

УДК 621.792.02

Исследование эффективности ультразвуковой обработки поверхностей деталей в среде адгезива при подготовке к склеиванию

Е.А. Берденников

ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина»

Study of ultrasonic treatment efficiency for a part surface in the adhesive medium in preparation for gluing

E.A. Berdennikov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin

Подготовка склеиваемых поверхностей — важная операция для обеспечения прочности клеевых соединений деталей, широко используемых в машиностроении. Некоторую сложность вызывает удаление тонкой оксидной пленки молекулярной толщины, так как после удаления она тут же образуется вновь. Для предотвращения повторного окисления обработанной поверхности предложен способ ультразвуковой обработки поверхности, на которую уже нанесен адгезив. Предполагается, что кавитация на границе сред деталь — адгезив, вызванная ультразвуком, разрушит оксидную пленку, а адгезив станет барьером для взаимодействия кислорода воздуха с обработанной поверхностью. Другими возможными факторами, обуславливающим эффективность ультразвуковой обработки, являются: усиление капиллярного эффекта, проявляющегося в повышении скорости и уровня подъема адгезива в капиллярах, что облегчает его проникновение в пористые структуры; усиление химического эффекта, заключающегося в ускорении различных химических реакций; генерирование и передача теплоты, возникающей вследствие потерь энергии при распространении ультразвуковых колебаний. Ультразвук также влияет на процесс полимеризации. При проведении исследования использована схема, предусматривающая касание пластины, прикрепленной к излучателю, одновременно с деталью и адгезивом. Результаты исследования показали эффективность ультразвуковой обработки поверхностей деталей в среде адгезива перед склеиванием, особенно алюминиевых.

EDN: TBEONK, <https://elibrary/tbeohk>**Ключевые слова:** ультразвуковая обработка, адгезив, прочность клеевых соединений, оксидная пленка, разрывная машина, цифровой динамометр

To ensure strengthened adhesive joints of parts that are widely used in mechanical engineering, preparation of surfaces to be glued plays an important role. Removing a thin oxide film of molecular thickness presents some difficulty, since it immediately forms again after removal. To prevent re-oxidation of the treated surface, the present work proposes using a method of ultrasonic treatment of the surface to which the adhesive has already been applied. It is assumed that cavitation at the boundary of the "part-adhesive" media, caused by ultrasound, will destroy the oxide film, and the adhesive itself will serve as a barrier against the interaction of the atmospheric oxygen with the treated surface. The effectiveness of ultrasonic treatment can be determined by other possible factors, such as: enhancement of the capillary effect manifested in increased speed and level of adhesive rise in capillaries, which

facilitates its penetration into porous structures; enhancement of the chemical effect, consisting in acceleration of various chemical reactions; generation and transfer of heat resulted from energy losses during the propagation of ultrasonic vibrations. Ultrasound also directly affects the polymerization process. During the research, the author has used a scheme involving a contact between the plate attached to the emitter and both the part and the adhesive. The research results have shown effectiveness of ultrasonic treatment of the part surfaces directly in the adhesive medium before gluing, in particular, for aluminum parts.

EDN: TBEONK, <https://elibrary/tbeohk>

Keywords: ultrasonic treatment, adhesive, strength of adhesive joints, oxide film, tensile testing machine, digital dynamometer

Прочность клеевых соединений и адгезионных покрытий обусловлена не только правильным подбором клеевых материалов [1, 2], но и состоянием поверхности перед нанесением адгезива [3]. Подготовка поверхности к склеиванию заключается в очистке от загрязнений, имеющих химический и структурный состав, отличный от материала детали. Иногда при подготовке поверхности ставится задача обеспечения определенной шероховатости поверхности [4].

Загрязнения можно подразделить на две группы. К первой относятся механически прилипшие к поверхности детали загрязнения, не образующие химических связей с поверхностью. В основном это мелкодисперсные частицы и жиры, легко удаляемые механическим путем или обезжириванием.

Во вторую группу входят загрязнения, возникающие в результате химической реакции материала детали с внешней средой. К таким загрязнениям относятся оксидные пленки (ОП) металлов [5, 6], появляющиеся вследствие окисления — химического взаимодействия металла с кислородом. Часто ОП удаляют абразивной обработкой [7, 8]. Иногда используют химические способы, заключающиеся в химическом разрушении ОП (травлении) [9, 10].

Выбор способа обработки обусловлен и толщиной ОП. Некоторую сложность вызывает удаление тонкой ОП, имеющей молекулярную толщину, так как после удаления она тут же образуется вновь. Для предотвращения повторного окисления обработанной поверхности предлагается использовать способ (заявка на Патент РФ № 2025104738), заключающийся в ультразвуковой обработке (УЗО) поверхности, на которую уже нанесен адгезив.

Предполагается, что кавитация на границе сред деталь — адгезив, вызванная ультразвуком, разрушит ОП, а сам адгезив станет барьером для взаимодействия кислорода с обработанной поверхностью.

В то же время можно полагать, что удаление ОП не единственный положительный фактор, который при УЗО будет способствовать повышению прочности клеевого соединения [11]. Не следует исключать и другие возможные факторы, такие как усиление капиллярного эффекта, проявляющегося в повышении скорости и уровня подъема адгезива в капиллярах, что облегчает его проникновение в пористые структуры [12]; усиление химического эффекта, заключающегося в ускорении различных химических реакций; генерирование и передача теплоты, возникающей вследствие потерь энергии при распространении ультразвуковых колебаний. Доказано, что ультразвук также влияет на процесс полимеризации [13, 14].

Цель работы — подтвердить или опровергнуть эффективность УЗО склеиваемых поверхностей в среде адгезива.

Материалы и методы. Предлагаемый способ предусматривает возможность УЗО по трем вариантам. Первый вариант предусматривает контакт излучателя с адгезивом (клеем), нанесенным на поверхность детали, но без контакта с ней. В этом случае возникает объемная кавитация [15, 16], заключающаяся в образовании и захлопывании газовых пузырьков на границе сред деталь — адгезив. Захлопывания пузырьков подобны микровзрывам, которые в большом количестве согласно эффекту Ребиндера способны разрушить и удалить даже самые стойкие загрязнения, включая ОП.

Максимальное ударное давление при захлопывании пузырька определяется выражением [17]

$$p = p_r \left[\frac{p_0(k-1)}{p_r} \right]^{\frac{k}{k-1}}; \quad k = \frac{c_p}{c_v},$$

где p_r — давление газа в пузырьке; p_0 — гидростатическое давление; c_p и c_v — теплоемкость газа при постоянном давлении и объеме.

Важной характеристикой ультразвукового поля является интенсивность ультразвука [18]

$$I = \frac{\rho c \omega^2 \xi^2}{2},$$

где ρ — плотность жидкости; c — скорость звука в жидкости; ω — циклическая частота; ξ — амплитуда колебаний.

При распространении колебаний в поглощающей среде происходит их затухание. Уменьшение амплитуды и интенсивности колебаний происходит по экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-2\alpha x},$$

где I_0 — интенсивность колебаний у источника; α — коэффициент поглощения; x — величина удаления от источника.

Для адгезива, рассматриваемого как вязкая жидкость, коэффициент поглощения можно определить по формуле Стокса — Кирхгофа [19]

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \chi \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right],$$

где η — вязкость; χ — теплопроводность.

Необходимость учитывать вязкость жидкости при обеспечении требуемых параметров ультразвукового поля теоретически и экспериментально доказана в работе [20]. Исследования показали, что для достижения режима развитой кавитации в жидких средах значительной вязкости интенсивность ультразвука должна быть в 10 раз больше, чем в невязких жидкостях. Если оптимальная интенсивность промышленного ультразвука в воде составляет 3,5 Вт/см², то рекомендуемое значение для эпоксидной смолы — 27,6 Вт/см². Полученные результаты могут быть учтены и при проведении лабораторных исследований.

Второй вариант реализации предлагаемого способа заключается в контакте излучателя с поверхностью детали, т. е. колебания возбуждаются и в очищаемом изделии. Одной из причин разрушения ОП могут стать знакопеременные напряжения, возникающие в ней при изгибных колебаниях детали и способствующие отслаиванию ОП [21].

В работе [12] предложено использовать комбинированный способ УЗО при удалении ОП в закрытых полостях и каналах деталей машин. Из условия, что разрушение ОП происходит при изгибных напряжениях σ_F , превышающих

адгезионную прочность оксидного слоя $\sigma_{адг}$, и принятием эквивалентного числа циклов $N_э$, равного частоте ультразвуковых колебаний f , выведено выражение, связывающее амплитуду и частоту колебаний следующим образом:

$$\xi \geq \frac{(W \sigma_{адг})^{1,78}}{(Cl_э)^{1,78} (N_6/f)^{0,22}},$$

где W — момент сопротивления сечения изгибающего элемента; C — эмпирический коэффициент динамической силы ультразвука; $l_э$ — длина обрабатываемого элемента конструкции; N_6 — базовое число циклов нагружений.

Время разрушения оксидного слоя

$$t = N_6/f.$$

Также в работе [12] приведены результаты экспериментальных исследований, показывающие, что при малом количестве загрязнений эффективность комбинированной схемы УЗО соизмерима с обычной. А при большем времени воздействия объемная кавитация может оказаться даже более эффективной.

Третий вариант реализации предлагаемого способа предусматривает контакт излучателя с поверхностями деталей, между которыми уже имеется клеевая прослойка. Если контакт образуется с одной из двух поверхностей, то предполагается, что обработка первой поверхности будет происходить комбинированно, а второй — преимущественно вследствие кавитации. При ожидании разрушения ОП предполагается, что вследствие малой толщины ОП от нее будут освобождаться обе поверхности.

Для проведения исследований с целью подтверждения эффективности УЗО склеиваемых поверхностей непосредственно в среде адгезива использована схема четвертого варианта (рис. 1). Эта схема в определенной степени комбинирует первый и второй варианты предлагаемого способа и предусматривает касание пластины, прикрепленной к излучателю, одновременно с деталью и адгезивом.

Экспериментальная установка включает в себя генератор и излучатель 1 ультразвука производства ООО «Александра-Плюс» (г. Вологда). Мощность излучателя — 150 В, частота колебаний — 23 кГц. В состав комплекта входит адаптер 2 для крепления ультразвукового инструмента, связанный с излучателем резьбовым соединением. Решение использовать приваренную к адаптеру пластину 3 в качестве

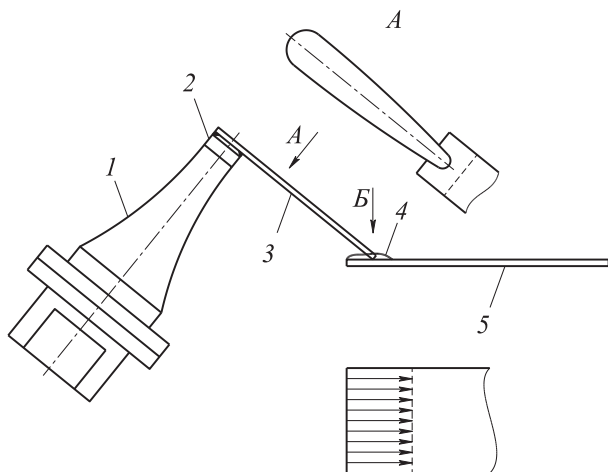


Рис. 1. Схема УЗО

ультразвукового инструмента связано с целью генерации изгибных колебаний, что позволило сосредоточить кавитационное поле вблизи излучающей пластины [17], т. е. в зоне нанесения адгезива 4 на поверхность образца 5.

Излучатель закрепляли в слесарных тисках. Зажим нижней части излучателя губками тисков выполняли через резиновые прокладки. Озвучивание склеиваемой поверхности происходило путем касания образца контактной поверхности излучающей пластины с одновременным перемещением образца вручную с усилием прижатия 5...10 Н в среднем по двадцати продольным векторам-отрезкам на всей ширине образца. Длина участка нанесенного клея, и, соответственно, длина продольных следов соответствовала 14...15 мм, т. е. на 2...3 мм больше длины нахлестки пары склеиваемых образцов (12 мм). Время озвучивания одного образца в среднем составляло 4 мин. Конструктивная схема образца приведена на рис. 2.

Испытаниям подвергали образцы, изготовленные из трех материалов: стали обыкновенного качества Ст3, коррозионно-стойкой стали AISI 304 и алюминия АМГ2М. Из каждого материала изготавливали двенадцать пар образцов. Одну половину образцов (первую партию) не озвучивали, другую (вторую партию)

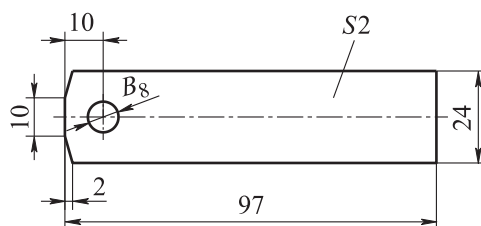


Рис. 2. Конструктивная схема образца

подвергали УЗО в среде адгезива. Перед нанесением клея выполняли абразивную обработку контактных поверхностей всех образцов с помощью углошлифовальной машины Пульсар 125-1000, оснащенной лепестковым абразивным кругом А100. Параметр шероховатости R_z обработанных поверхностей, измеренный профилометром TR200, в среднем составлял 7,5 мкм.

УЗО и склеивание образцов проводили через 20 ч после подготовки поверхностей, что соответствовало времени окисления поверхностного слоя. В качестве адгезива выступал универсальный эпоксидный клей ЭДП. Перед нанесением клея поверхности обезжиривали ацетоном. Для обеспечения постоянной длины нахлестки образцов, изготовленных с допуском на длину 0,05 мм, использовали штангенциркуль, закрепленный в крепежной стойке. Губки штангенциркуля раздвигали на такое постоянное расстояние, чтобы при упоре в них наружных концов прижимаемых образцов обеспечивалась необходимая постоянная длина нахлестки. Для прижатия образцов друг к другу применяли канцелярские зажимы. Толщина клеевой прослойки, определенная вычитанием суммы толщин образцов из их общей толщины после полимеризации адгезива, в среднем составляла 0,1 мм.

Результаты и обсуждение. Прочность клеевых соединений определяли путем измерения уси-



Рис. 3. Фрагмент определения усилия разрыва склеенных образцов

**Значения усилия разрыва
пар испытываемых образцов**

Номер испытываемой пары	Усилие разрыва, Н, для материала		
	Ст3	AISI 304	АМГ2М
1	2893/3115	2485/2630	1145/1725
2	3030/3290	2395/2820	1635/1700
3	2940/3345	2425/2470	1605/2055
4	3090/3325	2450/2705	1680/2030
5	2610/3255	2445/2495	1055/2125
6	3016/3214	1910/2765	1605/1895

Примечание. В числителе дроби указаны значения для первой партии образцов, в знаменателе — для второй.

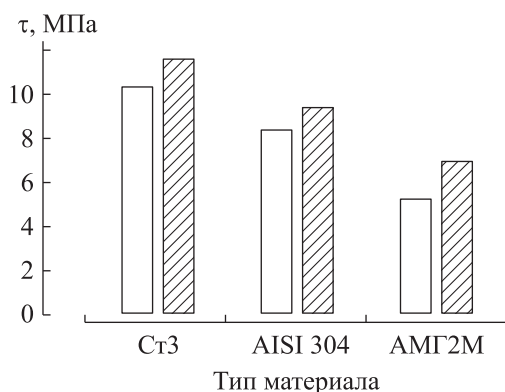


Рис. 4. Значения прочности при сдвиге τ для первой (□) и второй (▨) партий образцов, выполненных из различных материалов

лия разрыва склеенных образцов на разрывной машине УММ-20 (рис. 3) с помощью цифрового динамометра АЦДУ-50/1И-1, оснащенного тензометрическим датчиком.

Значения усилия разрыва пар испытываемых образцов приведены в таблице.

Прочность при сдвиге определяли по выражению

$$\tau = \frac{F}{lb}, \text{ МПа,}$$

где F — усилие разрыва, Н; l — длина нахлестки, мм; b — ширина образца, мм.

Результаты определения прочности клеевых соединений, отражающие эффективность УЗО склеиваемых поверхностей в среде адгезива, приведены на рис. 4. Для всех исследуемых материалов отмечено повышение прочности клеевых соединений образцов, подвергнутых УЗО перед склеиванием, по сравнению с прочностью образцов, которые не озвучивались: для стали обыкновенного качества Ст3 — на 11,2 %, для коррозионно-стойкой стали AISI 304 — на 12,6 %, для алюминия АМГ2М — 32,1 %.

Выводы

1. Несмотря на относительно малую выборку, результаты исследований показали эффективность УЗО поверхностей деталей в среде адгезива перед склеиванием, особенно алюминиевых. Возможно, образование ОП на поверхности алюминия больше снижает адгезию к этой поверхности, чем подобные явления на других испытываемых материалах. К факторам, обуславливающим адгезию поверхности детали, следует отнести скорость образования ОП, и соответственно, толщину ОП.

2. Полученный результат свидетельствует о целесообразности продолжения исследований как при увеличенном количестве испытаний, так и направленных на выявление дополнительных факторов, влияющих на эффективность УЗО в среде адгезива. В качестве такого фактора может выступать шероховатость обрабатываемой поверхности, способствующая увеличению капиллярного эффекта при УЗО.

3. Для реализации предлагаемого способа в промышленных условиях необходимо проанализировать возможные сферы его применения и разработать устройства, позволяющие его использовать. Здесь основным целевым критерием является повышение производительности, возможность обработки склеиваемых поверхностей большей площади за меньшие промежутки времени. Решение такой задачи может быть связано с использованием пакета, состоящего из нескольких излучателей, доработкой их конструкции и ультразвукового инструмента, автоматизацией технологического процесса.

Литература

- [1] Схиртладзе А.Г., Скрыбин В.А. Применение клеевых композиций при ремонте изделий. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2022, № 1, с. 25–28.
- [2] Исаев С.П., Еренков О.Ю., Шевчук К.А. Исследование влияния СВЧ-излучения на технологические свойства карбамидоформальдегидного клея. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2023, № 6, с. 2–6.
- [3] Косенко Е.А., Закорский Д.К., Ду А. и др. Особенности подготовки металлических поверхностей деталей машин перед склеиванием. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2021, № 12, с. 13–16.
- [4] Овчинникова В.В., Нефедов Н.И., Мазурова Д.В. и др. Исследование влияния способов обработки поверхности на антикоррозийные свойства катафорезного покрытия на основе грунтовок HR-4000ALB/HR-6000. *Успехи в химии и химической технологии*, 2023, т. 37, № 6, с. 94–96.
- [5] Шутов И.В., Кривилев М.Д., Королев М.Н. Изучение разрушения паяных соединений сплава АМгб. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2024, т. 26, № 1, с. 42–49.
- [6] Булков А.Б., Пешков В.В., Корчагин И.Б. и др. Влияние физико-химического состояния контактных поверхностей титана на прочность и топографию разрушения сварного соединения. *Сварочное производство*, 2021, № 9, с. 22–27.
- [7] Косенко Е.А., Нигметзянов Р.И., Кострыкин В.В. Обоснование выбора способа механической обработки поверхностей деталей машин, подлежащих склеиванию металлонаполненными клеевыми композициями. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2021, № 7, с. 30–35.
- [8] Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Верченко А.В. Технологические основы обработки полимеркомпозитных деталей гибким абразивным инструментом. *Научные технологии в машиностроении*, 2021, № 8, с. 25–34, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-8-25-34>
- [9] Быковский Н.А., Кантор Е.А., Шулаев Н.С. и др. Комбинированный метод переработки отработанного кислого травильного раствора производства изделий из титана. *Записки Горного института*, 2025, т. 272, с. 51–58.
- [10] Третьяков А.Ф. Влияние предварительной химической обработки на качество твердофазных сварных соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, № 2, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-2-2156>
- [11] Бороздина Е.А. Определение прочности одинарного клеевого соединения образцов из полимерных композиционных материалов внахлест с образцами из титанового сплава. *Дневник науки*, 2023, № 4. URL: <https://dnevniknauki.ru/images/publications/2023/4/technics/Borozdina.pdf>
- [12] Сарсеналиев А.М. *Повышение эффективности ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя с внутренних поверхностей в деталях сложной конструкции сочетанием кавитации и контактного вибровоздействия*. Дисс. ... канд. тех. наук. Саратов, 2018. 131 с.
- [13] Сундуков С.К. Ультразвуковые технологии при получении клеевых соединений: обзор. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2023, № 4, с. 33–40.
- [14] Сундуков С.К. Влияние ультразвуковой обработки эпоксидного клея на прочность соединения. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2023, № 11, с. 24–31.
- [15] Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К. и др. Современные направления ультразвуковой жидкостной обработки в машиностроении. *Научные технологии в машиностроении*, 2021, № 8, с. 12–17, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-8-12-17>
- [16] Басов А.А., Козинер Ю.Д., Кравцов Д.А. и др. Направленная ультразвуковая очистка малодоступных внутренних поверхностей теплообменных устройств, изготовленных методами аддитивных технологий. *Цветные металлы*, 2022, № 9, с. 78–83, doi: <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.09.11>

- [17] Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. *Ультразвуковая очистка*. Ленинград, Машиностроение, 1977. 184 с.
- [18] Негров Д.А. *Ультразвуковые колебательные системы для синтеза полимерных композиционных материалов*. Омск, Изд-во ОмГТУ, 2012. 128 с.
- [19] Насыров А.М., Овчинников М.Н. *Волновые процессы*. Ч. 8. Акустические колебания и волны. Казань, КГУ, 2003. 32 с.
- [20] Хмелев С.С. *Повышение эффективности кавитационно-акустических воздействий на химико-технологические процессы в аппаратных системах с жидкой фазой значительной вязкости*. Дисс. ... канд. тех. наук. Бийск, 2011. 156 с.
- [21] Хмелев В.Н. *Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности*. Бийск, Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 203 с.

References

- [1] Skhirtladze A.G., Skryabin V.A. Application of glued compound for repair of products. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2022, no. 1, pp. 25–28. (In Russ.).
- [2] Isaev S.P., Erenkov O.Yu., Shevchuk K.A. Effect study of microwave radiation on technological properties of urea-formaldehyde adhesive. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2023, no. 6, pp. 2–6. (In Russ.).
- [3] Kosenko E.A., Zakorskiy D.K., Du A. et al. Preparation features of metal surfaces of machine parts before gluing. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2021, no. 12, pp. 13–16. (In Russ.).
- [4] Ovchinnikova V.V., Nefedov N.I., Mazurova D.V. et al. Investigation of the influence of surface treatment methods on the anticorrosion properties of a cathodic coating based on a primer HR-4000ALB/HR-6000. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2023, vol. 37, no. 6, pp. 94–96. (In Russ.).
- [5] Shutov I.V., Krivilev M.D., Korolev M.N. Fracture analysis of brazed Al-Mg-Mn joints. *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye* [Bulletin PNIPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2024, vol. 26, no. 1, pp. 42–49. (In Russ.).
- [6] Bulkov A.B., Peshkov V.V., Korchagin I.B. et al. Influence of the physicochemical state of the contact surfaces of titanium on the strength and topography of fracture of the welded joint. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2021, no. 9, pp. 22–27. (In Russ.).
- [7] Kosenko E.A., Nigmatzyanov R.I., Kostykin V.V. Selection substantiation of mechanical treatment method of machine part surfaces to be glued with metal-filled adhesive compounds. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2021, no. 7, pp. 30–35. (In Russ.).
- [8] Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Verchenko A.V. Technological fundamentals of polymer-composite parts with flexible abrasive tool. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2021, no. 8, pp. 25–34, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-8-25-34> (in Russ.).
- [9] Bykovskiy N.A., Kantor E.A., Shulaev N.S. et al. Combined method for processing spent acid etching solution obtained during manufacturing of titanium products. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2025, vol. 272, pp. 51–58. (In Russ.).
- [10] Tretyakov A.F. Preliminary chemical treatment affecting the quality of solid-state welded joints of wires in porous mesh materials manufacture. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2022, no. 2, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-2-2156> (in Russ.).
- [11] Borozdina E.A. Determination of the strength of a single adhesive joint of samples made of polymer composite materials overlapping with samples made of titanium alloy. *Dnevnik nauki*, 2023, no. 4. URL: <https://dnevniknauki.ru/images/publications/2023/4/technics/Borozdina.pdf> (in Russ.).
- [12] Sarsengaliev A.M. *Povysheniye effektivnosti ultrazvukovogo udaleniya oksidnogo poverkhnostnogo sloya s vnutrennikh poverkhnostey v detalyakh slozhnoy konstruktssii sochetaniem kavitatsii i kontaktnogo vibrovostoystviya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of ultrasonic removal of oxide surface layer from internal surfaces in complex

- design parts by combining cavitation and contact vibration. Kand. tech. sci. diss.]. Saratov, 2018. 131 p. (In Russ.).
- [13] Sundukov S.K. Ultrasonic technologies in production of adhesive joints (review). *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2023, no. 4, pp. 33–40. (In Russ.).
- [14] Sundukov S.K. Effect of ultrasonic treatment of epoxy glue on strength of joint. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2023, no. 11, pp. 24–31. (In Russ.).
- [15] Prihodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K. et al. Current trends in ultrasonic liquid machining in mechanical engineering. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2021, no. 8, pp. 12–17, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-8-12-17> (in Russ.).
- [16] Basov A.A., Koziner Yu.D., Kravtsov D.A. et al. Directed ultrasonic cleaning of poorly accessible internal surfaces of additive manufactured heat exchangers. *Tsvetnye metally*, 2022, no. 9, pp. 78–83, doi: <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.09.11> (in Russ.).
- [17] Keller O.K., Kratysh G.S., Lubyanskiy G.D. *Ultrazvukovaya ochildka* [Ultrasonic cleaning]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 184 p. (In Russ.).
- [18] Negrov D.A. *Ultrazvukovye kolebatelnye sistemy dlya sinteza polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Ultrasonic oscillatory systems for the synthesis of polymer composite materials]. Omsk, Izd-vo OmGTU Publ., 2012. 128 p. (In Russ.).
- [19] Nasyrov A.M., Ovchinnikov M.N. *Volnovye protsessy*. Ch. 8. *Akusticheskie kolebaniya i volny* [Wave processes. P. 8. Acoustic oscillations and waves.]. Kazan, KGU Publ., 2003. 32 p. (In Russ.).
- [20] Khmelev S.S. *Povyshenie effektivnosti kavitatsionno-akusticheskikh vozdeystviy na khimiko-tekhnologicheskie protsessy v apparatnykh sistemakh s zhidkoy fazoy znachitelnoy vyazkosti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of cavitation-acoustic effects on chemical-technological processes in hardware systems with a liquid phase of significant viscosity. Kand. tech. sci. diss.]. Biysk, 2011. 156 p. (In Russ.).
- [21] Khmelev V.N. *Primenenie ultrazvuka vysokoy intensivnosti v promyshlennosti* [Application of high intensity ultrasound in industry]. Biysk, Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta Publ., 2010. 203 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

Информация об авторе

БЕРДЕННИКОВ Евгений Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические средства и технический сервис». ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина» (160555, Вологда, Российская Федерация, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2, e-mail: dinaminator@yandex.ru).

Information about the author

BERDENNIKOV Evgeniy Alekseevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Energy Equipment and Technical Service Department. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin (160555, Vologda, Russian Federation, Molochnoe Settlement, Smidta St., Bldg. 2, e-mail: dinaminator@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Берденников Е.А. Исследование эффективности ультразвуковой обработки поверхностей деталей в среде адгезива при подготовке к склеиванию. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 5, с. 34–41.

Please cite this article in English as:

Berdennikov E.A. Study of ultrasonic treatment efficiency for a part surface in the adhesive medium in preparation for gluing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 5, pp. 34–41.