



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Сборка резьбовых и клеерезьбовых соединений с наложением ультразвуковых колебаний

Александр Сухов ^{a, *}, Сергей Сундуков ^b, Дмитрий Фатюхин ^c

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Россия

^a  <https://orcid.org/0009-0009-9097-8216>,  sukhov-aleksandr96@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>,  sergey-lefimo@yandex.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>,  mitriy2@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 534-8 + 621.813 + 62-771

История статьи:

Поступила: 24 апреля 2024

Рецензирование: 14 мая 2024

Принята к печати: 05 июня 2024

Доступно онлайн: 15 сентября 2024

Ключевые слова:

Ультразвук

Сборка

Ультразвуковые колебания

Резьбовое соединение

Клеерезьбовое соединение

Эпоксидная смола

Финансирование

Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FFSM-2024-0001.

АННОТАЦИЯ

Введение. Основной проблемой при эксплуатации резьбовых соединений является уменьшение усилия предварительной затяжки под действием рабочих нагрузок, которые способствуют релаксации напряжений в элементах соединения. Основными направлениями интенсификации сборочных операций с целью повышения эксплуатационных свойств резьбового соединения являются совершенствование конструкции соединений и использование клеевых составов, которые после полимеризации препятствуют раскручиванию. Одним из способов модернизации сборки является применение ультразвуковых колебаний, позволяющих воздействовать на распределение сил, возникающих при сборке, а также обрабатывать клей для повышения его свойств. **Методика исследований.** Экспериментальные исследования проводились в три этапа. На первом этапе оценивалось влияние сдвиговых ультразвуковых колебаний на процесс сборки резьбового соединения. В качестве комплексного показателя, определяющего эффективность воздействия, предложен относительный момент откручивания, который учитывает изменение момента закручивания в условиях колебаний и увеличение момента откручивания после сборки. На втором этапе проводились исследования по влиянию ультразвуковой обработки на свойства эпоксидного клея в жидком (вязкость) и полимеризованном (субмикроструктура, микротвердость, сдвиговое напряжение) состоянии. На третьем этапе производилась сборка клеерезьбового соединения с одновременным добавлением клея и наложением колебаний. **Результаты и обсуждение.** Наложение сдвиговых ультразвуковых колебаний с амплитудой от 5 до 9 мкм приводит к повышению относительного момента откручивания в 1,5 раза, что связано с созданием дополнительной силы, способствующей закручиванию, и уменьшением трения, которое приобретает особенности квазивязкого. При этом ультразвук повышает равномерность распределения нагрузки по виткам резьбы, что подтверждается отсутствием их деформации при большем моменте закручивания. Ультразвуковая обработка клея при амплитудах 8...12 мкм приводит к снижению вязкости до 70–80 % и повышению прочности до 24 %, что объясняется действием кавитации и акустических потоков. Сборка клеерезьбового соединения при амплитуде колебаний 9 мкм сочетает в себе эффекты, способствующие закручиванию и обеспечивающие повышение свойств клея. В результате такое соединение имеет относительный момент откручивания в 1,95 раза больший по сравнению с контрольным.

Для цитирования: Сухов А.В., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Сборка резьбовых и клеерезьбовых соединений с наложением ультразвуковых колебаний // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 6–23. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-6-23.

Введение

В современных условиях для обеспечения конкурентоспособности изделий машиностроения предъявляются жесткие требования к качеству изделий и повышению технологичности их производства. Особое внимание уделяется

изделиям машиностроения, которые работают в различных экстремальных условиях эксплуатации, в том числе в таких регионах, как Арктика. В этих случаях особенно важна надежность техники, что в значительной степени определяется качеством сборки соединений.

Одним из наиболее распространенных видов соединений является резьбовое, позволяющее проводить сборку и разборку изделий без их повреждения. Примерно 70 % всех соединений составляют резьбовые, на которые приходится 25–30 % трудоемкости сборки и 25–64 % тру-

*Адрес для переписки

Сухов Александр Вадимович, аспирант
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Ленинградский проспект, 64,
125319, г. Москва, Россия
Тел.: +7 926 926-82-97, e-mail: sukhov-aleksandr96@mail.ru

доемкости разборочных работ [1, 2]. По разным оценкам до 15–20 % отказов техники в процессе эксплуатации связано с резьбовыми соединениями. Соответственно обеспечение качества сборки резьбовых соединений является одной из основных задач в условиях производства [3, 4].

Надежность резьбового соединения определяется силовым взаимодействием его элементов. При сборке в крепежных и соединяемых деталях необходимо создать напряжения, приводящие к упругим и пластическим деформациям, чтобы обеспечить жесткость и прочность соединения, а также не допустить его самооткручивания. Эти напряжения обуславливаются усилием затяжки резьбы, нормативные значения которого определяются в соответствии с [5].

В процессе работы под действием статических и динамических нагрузок происходит релаксация напряжений в элементах резьбового соединения, что приводит к уменьшению усилия предварительной затяжки и раскручиванию резьбы. С этим связана одна из самых распространенных причин отказов резьбовых соединений [6, 7].

Для снижения вероятности раскручивания резьбы в процессе эксплуатации соединение выполняется с применением контргаек, гроверов и стопорящих шайб, которые обеспечивают дополнительное сцепление по их опорным поверхностям. Однако перечисленные методы не обеспечивают надежного стопорения при вибрационных и циклических нагрузках [8, 9].

Другой значимой проблемой при сборке резьбового соединения является неравномерное распределение усилий по виткам резьбы, что доказано в [10]. Так, более 70 % нагрузки приходится на первые три витка резьбы, что при увеличении момента затяжки может привести к срыву резьбы на этих витках [11]. Таким образом, повышение прочности соединения возможно только за счет увеличения диаметра резьбовых деталей и соответственно увеличения отверстий под них.

Масштабы использования резьбовых соединений и их важность при сборке изделий обуславливают актуальность исследований, направленных на совершенствование сборочных операций и повышение эксплуатационных свойств соединений.

Решению проблем, связанных со сборкой резьбовых соединений, посвящено значитель-

ное количество научных исследований и конструкторских изысканий. Ряд работ направлен на совершенствование элементов резьбовых соединений или добавление новых [12–16].

В патенте [12] предложено решение для уменьшения изгибных напряжений, возникающих в резьбовом соединении при поперечном смещении головки болта вследствие усилия на конце закручивающего устройства. При высоких нагрузках указанные напряжения приводят к повышению вероятности ослабления затяжки. С целью снижения напряжений предложено наносить на сферическую поверхность шайбы антифрикционное покрытие, а на опорную поверхность – фрикционное. В этом случае сила трения на нижней поверхности шайбы будет больше силы трения на сферической поверхности болта.

Авторами [13] предложен способ перераспределения нагрузки по виткам резьбы, заключающийся в нарезании в болте пазов с последующей запрессовкой в них пластин из никелида титана. Далее резьбовые детали охлаждаются до температуры ниже -80°C , что приводит к сверхпластичности вставок, и производится сборка. После повышения температуры пластины восстанавливают свою упругость, что позволяет распределить нагрузку от первых витков к остальным.

Для повышения надежности стопорения в [14] предлагается на все крепежные элементы соединения помещать термоусадочный колпачок с последующим его нагревом до температуры усадки. В качестве дополнительного эффекта указана защита соединения от коррозии.

С этой же целью в работе [15] предложено размещать между наружной и внутренней резьбой тонкостенную трубку, которая при сборке деформируется в осевом направлении, что обеспечивает устойчивость к ослаблению резьбы.

В исследовании [16] указано, что наиболее сложной нагрузкой для ослабления гайки является нагрузка, направленная перпендикулярно оси болта. Для повышения надежности соединения разработана конструкция контргайки с пружиной внутри, что дополнительно увеличивает осевую силу.

Ряд исследований посвящен воздействию на резьбовые соединения ультразвуковыми колебаниями (УЗ), которые хорошо себя зарекомендовали как при операции сборки, так и для разборки.

Наложение ультразвуковых колебаний различных типов на резьбовое соединение способствует значительному снижению трения в элементах резьбы при сборочно-разборочных операциях, что позволяет снизить вероятность возникновения схватывания поверхностей при сборке [17–19]. Применение ультразвука также позволяет повысить качество соединения за счет создания большего осевого усилия в соединении [20–23].

Большинство работ в этой области направлено на создание ультразвуковых инструментов, обеспечивающих эффективную передачу колебаний на резьбовой элемент [24, 25].

В работе [26] рассмотрено влияние продольных ультразвуковых колебаний на качество сборки резьбовых соединений. Установлено, что колебания малой амплитуды повышают надежность затяжки, при этом увеличение амплитуды колебаний не приводит к росту момента откручивания без использования ультразвука. Указано, что в случае малых моментов закручивания ультразвук обеспечивает зазор, который свидетельствует о снижении качества сборки.

Результаты исследования [27], которое также проводилось с продольной ориентацией колебаний, показывают, что после достижения определенного значения амплитуды колебаний (6 мкм) применение ультразвука практически не влияет на надежность соединения.

В работах [24, 28] рассматривается применение ультразвуковых колебаний другой поляризации – крутильных и продольно-изгибных. Исследования показали, что при крутильных колебаниях амплитудой всего 1 мкм, прикладываемых к соединению, момент откручивания снижается в два раза. Приложение продольно-изгибных колебаний также позволяет снизить момент откручивания. Исследований таких типов колебаний в процессе сборки резьб не найдено.

Другим широко применяемым способом, предотвращающим раскручивание резьбового соединения, является использование в соединении полимерных материалов, как описано, например, в [29–35]. Способ заключается в нанесении на винтовую поверхность клея или герметика, который при закручивании распределяется по зазорам между профилями наружной и внутренней резьбы. После отверждения полимер препятствует ослаблению резьбы под действи-

ем эксплуатационных нагрузок. Данный способ позволяет отказаться от применения контргайек, пружинных и стопорных шайб, шплинтов и других механических стопорящих элементов, что облегчает и упрощает сборку и разборку узлов, агрегатов и машин.

В результате анализа научных работ можно выявить следующие особенности:

- применение дополнительных элементов резьбового соединения усложняет конструкцию изделия и повышает трудоемкость сборки, при этом основной эффект – это устойчивость к откручиванию без повышения осевого усилия;

- преимуществами применения ультразвуковых технологий являются отсутствие необходимости усложнять конструкцию соединения и возможность повышения осевого усилия, а недостатком – ограниченность применения, обусловленная необходимостью расположения колебательной системы соосно резьбе, что не всегда возможно из-за габаритов и конструкции изделия;

- применение полимеров является наиболее простым способом для стопорения резьбовых деталей, но оно не дает возможности повысить осевое усилие.

В связи с этим поставлена цель и определены задачи исследования.

Целью является разработка технологии создания клеерезьбового соединения, обладающего высокими эксплуатационными свойствами, с применением в процессе сборки ультразвуковых колебаний.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- исследование влияния ультразвуковых колебаний сдвиговой поляризации (перпендикулярно оси резьбы) на параметры резьбового соединения;

- исследование влияния ультразвуковой обработки на свойства полимера;

- исследование процесса получения клеерезьбового соединения, собираемого с наложением ультразвуковых колебаний.

Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились в три этапа. На первом этапе оценивалось влияние сдвиговых ультразвуковых колебаний

на процесс сборки резьбового соединения. На втором этапе проводились исследования по влиянию ультразвуковой обработки на свойства эпоксидного клея. На третьем этапе выполнялась сборка с одновременным добавлением клея и наложением колебаний.

Обработка результатов экспериментов производилась в программе Statistica.

Наложение сдвиговых колебаний на собираемые резьбовые детали

При проведении экспериментальных исследований в качестве образцов использовались болт и гайка М8 нормальной точности с классом прочности 5.8. Нормативный момент закручивания для данного типоразмера соединения составлял 24,5 Н·м.

Экспериментальный стенд представлен на рис. 1.

Для создания колебаний сдвиговой поляризации использовалась ультразвуковая стержневая трехполуволновая колебательная система ПМС 2,0/22, состоящая из магнитострикционного преобразователя, волновода и излучателя 1. Питание колебательной системы осуществлялось ультразвуковым генератором УЗГ5-1,6/22. К торцу излучателя через шпильку прикручивалось устройство для закрепления гайки, которое представляет собой две скобы 2 и 3 с пазами под шестигранник и имеет возможность регулирования размера. После установки и закрепления гайки в нее закручивался болт 4 с помощью ключа 5. Для измерения момента закручивания использовался динамометр 6, а для его плавного изменения применялась винтовая передача 7.

При включении ультразвукового генератора на гайку передаются колебания, направление которых перпендикулярно оси резьбового соединения.

В данной схеме основной фактор, определяющий характер процесса сборки резьбы, – это амплитуда колебаний ξ_m поверхности ультразвукового инструмента, которой является торцевая поверхность скобы.

В процессе эксперимента значения амплитуды задавались по показаниям милливольтметра ВЗ-28Б, подключенного к электродинамическому датчику 8, предварительно соотнесенным с показаниями индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм.

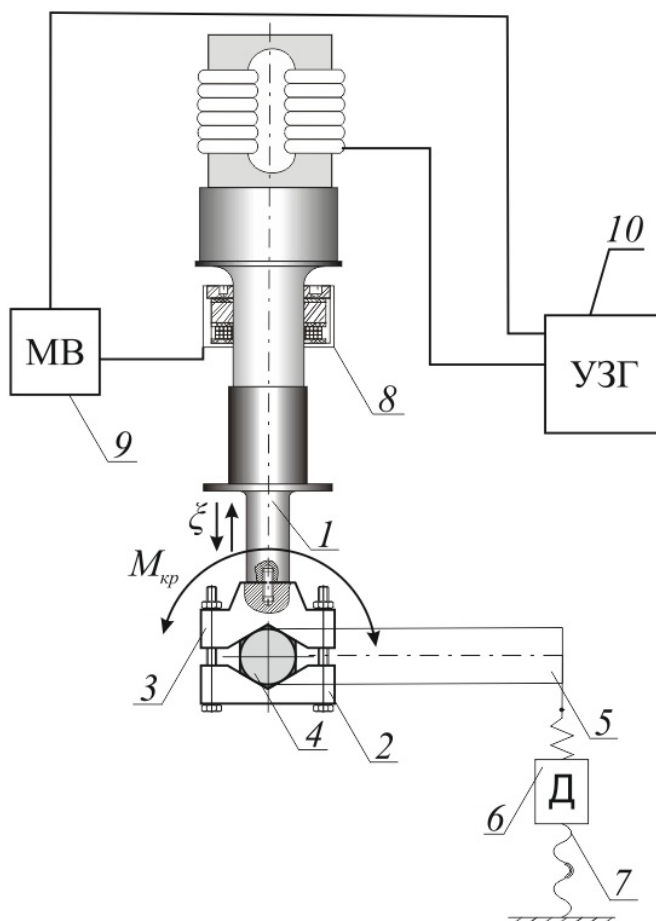


Рис. 1. Экспериментальный стенд:

1 – ультразвуковой излучатель; 2, 3 – скобы крепежного устройства; 4 – болт; 5 – ключ; 6 – динамометр; 7 – винтовая передача; 8 – электродинамический датчик; 9 – милливольтметр; 10 – ультразвуковой генератор

Fig. 1. Experimental stand:

1 – ultrasonic emitter; 2, 3 – brackets of the fastening device; 4 – bolt; 5 – wrench; 6 – dynamometer; 7 – screw drive; 8 – electrodynamic sensor; 9 – millivoltmeter; 10 – ultrasonic generator

Амплитуда варьировалась в диапазоне 1...9 мкм. Такой диапазон выбран на основе предварительных экспериментов в связи с тем, что после превышения величины 9 мкм соединение нагревается свыше 50 °С, что в свою очередь существенно влияет на условия сборки и полимеризацию клеевого состава. Резонансная частота колебаний составляла $f = 22\,000$ Гц.

Исследование проводилось следующим образом. После закручивания с помощью динамометрического ключа до нормативного значения и контроля величины момента закручивания $M_{\text{закр}}$ включался источник колебаний. В результате действия ультразвуковых колебаний происходило снижение момента закручивания $\Delta M_{\text{закр}}$. Далее в условиях колебаний проводилось доза-

кручивание соединения до нормативного значения $M_{\text{закр}}$, после чего колебания выключались. Затем соединение разбиралось и измерялся момент откручивания $M_{\text{откр}}$ без наложения ультразвуковых колебаний. Этот момент сравнивался с моментом откручивания контрольного соединения, полученного без применения ультразвуковой обработки $M_{\text{о. б. уз}}$.

В результате влияние колебаний на резьбовое соединение оценивалось по относительному моменту откручивания $M_{\text{о}}$, который рассчитывался по формуле

$$M_{\text{о}} = \frac{M_{\text{откр}}}{M_{\text{о. б. уз}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

На каждом режиме колебаний производилась сборка пяти соединений.

Оценка изменения осевой силы при закручивании выполнялась путем измерения параметров шероховатости на опорной поверхности гайки, влияющей на силу трения на опорной поверхности и витках резьбы. Измерение проводилось с помощью профилометра модели 130, действие которого основано на ощупывании поверхности алмазной иглой при ее перемещении вдоль измеряемой поверхности и дальнейшем преобразовании ее перемещений в цифровой сигнал, который обрабатывается на компьютере.

После разборки соединения производились измерения винтового профиля болта с целью определения возможных деформаций, вызванных повышением фактического момента закручивания. Для этого использовался контурограф модели 220, предназначенный для измерения геометрических параметров изделий различной формы.

Ультразвуковая обработка эпоксидного клея

В качестве экспериментального образца использовался двухкомпонентный клей ЭДП (основа – смола ЭД-20, отвердитель – полиэтиленполиамин). Перед обработкой компоненты перемешивались вручную в массовом соотношении 1:10.

Ультразвуковая обработка осуществлялась путем введения излучателя колебательной системы в емкость с клеевым составом, объем которого составлял 50 мл (рис. 2). Предварительно клей нагревался до температуры 25 °С. Колеба-



Рис. 2. Ультразвуковая обработка клея

Fig. 2. Ultrasonic treatment of adhesive

тельная система и ультразвуковой генератор использовались такие же, как в предыдущей серии экспериментов.

Режим обработки задавался амплитудой колебаний ξ_m , которая определяет интенсивность ультразвуковых эффектов в жидкой среде, и временем. Резонансная частота колебаний составляла 21 900 Гц. После озвучивания из емкости клея бралась проба 10 мл для определения вязкости методом ротационной вискозиметрии на вискозиметре Fungilab Expert L. В процессе измерения программное обеспечение фиксирует значения вязкости каждую секунду. В соответствии с инструкцией за результат принималось среднее из 10 показаний, если разность между ними не превышала 3 %.

После обработки контролировался также нагрев клея с помощью инфракрасного термометра Testo 810.

Выбор оптимального режима обработки осуществлялся по критерию наибольшего снижения вязкости при наименьшем нагреве клея.

Далее с использованием клея, приготовленного на выбранных режимах, подготавливалось пять образцов клеевых соединений внахлест (20×20 мм) для испытания на растяжение. Склеиваемые поверхности полировались до достижения шероховатости $Ra = 0,32$ мкм. Отметим, что на результаты в первую очередь влияют изменения свойств клея, а не состояние поверхности. Испытания образцов на растяжение проводились на универсальной разрывной машине УТС-110М-50-0У, предназначенной для измерения

нормированного значения меры силы при проведении механических испытаний в режиме растяжения или сжатия образцов конструкционных материалов.

Помимо этого у полимеризованных образцов клея оценивались параметры субмикроструктуры и микротвердость. Субмикроструктура оценивалась на микроскопе СММ-2000 в режиме атомно-силовой микроскопии методом постоянной высоты, а микротвердость – на приборе ПМТ-3.

Сборка клеерезьбового соединения с наложением сдвиговых колебаний

В результате анализа результатов предыдущих этапов исследования выбирались режимы ультразвукового воздействия, обеспечивающие наибольшее повышение относительного момента откручивания и улучшение свойств клеевого состава.

Клей в объеме 5 мл наносился на болт в месте будущего расположения гайки. Сначала соединение закручивалось до номинального нормативного момента, далее включался ультразвук и производилось дозакручивание. Таким способом было собрано пять соединений.

Полученные образцы резьбовых соединений выдерживались 24 часа, после чего разбирались с фиксацией момента откручивания.

Результаты и их обсуждение

Влияние сдвиговых колебаний на процесс сборки и свойства резьбового соединения

В результате обработки результатов экспериментов получена зависимость изменения относительного момента откручивания от амплитуды колебаний $M_o(\xi_m)$, где ε – стандартная ошибка оценки (рис. 3).

Сдвиговые колебания любой амплитуды приводят к повышению показателя M_o . Активный рост происходит до повышения амплитуды ξ_m до 5 мкм: относительный момент откручивания увеличивается в 1,5 раза. В этом случае $M_{откр}$ составляет порядка 30 Н·м, что превышает значение без наложения колебаний на 48 %. При дальнейшем повышении амплитуды свыше 5 мкм значительных изменений не происходит, повышение M_o находится в пределах 1,4–1,5 раза.

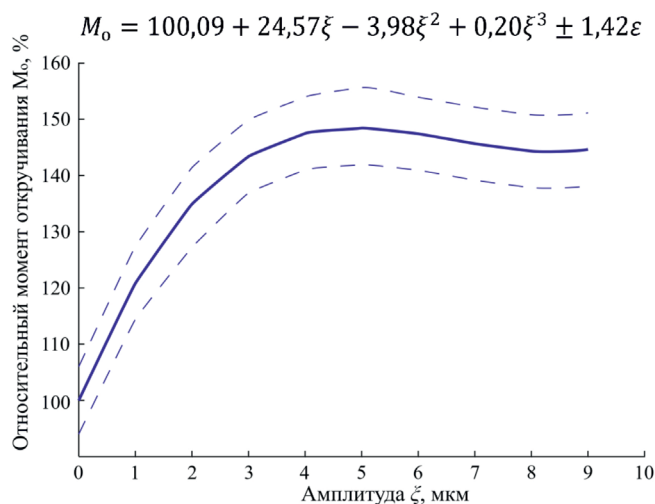


Рис. 3. Зависимость относительного момента откручивания от амплитуды сдвиговых ультразвуковых колебаний для типоразмера М8

Fig. 3. Dependence of the relative unscrewing torque on the amplitude of shear ultrasonic vibrations for size M8

Повышение M_o в условиях ультразвуковых колебаний можно объяснить изменением баланса сил при проведении сборки. В случае наложения сдвиговых колебаний при горизонтальном расположении собираемого соединения схема действующих на соединение сил выглядит следующим образом (рис. 4).

Основными силами, действующими на соединение при сборке, являются сила закручивания на ключе $F_{закр}$; сила трения $F_{тр}$, направленная в проекции в противоположную $F_{закр}$ сторону;

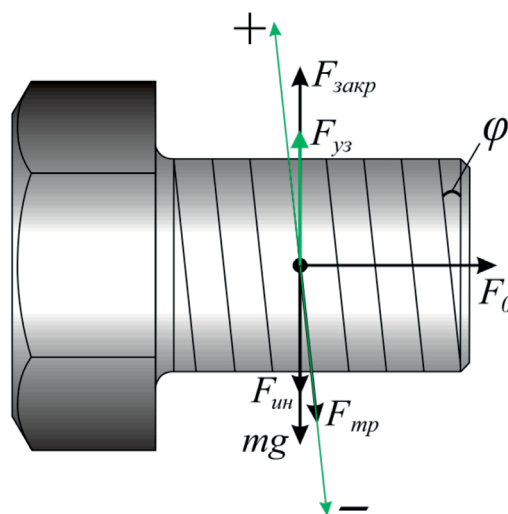


Рис. 4. Схема сил при наложении сдвиговых колебаний на горизонтально расположенное соединение

Fig. 4. Diagram of forces when shear vibrations are applied to a horizontal joint

осевая сила F_0 , направленная от головки болта; сила тяжести mg ; сила, возбуждаемая перемещением соединения с ультразвуковой частотой $F_{уз} = F \cos \omega t$, где ωt – фаза колебания ($\omega = 2\pi f$, где f – частота колебаний); силы инерции $F_{ин}$. Под силами инерции понимаются центробежная сила $F_{цб}$ и сила Кориолиса F_k [36]. В данном случае $F_{ин} = F_{цб} + F_k$.

Для схемы рис. 4 уравнение движения имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} &F_{закр} \cos \varphi + F \cos \omega t \sin \varphi - \\ &- mg \sin \varphi - F_{тр} - F_0 \sin \varphi - \\ &- F_{ин} \cos \varphi = ma, \end{aligned} \quad (2)$$

где φ – угол подъема резьбы.

В данном случае наложение ультразвуковых колебаний приводит к двум эффектам, способствующим закручиванию резьбового соединения:

1) появление дополнительной механической силы $F_{уз}$, возникающей при колебании собираемого элемента, которая увеличивается с ростом амплитуды колебаний;

2) снижение силы трения в условиях ультразвуковых колебаний за счет его преобразования в квазивязкое (эффект подробно описан в [37–39]).

Этими же факторами можно объяснить отсутствие значительных изменений зависимости $M_0(\xi_m)$ после достижения 5 мкм. Это значение амплитуды, по-видимому, является оптимальным для снижения трения при данных условиях эксперимента. Дальнейшее повышение амплитуды приводит к увеличению $F_{уз}$ и одновременному повышению $F_{тр}$.

Помимо этого факторами, влияющими на M_0 , будут являться температура соединения, которая растет вследствие нагрева при увеличении амплитуды колебаний, и сила трения на контактной поверхности гайки.

Измерения температуры после сборки соединения показали, что повышение амплитуды свыше 9 мкм приводят к нагреву до $\approx 50^\circ\text{C}$, что будет влиять на условия полимеризации клея и при этом не будет обеспечивать повышения M_0 . Поэтому исследования на повышенных амплитудах не проводились.

Изменение силы трения контактной поверхности гайки можно косвенно определить по величине смятия профиля микронеровностей при закручивании соединения. Для этого проведено измерение шероховатости на опорной поверхности гайки, закрученной без ультразвука, и гайки, закрученной с наложением ультразвуковых колебаний сдвигового типа, а также гайки до закручивания. Значения основных высотных и шаговых параметров шероховатости представлены в табл. 1, примеры профилограмм, полученных в результате измерений, приведены на рис. 5.

Результаты показали, что при сборке с ультразвуком поверхность подвергается деформациям и изменению микрорельефа сильнее, чем при сборке без воздействия ультразвука. Так, если при обычной сборке высотные параметры снижаются на 30 %, то при сборке с ультразвуком происходит их снижение на 40 %. При этом повышаются значения шаговых параметров, рост которых составляет 35 % для обычной сборки и 54 % для сборки с ультразвуком. Эти изменения позволяют говорить об увеличении силы трения

Таблица 1

Table 1

Значения параметров шероховатости опорной поверхности гайки

Values of the roughness parameters of the nut bearing surface

Параметр шероховатости / Roughness parameter	Гайка до закручивания / Nut before tightening	Гайка, закрученная без колебаний / Nut tightened without vibration	Гайка, закрученная с колебаниями / Nut tightened with vibrations
Ra , мкм / Ra , μm	0,47	0,32	0,28
Rz , мкм / Rz , μm	3,05	1,94	1,56
R_{max} , мкм / R_{max} , μm	5,65	3,19	2,98
Sm , мкм / Sm , μm	47,30	63,91	72,83
tp , % / tp , %	2,77	4,13	12,22

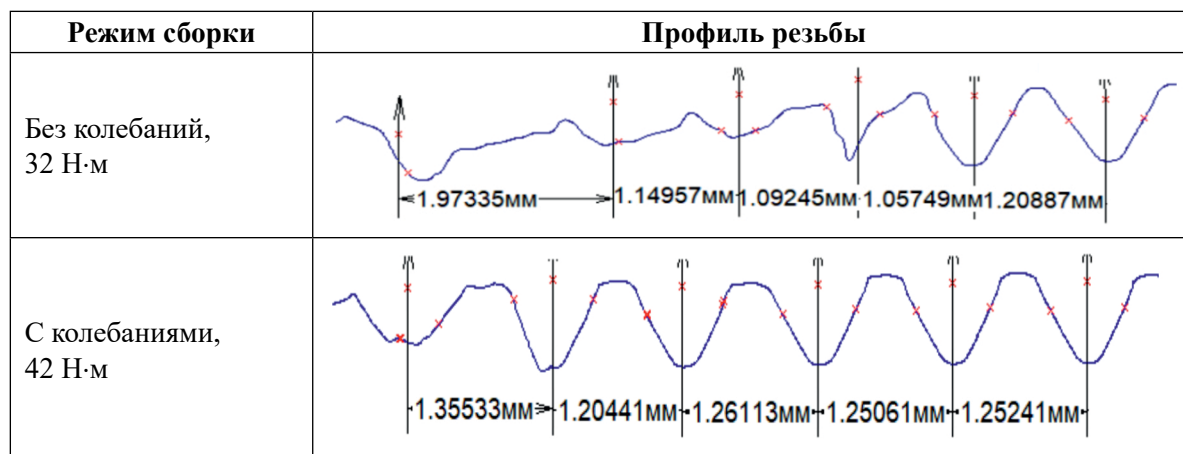


Рис. 5. Профиль резьбы болта после сборки с различным $M_{\text{закр}}$

Fig. 5. Bolt thread profile after assembly with different T_{close}

на опорной поверхности, вследствие чего усилие на откручивание становится больше. Смятие профиля показывает и увеличение осевой силы, препятствующей раскручиванию соединения.

Проведены также исследования по влиянию сдвиговых ультразвуковых колебаний на деформацию витков резьбы при повышении момента закручивания.

Для этого производилась сборка соединений с постепенным увеличением $M_{\text{закр}}$ с 24,5 до 27; 29,5; 32; 42 Н·м. После сборки под воздействием колебаний соединение разбиралось без воздействия ультразвука, после чего с помощью контурографа оценивался профиль резьбы болта. Амплитуда колебаний составляла 6 мкм. Полученные результаты сравнивались с профилями, полученными при закручивании без ультразвука.

При закручивании без колебаний до 24,5 Н·м профиль резьбы не подвергается деформации. Первые признаки прохождения порога деформации становятся заметны при 27 Н·м; при 29,5 Н·м деформация проявляется сильнее. При 32 Н·м происходит окончательный срыв резьбы на 2–4-м витках при сильной деформации 5-го витка (рис. 5).

При воздействии ультразвука на значениях $M_{\text{закр}}$ 29,5 и 32 Н·м признаков деформации не наблюдается, а порог деформации смещается до 42 Н·м.

Это подтверждает увеличение допустимого $M_{\text{закр}}$ при отсутствии повреждений собираемого соединения и, как следствие, повышение качества соединения. Сравнение изменения длины витка резьбы по виткам при максимальном $M_{\text{закр}}$ приведено на рис. 6.

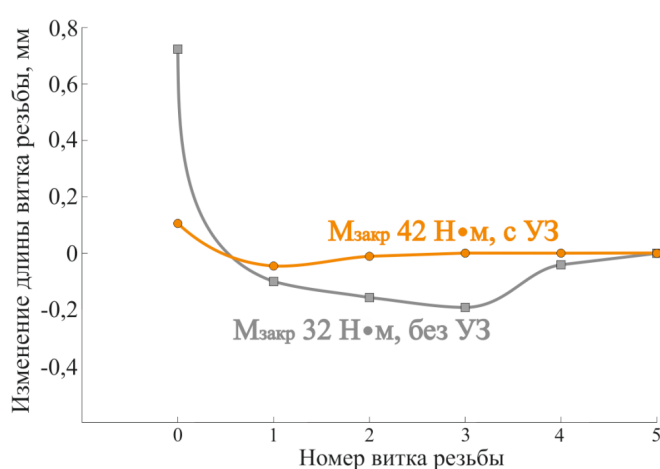


Рис. 6. Зависимость изменения длины витка резьбы от номера витка резьбы

Fig. 6. Graph of the dependence of the length change of the thread turns on the number of the thread turn

Полученная зависимость показывает, что применение ультразвука приводит к повышению равномерности распределения нагрузки по виткам резьбы, которая практически не изменяется от 1-го до 5-го витка, в то время как без ультразвука основное нагружение испытывают первые три витка. Это обеспечивает возможность повышения момента закручивания при значительном снижении вероятности деформации витков резьбы, что приводит к повышению прочности соединения.

Влияние ультразвуковой обработки на свойства эпоксидного клея

Зависимость изменения вязкости от режима ультразвуковой обработки $\eta_i/\eta_0(\xi_m, t)$ представлена на рис. 7. Начальная вязкость до обработки составляла $\eta_0 = 4400$ мПа·с.

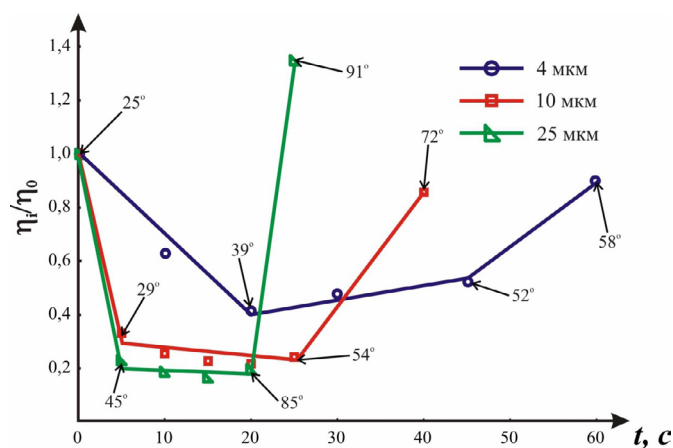


Рис. 7. Изменение вязкости клея в зависимости от режима ультразвуковой обработки

Fig. 7. Change in adhesive viscosity depending on the ultrasonic treatment mode

Ультразвуковая обработка на любой амплитуде приводит к изменению вязкости эпоксидного клея. При этом для каждого из рассмотренных режимов изменения происходят в три этапа: первый – резкое снижение вязкости на 50–80 %; второй – период обработки без существенных изменений; третий – резкое возрастание вязкости вплоть до значений выше начального.

Такие изменения связаны с эффектами, возникающими в жидкой среде, при введении в нее колебаний ультразвуковой частоты. В первую очередь это кавитация и акустические потоки.

Кавитационные пузырьки при схлопывании вызывают ударные волны и кумулятивные струйки, что сопровождается мгновенными давлениями до сотен мегапаскалей и температурами до нескольких тысяч градусов [40–44]. Акустические потоки различного масштаба осуществляют перемешивание обрабатываемой жидкой среды и переносят по ней кавитационные пузырьки [45–47].

Под действием кавитации и потоков проявляется ряд вторичных эффектов, среди которых наибольшее влияние на изменение вязкости оказывает нагрев, возникающий при поглощении жидкой средой акустической энергии. Для оценки влияния нагрева на графиках (рис. 7) в начале и конце каждого этапа изменения вязкости указана температура клея в этот момент. Предварительно также установлено, что критической температурой нагрева клея ЭДП, после которой резко ускоряется реакция полимеризации, является 45–50 °C.

В результате процесс обработки можно описать следующим образом: после включения ультразвуковых колебаний под действием кавитации и акустических потоков происходит разрушение макромолекул и полимерных цепочек и равномерное перемешивание клеевого состава, что сопровождается незначительным нагревом. Эти процессы происходят до достижения некоего предельного состояния, при котором достигается практически минимальное значение вязкости. Далее начинается второй этап, где работа кавитационных пузырьков и акустических потоков тратится на дополнительный нагрев клеевого состава. В этот момент происходят два противоположных процесса, связанных с ростом температуры, – снижение вязкости и ускорение полимеризации. Когда начинает преобладать ускорение полимеризации, начинается третий этап, характеризующийся резким ростом вязкости и выделением тепла при протекании экзотермической реакции.

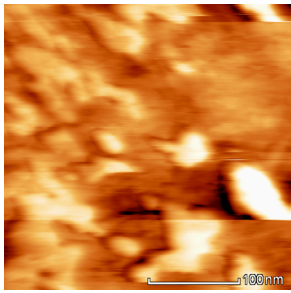
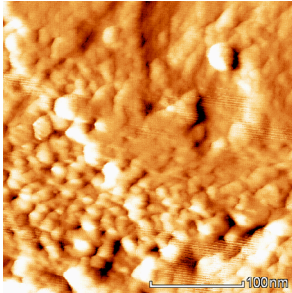
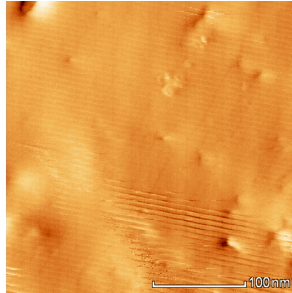
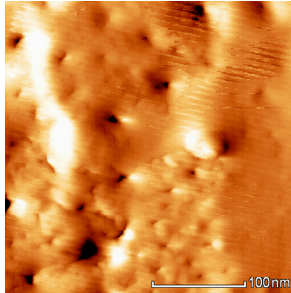
Разная динамика зависимостей связана с режимами обработки. С увеличением амплитуды колебаний возрастает количество кавитационных пузырьков и усиливаются акустические потоки, в результате чего три стадии изменения вязкости протекают быстрее.

В качестве оптимальных режимов были выбраны те, при которых наблюдается наибольшее снижение вязкости при наименьшем нагреве, что соответствует точкам окончания первого (начала второго) этапа.

Далее на выбранных режимах подготавливались образцы для определения микротвердости, анализа субмикроструктуры и испытаний клеевого соединения на растяжение. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Изменения субмикроструктуры характеризуют процесс полимеризации клея. Уменьшение высоты неровностей профиля свидетельствует о равномерности процесса образования полимерных цепочек и их дальнейшего роста после ультразвуковой обработки. Режимы обработки 10 и 25 мкм привели к наибольшему выравниванию субмикроструктуры – в 2,7 и 1,92 раза соответственно. Это объясняется тем, что при указанных режимах обработки образуется достаточное количество кавитационных пузырьков и возникают устойчивые крупномасштабные акустические потоки, необходимые для равномерной

Свойства клея при различных режимах обработки
Properties of adhesive under various treatment modes

Режим обработки Treatment mode			
Без обработки / No treatment	$\xi_m = 4$ мкм, $t = 20$ с	$\xi_m = 10$ мкм, $t = 5$ с	$\xi_m = 25$ мкм, $t = 5$ с
Изображение поверхности 308×308 нм (метод постоянной высоты) Surface image 308×308 nm (constant height method)			
			
Средняя высота неровностей профиля на субмикроруровне Ra_c , нм Average height of profile irregularities at the submicrolevel Ra_c nm			
2,63	1,67	0,98	1,35
Микротвердость, кг/мм ³ Microhardness, kg/mm ³			
0,77	0,75	1,01	0,92
Сдвиговое напряжение τ , МПа Shear stress τ , MPa			
5,5	5,1	6,8	6,2

обработки всего объема клея. Большая высота неровностей, полученная при 25 мкм, связана с нагревом клея до температуры 45 °С, что ускоряет процесс полимеризации. Обработка на низкоамплитудном режиме $\xi_m = 4$ мкм происходит при значительно меньшем объеме кавитационной области, локализованной под излучателем, а отсутствие крупномасштабных течений не позволяет пузырькам быстро распространяться по обрабатываемому объему. В результате ультразвуком обрабатывается не весь объем клея, что проиллюстрировано на изображении субмикроструктуры, где есть четкая граница между обработанной и необработанной частями клея. Это приводит к анизотропии свойств затвердевшего полимера.

Изменения микротвердости и сдвигового напряжения коррелируют с изменениями струк-

туры полимера. Максимальные результаты достигнуты при обработке на амплитуде 10 мкм в течение 5 с. При этом микротвердость повышается на 30 %, а сдвиговое напряжение при растяжении – на 24 %.

Влияние ультразвуковых колебаний на сборку клеерезьбового соединения

Анализ результатов проведенных исследований позволяет определить оптимальный режим ультразвукового воздействия при сборке клеерезьбового соединения.

При сообщении сдвиговых колебаний максимальное повышение относительного момента откручивания M_o достигается на режимах $\xi_m = 5 \dots 9$ мкм. Лучшие результаты при ультразвуковой обработке эпоксидного клея достигнуты при амплитуде $\xi_m = 10$ мкм.

В итоге для сборки клеерезьбового соединения выбрана амплитуда колебаний 9 мкм, при которой резьбовые детали не нагреваются выше 50 °С и которая по эффектам, возникающим в жидкой среде, соответствует переходному режиму обработки (8...12 мкм).

Сборка производилась по схеме рис. 1 с нанесением на резьбу болта 5 мл клея. Сначала выполнялось закручивание до номинального момента, далее включались колебания и производилось дозакручивание. Ультразвук выключался через 5 с после дозакручивания.

Сравнительная диаграмма $M_{откр}$ в зависимости от условий сборки представлена на рис. 8.

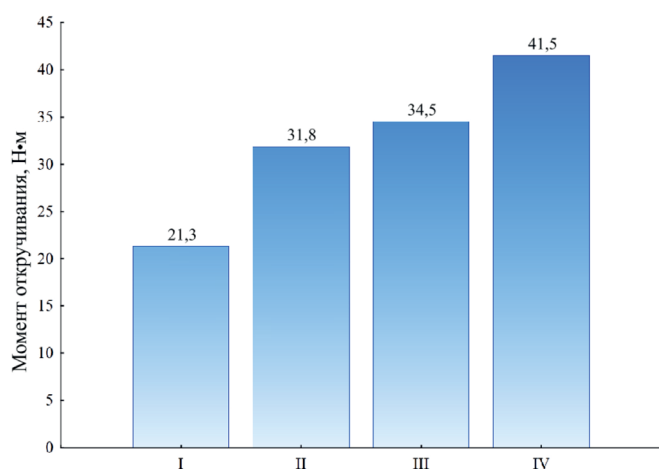


Рис. 8. Диаграмма зависимости момента откручивания от способа сборки:

I – сборка без УЗ и клея; II – сборка с УЗ без клея; III – сборка без УЗ с клеем; IV – сборка с УЗ и клеем

Fig. 8. Diagram of the dependence of the unscrewing torque on the assembly method:

I – assembly without ultrasonics and adhesive; II – assembly with ultrasonics without adhesive; III – assembly without ultrasonics with adhesive; IV – assembly with ultrasonics and adhesive

По способу III добавление жидкой среды снижает силу трения, что приводит к повышению фактического момента закручивания по сравнению со способом I. После закручивания клей заполняет зазоры в зоне соединения болта и гайки, а затем полимеризуется, создавая прочное резьбовое соединение. При этом значительное повышение момента откручивания по сравнению с I обеспечивается в большей степени за счет сил молекулярного сцепления полимера с деталями. То есть рассматриваемый способ по сравнению с II имеет большее сопротивление

откручиванию, но при этом создает меньшую осевую силу, обеспечивающую сохранение расположения деталей, соединяемых резьбой. При повышении момента закручивания деформация витков резьбы начинается как и в способе I – с 32 Н·м.

Предлагаемый способ сборки IV сочетает в себе преимущества ультразвукового воздействия как на увеличение момента закручивания и равномерное распределение напряжений по виткам резьбы, так и на повышение свойств эпоксидного клея. В результате данный способ позволяет создать наибольшую осевую силу при одновременном создании максимального момента откручивания.

Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие результаты.

1. Разработана схема наложения на резьбовое соединение ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно оси резьбы.

2. Наложение сдвиговых ультразвуковых колебаний в процессе сборки резьбового соединения создает дополнительную силу, способствующую закручиванию, и приводит к снижению силы трения, что обеспечивает повышение относительного момента откручивания.

3. Максимальная эффективность воздействия достигается при амплитуде колебаний 5...9 мкм. Относительный момент откручивания возрастает в 1,5 раза.

4. Сравнительный анализ профиля резьбы после разборки контрольного соединения и полученного с колебаниями показывает равномерность распределения нагрузки по виткам резьбовой детали при большем моменте закручивания.

5. Ультразвуковая обработка эпоксидного клея приводит к снижению вязкости и изменению его структуры после полимеризации.

6. Оптимальным режимом обработки является амплитуда колебаний ≈ 10 мкм, при которой вязкость снижается на 70 % при незначительном нагреве смеси, а прочность на сдвиг возрастает на 24 %.

7. Амплитуда колебаний 9 мкм при сборке клеерезьбового соединения позволяет объединить ультразвуковые эффекты, приводящие к максимальному повышению относительного



момента откручивания и обеспечивающие наибольшее повышение свойств эпоксидного клея.

8. Клеерезьбовое соединение, собранное по предлагаемому способу, имеет относительный момент откручивания в 1,95 раза больше, чем у контрольного соединения.

9. Предлагаемый способ сборки предназначен для высоконагруженных резьбовых соединений, работающих в условиях вибраций и циклических нагрузок. Данный способ также позволяет повысить осевое усилие за счет повышения момента закручивания без повреждений элементов резьбы и использования резьб большего диаметра.

Список литературы

1. Бердников Л.А. Основы технологии производства и ремонта автомобилей. Конспект лекций по курсу. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2015. – 339 с. – ISBN 978-5-502-01043-6.
2. Бобровицкий В.И., Сидоров В.А. Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт. – Донецк: Юго-Восток, 2011. – 238 с. – ISBN 978-966-374-636-4.
3. Осипов К.Н. К вопросу оценки качества сборки резьбовых соединений в автоматизированном производстве // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – 2018. – № 1 (1). – С. 23–29. – EDN YMHNXXV.
4. Липка В.М., Рапацкий Ю.Л. Оценка влияния параметров резьбовых крепежных изделий на качество сборки силовых агрегатов автомобилей // Вестник СевНТУ. – Севастополь, 2010. – Вып. 107: Машиностроение и транспорт. – С. 121–127.
5. ГОСТ ISO 898-1–2014. Механические свойства крепежных изделий из углеродистых и легированных сталей. Ч. 1. Болты, винты и шпильки установленных классов прочности с крупным и мелким шагом резьбы: дата введения 2017–01–01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 59 с.
6. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с. – ISBN 5-217-00834-2.
7. Павленко В.А. Исследование причин ослабления и разрушения болтовых соединений кожуха редуктора тягового двигателя электровоза // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды II Всероссийской научно-практической конференции, Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2018. – С. 64–69. – EDN YTZTQD.
8. Study on the fastening property of precision locknut under simulated dynamic impact loading with consideration of interference factors / H.-L. Chang, C.-M. Chen, C.-Y. Lee, Z.-X. Huang // Journal of Mechanics. – 2024. – Vol. 40. – P. 19–30. – DOI: 10.1093/jom/ufae001.
9. Kováčiková P., Dubec A., Košťaliková D. The threaded part wear of the tensioner with lock nut // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 776 (1). – P. 012094. – DOI: 10.1088/1757-899X/776/1/012094.
10. Жуковский Н.Е. Распределение давлений на нарезках винта и гайки // Жуковский Н.Е. Полное собрание сочинений. Т. 8. – М.: ОНТИ, 1937. – С. 48–54. – ISBN 978-5-458-58194-3.
11. Achieving uniform thread load distribution in bolted joints using different pitch values / I. Coria, M. Abasolo, A. Gutiérrez, J. Aguirrebeitia // Mechanics & Industry. – 2020. – Vol. 21 (6). – P. 616. – DOI: 10.1051/meca/2020090.
12. Патент на полезную модель № 172373 U1 Российская Федерация, МПК F16B 5/02. Высоконагруженное резьбовое соединение судового машиностроения: № 2017101668: заявл. 19.01.2017: опубл. 05.07.2017, Бюл. № 19 / В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева, Н.В. Лобанов; заявитель Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (САФУ).
13. Патент № 2618644 С Российская Федерация, МПК F16B 39/00, F16B 31/00. Способ изготовления резьбового соединения и снижения нагрузки на его витки у опорного торца гайки: № 2016116108: заявл. 25.04.2016: опубл. 05.05.2017, Бюл. № 13 / Э.Б. Цхай, Л.Е. Столберов, А.А. Клопотов; заявитель Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). – EDN ZTWKPZ.
14. Патент № 2303717 С1 Российская Федерация, МПК F16B 39/00, F16B 39/12. Способ Н.В. Землякова стопорения контргайки относительно крепежной гайки: № 2006101249/11: заявл. 16.01.2006: опубл. 27.07.2007, Бюл. № 21 / Н.В. Земляков.
15. Optimum design of thin walled tube on the mechanical performance of super lock nut / N.-A. Noda, Y. Xiao, M. Kuhara, K. Saito, M. Nagawa, A. Yumoto, A. Ogasawara // Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. – 2008. – Vol. 2 (6). – P. 780–791. – DOI: 10.1299/jmmp.2.780.
16. Optimum shape design of the spring to improve the loose-proof performance of the lock nut / H.S. Song, W.-S. Chung, D.-H. Jung, Y.-K. Seo // Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers. – 2010. – Vol. 18 (2). – P. 91–96.
17. Блехман И.И., Молясян С.А. Об эффективных коэффициентах трения при взаимодействии упругого тела с вибрирующей плоскостью // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. – 1970. – № 4. – С. 4–10. – EDN VNKOEH.

18. Применение ультразвуковых колебаний различной поляризации при проведении разборочных операций / В.Ф. Казанцев, Р.И. Нигметзянов, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 12. – С. 25–28. – EDN XVBTCTN.
19. Блехман И.И. Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике. – М.: Наука, 1988. – 207 с. – ISBN 5-02-013808-8.
20. Improvement of threaded-joint assembly using ultrasound / R.I. Nigmatzyanov, S.K. Sundukov, A.V. Sukhov, D.S. Fatyukhin, D.S. Simonov // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41 (6). – P. 567–569. – DOI: 10.3103/S1068798X21060150. – EDN ANAISB.
21. Assembly of threaded joints in the presence of shear ultrasound / A.A. Nechai, R.N. Nigmatzyanov, S.K. Sundukov, A.V. Sukhov, D.S. Fatyukhin // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42 (2). – P. 169–171. – DOI: 10.3103/S1068798X22020174. – EDN LEXJUE.
22. Influence of vibration behavior on the energy dissipation of the bolted joints / W. Xu, L. Cai, Z. Liu, Q. Cheng, Y. Li // Proceedings of the ASME 2019 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP 2019. Vol. 2: Computer Technology and Bolted Joints. – San Antonio, TX, USA, 2019. – P. V002T02A034. – DOI: 10.1115/PVP2019-93409.
23. Fatigue behavior of re-tightened bolted joints affected by vibration-induced loosening / B. Tanrikulu, R. Karakuzu, S. Dogan, S. Yurtdas // Duda, S., Correia, J.A.F.O., De Jesus, A.M.P. (eds) Fatigue and Fracture of Materials and Structures / ed. by G. Lesiuk et al. – Cham: Springer, 2022. – P. 141–146. – (Structural Integrity; vol. 24). – DOI: 10.1007/978-3-030-97822-8_16.
24. Неверов А.Н. Использование крутильных и изгибных ультразвуковых колебаний для разборки резьбовых соединений // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015. – № 2 (41). – С. 15–20. – EDN TUVQGR.
25. Шуваев В.Г., Паниев В.А., Шуваев И.В. Ультразвуковой инструмент для сборки и разборки резьбовых соединений // СТИН. – 2012. – № 5. – С. 37–40. – EDN OXHFEB.
26. Неверов А.Н. Исследование механизма самораскручивания резьбовых соединений при продольных ультразвуковых колебаниях // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2017. – № 5. – С. 1751202. – EDN YPDCQH.
27. Мишра А., Неверов А.Н. Применение продольных ультразвуковых колебаний для сборки резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 1. – С. 3–4.
28. Крылова И.А., Шуваев В.Г. Повышение эффективности ультразвуковой сборки и разборки резьбовых соединений // Вестник РГТА имени П.А. Соловьева. – 2018. – № 2 (45). – С. 57–61. – EDN XQRAQX.
29. Effect of tightening process parameters on the T-F curve of bolts in composite structures / Y. Xuande, D. Xiaogang, G. Tao, Z. Honghao, X. Ying // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2024. – Vol. 238 (8). – P. 3578–3601. – DOI: 10.1177/09544062231205181.
30. Study on influence factors of sealing pipe thread connection / Q. Gao, C. Guo, Gt. Zhang, N. Wu, Wh. He // Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2023. IFEDC 2023. – Singapore: Springer, 2024. – P. 558–567. – (Springer Series in Geomechanics and Geoengineering). – DOI: 10.1007/978-981-97-0256-5_47.
31. Liu J. Steel structures research update: adhesive steel-to-steel connections // Engineering Journal. – 2023. – Vol. 60 (4). – DOI: 10.62913/engj.v60i4.1314.
32. Kanaval J., Cézová E., Starý F. Screw connections with application of modern insurance sealants and adhesives analysis // Current Methods of Construction Design: Proceedings of the ICMD 2018. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – P. 295–301. – DOI: 10.1007/978-3-030-33146-7_34.
33. Influence of thread geometry on the performance of retaining anaerobic adhesives / M.A. Martínez, M. Pantoja, J. Abenojar, J.C. Del Real, F. Velasco // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2011. – Vol. 31 (6). – P. 429–433. – DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2011.03.004.
34. Кочетков Д.В., Воячек И.И., Зверовщиков А.Е. Разработка и исследование функциональных моделей резьбовых соединений типа стяжки при сборке с анаэробными материалами // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 4 (20). – С. 115–127. – EDN XKOMBJ.
35. Применение герметиков для уплотнения неподвижных разъемных соединений деталей и узлов в строительных и дорожных машинах / В.В. Буренин, Е.С. Иванина, О.И. Трифонова, Д.К. Воробьев // Механизация строительства. – 2017. – Т. 78, № 8. – С. 35–40.
36. Неверов А.Н. О механизме вибрационного самораскручивания резьбовых соединений // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015. – № 1 (40). – С. 46–52. – EDN TKOZLP.
37. Kumar V.C., Hutchings I.M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration // Tribology

International. – 2004. – Vol. 37 (10). – P. 833–840. – DOI: 10.1016/j.triboint.2004.05.003. – EDNKUMTWV.

38. *Teidelt E., Starcevic J., Popov V.L.* Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction // *Tribology Letters*. – 2012. – Vol. 48. – P. 51–62. – DOI: 10.1007/s11249-012-9937-4.

39. *Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S.* Ultrasonic assembly of press-fit joints // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37 (12). – P. 1044–1047. – DOI: 10.3103/S1068798X17120139.

40. Improvement in ultrasound liquid machining by activating cavitation clusters / R.I. Nigmatzyanov, V.F. Kazantsev, V.M. Prihod'ko, S.K. Sundukov, D.S. Fatyukhin // *Russian Engineering Research*. – 2019. – Vol. 39 (8). – P. 699–702. – DOI: 10.3103/S1068798X19080112.

41. *Сундуков С.К.* Особенности наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 50–66. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66.

42. *Mason T.J.* Ultrasonic cleaning: An historical perspective // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2016. – Vol. 29. – P. 519–523. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.05.004.

43. *Nolting B.E., Neppiras E.A.* Cavitation produced by Ultrasonics // *Proceedings of the Physical Society. Section B*. – 1950. – Vol. 63 (9). – P. 674. – DOI: 10.1088/0370-1301/63/9/305.

44. A comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels / D.S. Fatyukhin, R.I. Nigmatzyanov, V.M. Prihodko, A.V. Sukhov, S.K. Sundukov // *Metals*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 138. – DOI: 10.3390/met12010138.

45. Characterization of focused-ultrasound-induced acoustic streaming / R.B.H. Slama, B. Gilles, M.B. Chiekh, J.C. Bera // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2019. – Vol. 101. – P. 37–47. – DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.10.001.

46. On the acoustic fountain types and flow induced with focused ultrasound / G. Kim, S. Cheng, L. Hong, J.-T. Kim, K.C. Li, L.P. Chamorro // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2021. – Vol. 909. – P. R2. – DOI: 10.1017/jfm.2020.1012.

47. *Sajjadi B., Raman A.A.A., Ibrahim S.* Influence of ultrasound power on acoustic streaming and microbubbles formations in a low frequency sono-reactor: Mathematical and 3D computational simulation // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2015. – Vol. 24. – P. 193–203. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.11.013.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Assembly of threaded and adhesive-threaded joints with the application of ultrasonic vibrations

Aleksandr Sukhov^{a,*}, Sergey Sundukov^b, Dmitry Fatyukhin^c

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0009-0009-9097-8216>, sukhov-aleksandr96@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>, sergey-lefmo@yandex.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>, mitriy2@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 April 2024

Revised: 14 May 2024

Accepted: 05 June 2024

Available online: 15 September 2024

Keywords:

Ultrasound

Assembly

Ultrasonic vibrations

Threaded connection

Adhesive-threaded connection

Epoxy resin

Funding

This research was funded by the project number No. FSFM-2024-0001.

ABSTRACT

Introduction. The main problem in the use of threaded joints is the reduction of the preliminary force under the influence of workloads, which contribute to stress relaxation in the joint elements. The main directions of intensifying assembly operations in order to improve the performance properties of a threaded joint are improving the design of joints, using adhesive compositions that, after polymerization, prevent unscrewing. One of the ways to modernize the assembly is the use of ultrasonic vibrations, which makes it possible to influence the distribution of forces arising during assembly, as well as to process treat the adhesive to improve its properties. **Research methodology.** Experimental studies were carried out in three stages. At the first stage, the influence of shear ultrasonic vibrations on the threaded joint assembly process was assessed. As a complex indicator that determines the effectiveness of the impact, a relative unscrewing torque is proposed, which takes into account the change in the tightening torque under vibration conditions and the increase in the unscrewing torque after assembly. At the second stage, studies were carried out on the effect of ultrasonic treatment on the properties of epoxy adhesive in the liquid (viscosity) and polymerized state (submicrostructure, microhardness, shear stress). At the third stage, the adhesive threaded joint was assembled with the simultaneous addition of adhesive and the application of vibrations. **Results and discussion.** The application of shear ultrasonic vibrations with an amplitude from 5 to 9 μm leads to an increase in the relative unscrewing torque by 1.5 times, which is associated with the creation of an additional force that promotes tightening and a decrease in friction, which acquires the characteristics of quasi-viscous. At the same time, ultrasound increases the uniformity of load distribution along the thread turns, which is confirmed by the absence of its deformation at a higher tightening torque. Ultrasonic treatment of the adhesive at amplitudes of 8...12 μm leads to a decrease in viscosity to 70–80 % and an increase in strength to 24 %, which is explained by the action of cavitation and acoustic flows. The assembly of an adhesive threaded joint at vibration amplitude of 9 μm combines effects that promote tightening and increase the properties of the adhesive. As a result, such a connection has a relative unscrewing torque 1.95 times greater compared to the control one.

For citation: Sukhov A.V., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Assembly of threaded and adhesive-threaded joints with the application of ultrasonic vibrations. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 6–23. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-6-23. (In Russian).

References

1. Berdnikov L.A. *Osnovy tekhnologii proizvodstva i remonta avtomobilei. Konspekt lektsii po kursu* [Fundamentals of technology for the production and repair of automobiles. Lecture notes for the course]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Publ., 2015. 339 p. ISBN 978-5-502-01043-6.
2. Bobrovitskii V.I., Sidorov V.A. *Mekhanicheskoe oborudovanie: tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont* [Mechanical equipment: maintenance and repair]. Donetsk, Yugo-Vostok Publ., 2011. 238 p. ISBN 978-966-374-636-4.

* Corresponding author

Sukhov Aleksandr V., Postgraduate student
Moscow Automobile and Road Construction
State Technical University (MADI),
64 Leningradsky prospect,
125319, Moscow, Russian Federation

Tel.: +7 926 926-82-97, e-mail: sukhov-aleksandr96@mail.ru

3. Osipov K.N. K voprosu otsenki kachestva sborki rez'bovykh soedinenii v avtomatizirovannom proizvodstve [To the question of assessing the quality of assembly of threaded connections in automated production *Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino-priborostroenii*, 2018, no. 1 (1), pp. 23–29. (In Russian).
4. Lipka V.M., Rapatskii Yu.L. Otsenka vliyaniya parametrov rez'bovykh krepzhnykh izdelii na kachestvo sborki silovykh agregatov avtomobilei [Assessment of the influence of parameters of threaded fasteners on the quality of assembly of automobile power units]. *Vestnik SevNTU* [Bulletin of SevNTU]. Sevastopol, 2010, vol. 107, pp. 121–127.
5. GOST ISO 898-1–2014. *Mekhanicheskie svoistva krepzhnykh izdelii iz uglerodistykh i legirovannykh stalei*. Ch. 1. *Bolty, vinty i shpil'ki ustanovlennyykh klassov prochnosti s krupnym i melkim shagom rez'by* [State Standard ISO 898-1–2014. Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel. Pt. 1. Bolts, screws and studs of specified property classes with coarse and fine pitch thread]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 59 p.
6. Birger I.A., Iosilevich G.B. *Rez'bovye i flantsevye soedineniya* [Threaded and flanged connections]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 368 p. ISBN: 5-217-00834-2.
7. Pavlenko V.A. [Study on the causes of the weakening and destruction of the bolted connections of the casing of the reducer traction motor of electric locomotive]. *Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti* [Electric drive in transport and industry]. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Khabarovsk, 2018, pp. 64–69. (In Russian).
8. Chang H.-L., Chen C.-M., Lee C.-Y., Huang Z.-X. Study on the fastening property of precision locknut under simulated dynamic impact loading with consideration of interference factors. *Journal of Mechanics*, 2024, vol. 40, pp. 19–30. DOI: 10.1093/jom/ufae001.
9. Kováčiková P., Dubec A., Košťaliková D. The threaded part wear of the tensioner with lock nut. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2020, vol. 776 (1), p. 012094. DOI: 10.1088/1757-899X/776/1/012094.
10. Zhukovskii N.E. Raspredelenie davlenii na narezkh vinta i gaiki [Pressure distribution on screw and nut threads]. Zhukovskii N.E. *Polnoe sobranie sochinenii*. T. 8 [Complete works. Vol. 8]. Moscow, 1937, pp. 48–54. ISBN 978-5-458-58194-3.
11. Coria I., Abasolo M., Gutiérrez A., Aguirrebeitia J. Achieving uniform thread load distribution in bolted joints using different pitch values. *Mechanics & Industry*, 2020, vol. 21 (6), p. 616. DOI: 10.1051/meca/2020090.
12. Malygin V.I., Kremleva L.V., Lobanov N.V. *Vysokonagruzhennoe rez'bovye soedinenie sudovogo mashinostroeniya* [Highly loaded threaded connection for marine engineering]. Patent RF, no. 172373 U1, 2017.
13. Tskhai E.B., Stolberov L.E., Klopotov A.A. *Sposob izgotovleniya rez'bovogo soedineniya i snizheniya nagruzki na ego vitki u opornogo tortsa gaiki* [Method of manufacturing threaded connection and loading the load on its loops in the face end support nut]. Patent RF, no. 2618644 C, 2017.
14. Zemlyakov N.V. *Sposob N.V. Zemlyakova stoporeniya kontrgaiki otnositel'no krepzhnoi gaiki* [Method of locking locknut relative to fastening nut]. Patent RF, no. 2303717 C1, 2007.
15. Noda N.-A., Xiao Y., Kuhara M., Saito K., Nagawa M., Yumoto A., Ogasawara A. Optimum design of thin walled tube on the mechanical performance of super lock nut. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2008, vol. 2 (6), pp. 780–791. DOI: 10.1299/jmmp.2.780.
16. Song H.-S., Chung W.-S., Jung D.-H., Seo Y.-K. Optimum shape design of the spring to improve the loose-proof performance of the lock nut. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 2010, vol. 18 (2), pp. 91–96.
17. Blekhman I.I., Molyasyan S.A. Ob effektivnykh koeffitsientakh treniya pri vzaimodeistvii uprugogo tela s vibriruyushchei ploskost'yu [About effective friction coefficients during the interaction of an elastic body with a vibrating plane]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela = Mechanics of Solids*, 1970, no. 4, pp. 4–10. (In Russian).
18. Kazantsev V.F., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Primenenie ul'trazvukovykh kolebaniy razlichnoi polarizatsii pri provedenii razborochnykh operatsii [The application of ultrasonic vibrations with different polarizations in the implementation of deconstruction operations]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*, 2016, no. 12, pp. 25–28.
19. Blekhman I.I. *Chto mozhet vibratsiya? O «vibratsionnoi mekhanike» i vibratsionnoi tekhnike* [What can vibration do? About vibration mechanics and vibration technology]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 207 p. ISBN 5-02-013808-8.
20. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S., Simonov D.S. Improvement of threaded-joint assembly using ultrasound. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41 (6), pp. 567–569. DOI: 10.3103/S1068798X21060150.

21. Nechai A.A., Nigmatzyanov R.N., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Assembly of threaded joints in the presence of shear ultrasound. *Russian Engineering Research*, 2022, vol. 42 (2), pp. 169–171. DOI: 10.3103/S1068798X22020174.
22. Xu W., Cai L., Liu Z., Cheng Q., Li Y. Influence of vibration behavior on the energy dissipation of the bolted joints. *Proceedings of the ASME 2019 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP 2019*. Vol. 2: *Computer Technology and Bolted Joints*, San Antonio, TX, USA, 2019, p. V002T02A034. DOI: 10.1115/PVP2019-93409.
23. Tanrikulu B., Karakuzu R., Dogan S., Yurtdas S. Fatigue behavior of re-tightened bolted joints affected by vibration-induced loosening. *Fatigue and Fracture of Materials and Structures*. Ed. by G. Lesiuk et al. Cham, Springer, 2022, pp. 141–146. DOI: 10.1007/978-3-030-97822-8_16.
24. Neverov A.N. Ispol'zovanie krutit'nykh i izgibnykh ul'trazvukovykh kolebaniy dlya razborki rez'bovykh soedinenii [The use of the rotation and flexural vibrations for dismantling of threaded connections]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2015, no. 2 (41), pp. 15–20. (In Russian).
25. Shuvaev V.G., Papshev V.A., Shuvaev I.V. Ul'trazvukovoi instrument dlya sborki i razborki rez'bovykh soedinenii [Ultrasonic tool for assembly and disassembly of threaded joints]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2012, no. 5, pp. 37–40. (In Russian).
26. Neverov A.N. Issledovanie mekhanizma samoraskruchivaniya rez'bovykh soedinenii pri prodol'nykh ul'trazvukovykh kolebaniyakh [Study of the mechanism of auto-unwinding threaded connections with the longitudinal ultrasonic vibrations]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta = Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, 2017, no. 5, p. 1751202.
27. Mishra A., Neverov A.N. Primenenie prodol'nykh ul'trazvukovykh kolebaniy dlya sborki rez'bovykh soedinenii [Application of longitudinal ultrasonic vibrations for the assembly of threaded joints]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*, 2009, no. 1, pp. 3–4.
28. Krylova I.A., Shuvaev V.G. Povyshenie effektivnosti ul'trazvukovoi sborki i razborki rez'bovykh soedinenii [Effectiveness enhancement of threaded joints ultrasonic assembling and disassembling process]. *Vestnik RGATA imeni P.A. Solov'eva*, 2018, no. 2 (45), pp. 57–61. (In Russian).
29. Xuande Y., Xiaogang D., Tao G., Honghao Z., Ying X. Effect of tightening process parameters on the T-F curve of bolts in composite structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2024, vol. 238 (8), pp. 3578–3601. DOI: 10.1177/09544062231205181.
30. Gao Qj., Guo C., Zhang Gt., Wu N., He Wh. Study on influence factors of sealing pipe thread connection. *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2023. IFEDC 2023*. Singapore, Springer, 2024, pp. 558–567. DOI: 10.1007/978-981-97-0256-5_47.
31. Liu J. Steel structures research update: adhesive steel-to-steel connections. *Engineering Journal*, 2023, vol. 60 (4). DOI: 10.62913/engj.v60i4.1314.
32. Kanaval J., Cézová E., Starý F. Screw connections with application of modern insurance sealants and adhesives analysis. *Current Methods of Construction Design: Proceedings of the ICMD 2018*. Cham, Springer International Publishing, 2019, pp. 295–301. DOI: 10.1007/978-3-030-33146-7_34.
33. Martínez M.A., Pantoja M., Abenojar J., Del Real J.C., Velasco F. Influence of thread geometry on the performance of retaining anaerobic adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011, vol. 31 (6), pp. 429–433. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2011.03.004.
34. Kochetkov D.V., Voyachek I.I., Zverovshchikov A.E. Razrabotka i issledovanie funktsional'nykh modelei rez'bovykh soedinenii tipa styazhki pri sborke s anaerobnymi materialami [Development and research of functional models threaded connections type gathering in assembly anaerobic materials]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*, 2016, no. 4 (20), pp. 115–127.
35. Burenin V.V., Ivanina E.S., Trifonova O.I., Vorobyev D.K. Primenenie germetikov dlya uplotneniya nepodvizhnykh raz'emnykh soedinenii detalei i uzlov v stroitel'nykh i dorozhnykh mashinakh [Applying sealants to seal joints fixed detachable parts and assemblies in the construction and road machines]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva = Mechanization of Construction*, 2017, vol. 78 (8), pp. 35–40.
36. Neverov A.N. O mekhanizme vibratsionnogo samoraskruchivaniya rez'bovykh soedinenii [About the mechanism of vibration self-unscrewing of threaded connections]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2015, no. 1 (40), pp. 46–52.
37. Kumar V.C., Hutchings I.M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration. *Tribology International*, 2004, vol. 37 (10), pp. 833–840.



38. Teidelt E., Starcevic J., Popov V.L. Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction. *Tribology Letters*, 2012, vol. 48, pp. 51–62. DOI: 10.1007/s11249-012-9937-4.
39. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Ultrasonic assembly of press-fit joints. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37 (12), pp. 1044–1047. DOI: 10.3103/S1068798X17120139.
40. Nigmatzyanov R.I., Kazantsev V.F., Prikhod'ko V.M., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Improvement in ultrasound liquid machining by activating cavitation clusters. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39 (8), pp. 699–702. DOI: 10.3103/S1068798X19080112.
41. Sundukov S.K. Features of the superposition of ultrasonic vibrations in the welding process. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24 (2), pp. 50–66. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66.
42. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 29, pp. 519–523. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.05.004.
43. Nolting B.E., Neppiras E.A. Cavitation produced by Ultrasonics. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1950, vol. 63 (9), p. 674. DOI: 10.1088/0370-1301/63/9/305.
44. Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sukhov A.V., Sundukov S.K. A comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels. *Metals*, 2022, vol. 12 (1), p. 138. DOI: 10.3390/met12010138.
45. Slama R.B.H., Gilles B., Chiekh M.B., Bera J.C. Characterization of focused-ultrasound-induced acoustic streaming. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019, vol. 101, pp. 37–47. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.10.001.
46. Kim G., Cheng S., Hong L., Kim J.-T., Li K.C., Chamorro L.P. On the acoustic fountain types and flow induced with focused ultrasound. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 909, p. R2. DOI: 10.1017/jfm.2020.1012.
47. Sajjadi B., Raman A.A.A., Ibrahim S. Influence of ultrasound power on acoustic streaming and micro-bubbles formations in a low frequency sono-reactor: Mathematical and 3D computational simulation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015, vol. 24, pp. 193–203. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.11.013.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).