резьбовых соединений под воздействием сдвиговых ультразвуковых колебаний / А. А. Нечай, Р. Н. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов, Д. С. Фатюхин // СТН. – 2021. – № 12. – С. 16-19.

Публикации в изданиях из перечня SCOPUS

4. Comprehensive Estimation of Changes in the Microgeometry of Steel 45 by Ultrasonic Plastic Deformation with a Free Deforming Element / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, V. M. Prikhodko, A. V. Sukhov, S. K. Sundukov // Metals. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 114. – DOI 10.3390/met13010114.

5. Influence of Various Kinds of Ultrasonic Treatment on Surface Geometry / R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov, A. V. Sukhov, V. M. Prikhodko, D. S. Fatyukhin // Steel in Translation. – 2023. – Vol. 53, No. 11. – P. 954-957. – DOI 10.3103/S0967091223110232.

6. Sukhov, A. Assembly of threaded and adhesive-threaded joints with the application of ultrasonic vibrations / A. Sukhov, S. Sundukov, D. Fatyukhin // *Obrabotka Metallov.* – 2024. – Vol. 26, No. 3. – P. 6-23. – DOI 10.17212/1994-6309-2024-26.3-6-23.

Научные статьи, опубликованные в материалах международных, всероссийских и межрегиональных конференций

7. Сухов, А. В. Влияние ультразвуковых колебаний на качество сборки резьбового соединения / А. В. Сухов, С. А. Фомушкина // Сборник Трудов XXXV сессии Российского акустического общества, Москва, 13–17 февраля 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство ГЕОС", 2023. – С. 901-906. – DOI 10.34756/GEOS.2023.17.38547.

8. Сухов, А. В. Совершенствование технологии сборки и разборки резьбовых соединений с помощью ультразвука / А. В. Сухов, Д. С. Фатюхин // *Наукоемкие технологии в машиностроении : Материалы XV Международной научно-технической конференции.* В 2-х томах, Москва, 01–03 ноября 2023 года. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – С. 13-16.

9. Кольдюшов, В. К. Повышение качества сборки резьбовых соединений за счет применения ультразвука / В. К. Кольдюшов, А. В. Сухов, С. А. Фомушкина // *Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты: Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции,* Махачкала, 11–12 октября 2024 года. – Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2024. – С. 70-73.

Патенты и свидетельства

10. Патент на полезную модель № 209808 U1 Российская Федерация, МПК В25В 21/00, В23Р 19/06. Устройство для сборки и разборки резьбовых соединений : № 2021119116 : заявл. 30.06.2021 :опубл. 23.03.2022 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет”.

11. Патент № 2822128 С1 Российская Федерация, МПК В25В 21/00. способ сборки и разборки резьбовых соединений: № 2023112747 : заявл. 17.05.2023 :опубл. 01.07.2024 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет.

12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621701 Российская Федерация. База данных технических характеристик ультразвуковых преобразователей : № 2023621226 : заявл. 04.05.2023: опубл. 25.05.2023 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов, С. А.Фомушкина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет ".

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663082 Российская Федерация. Мониторинг ультразвуковой колебательной системы : № 2022662789: заявл. 11.07.2022: опубл. 11.07.2022 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов, С. А. Фомушкина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет ".

14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623243 Российская Федерация. База данных технических характеристик ультразвуковых генераторов : № 2022623151 : заявл. 24.11.2022 :опубл. 05.12.2022 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов, С. А. Фомушкина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет ".

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682618 Российская Федерация. Расчёт цилиндрического излучателя ультразвуковой колебательной системы: № 2022682417: заявл. 24.11.2022: опубл. 24.11.2022 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов, С. А. Фомушкина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет".

16. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023623731 Российская Федерация. База данных ультразвуковых технологических установок и оборудования: № 2023623465 : заявл. 20.10.2023: опубл. 02.11.2023 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, А. В. Сухов, С. А. Фомушкина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».