

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 40-48.

Научная статья
УДК 534-8, 621.9.048.6
doi:

Применение ультразвуковых технологий при получении прессовых соединений

Сергей Константинович Сундуков, к.т.н.
ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ), г. Москва, Россия
sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

***Аннотация.** Статья представляет обзор современных исследований по применению ультразвуковых колебаний в процессе получения прессовых соединений. Основным эффектом, возникающим при наложении ультразвука на запрессовываемые детали, является снижение силы трения. Рассмотрены работы, исследующие влияние ультразвука на трение различных материалов, а также применения данного эффекта при запрессовке.*

***Ключевые слова:** ультразвук, колебания, запрессовка, сила трения*

***Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение инициативных исследований молодыми учеными» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными научного проекта: «Исследование влияния ультразвуковых колебаний на процессы получения неразъемных соединений» № 21-79-00185.*

***Для цитирования:** Сундуков С.К. Применение ультразвуковых технологий при получении прессовых соединений // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 40–48. doi:*

Application of ultrasonic technologies in the production of press joints

Sergey K. Sundukov, PhD Eng.,
Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University
(MADI) Moscow, Russia
sergey-lefmo@yandex.ru

***Abstract.** The present state research overviews on the use of ultrasonic vibrations in press joints. The main effect occurring in ultrasonic activation for pressed parts is friction force break. The works investigating the effect of ultrasound on the friction of various materials, as well as the application of this effect in pressing are viewed in the article.*

***Keywords:** ultrasound, vibrations, pressing, friction force*

***Acknowledgments:** The work is supported by a grant from the Russian Science Foundation for the priority area of activity of the Russian Science Foundation «Conducting initiative research among young scientists» of the Presidential Program of research projects implemented by leading scientists, including young scientists of the scientific project: «Study of the influence of ultrasonic vibrations on the processes of obtaining permanent compounds» No. 21-79-00185.*

Введение

Прессовые соединения, применяемые в разных механизмах и узлах машиностроения, передают нагрузку вследствие действия между соединяемыми поверхностями силы трения, значение которой определяется величиной натяга между деталями.

Широкое распространение прессовых соединений связано с такими преимуществами как простота, связанная с тем, что узел формируется только за счёт двух деталей, точность центрирования запрессовываемой детали (для цилиндрических соединений), надёжность работы при больших моментах и ударных нагрузках [1].

Сборка прессовых соединений производится механическим методом или за счёт нагрева и охлаждения соединяемых деталей. Выбор способа сборки зависит от требуемой величины натяга. Сила запрессовки при механическом методе сборки должна превышать силу трения, возникающую в соединении:

$$F_{сб} > F_{тр}$$

Преимуществами метода механической запрессовки является простота и высокая производительность. К недостаткам относятся высокая вероятность повреждения сопрягаемых поверхностей и, как следствие, отсутствие возможности соединения деталей с различного рода функциональными покрытиями.

Поэтому снижение силы трения в процессе соединения является основным направлением совершенствования данного техпроцесса. Так, например, сборка гидропрессовым методом, заключающаяся в подачи масла в зону соединения под большим давлением, позволят снизить силу трения до 15 раз [2].

При использовании метода температурных деформаций сборка осуществляется в зазоре между нагретой охватывающей и охлаждённой охватываемой деталью. Применяемость метода также ограничена для больших величин натяга.

Перспективным способом интенсификации сборки посадок с натягом является применение ультразвуковых технологий.

Сообщение деталям колебаний ультразвуковой частоты приводит к изменению характера силы трения [3, 4]. Возникает эффект наличия между трущимися поверхностями смазочного материала – квазивязкое трение.

Несмотря на значимый эффект, количество исследований по изменению силы трения при ультразвуковых колебаниях, а также по их применению в процессе сборки неразъёмных соединений с натягом, крайне мало. Наибольшее количество исследований посвящено процессам резания с наложением колебаний и взаимодействию пуансона и матрицы при штамповке с наложением колебаний.

Данная работа является обзором научных трудов и патентов по применению ультразвуковых колебаний для снижения силы трения и интенсификации сборочных процессов прессовых соединений.

Влияние ультразвуковых колебаний на силу трения

В работе [5] дан качественный анализ преобразования сухого трения в квазивязкое (рис. 1) на примере поступательного движения вала во втулке, колеблющейся с ультразвуковой частотой.

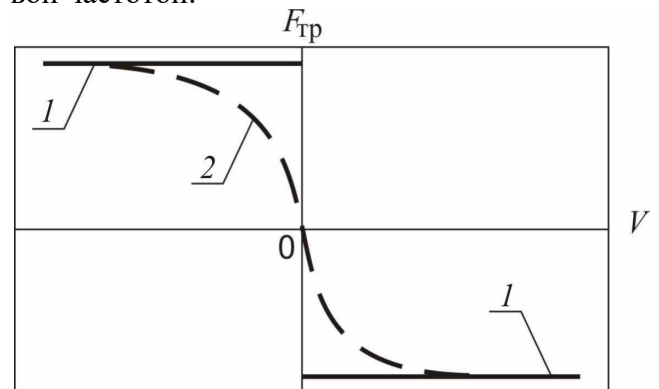


Рис. 1. Качественная зависимость силы сухого трения $F_{тр}$ от скорости относительного движения v : 1 – стандартная зависимость; 2 – при наличии быстрых перемещений

В условиях, когда колеблющаяся поверхность движется быстрее, а сила трения направлена в сторону движения вала, то колеблющаяся поверхность передаёт ему часть кинетической энергии и «подтягивает» тело. В

результате средняя сила трения за период колебаний уменьшается.

При этом указано два механизма преобразования трения. Первый является следствием перехода к эффективному трению, усреднённого по ультразвуковым вибрациям, а второй обусловлен созданием смазочного слоя между трущимися поверхностями в результате микроразрушений их поверхностных слоёв.

Статья [6] посвящена экспериментальному исследованию влияния продольных и поперечных колебаний на изменение силы трения. Металлический цилиндр 6×10 мм (алюминиевый сплав BS1474, латунь BS2874,

медь BS2873-74 и нержавеющая сталь BS970) прикреплялся к ультразвуковому концентратору, имеющему резонансную частоту колебаний 20 кГц. Цилиндр прижимался к ответной поверхности (инструментальная сталь BS4659 с твёрдостью 605 HV), прикрепленной к возвратно-поступательному столу, перемещающемуся со средней скоростью 50 мм/с. В процессе эксперимента варьировалась амплитуда от 0 до 12 мкм и усилие прижима от 5,0 до 20 Н. Сила трения измерялась с помощью тензодатчика. Результаты, полученные при исследовании продольных колебаний, представлены на рис. 2.

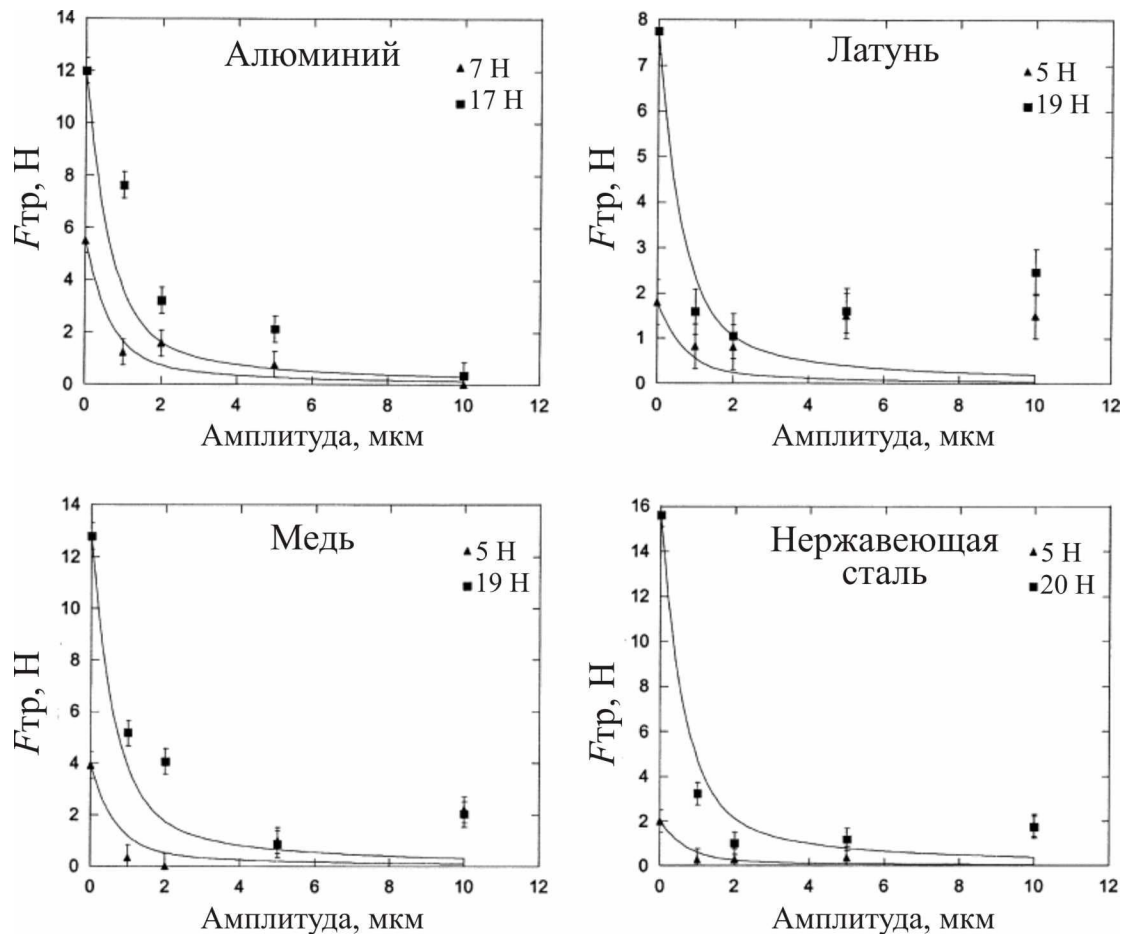


Рис. 2. График зависимости силы трения от амплитуды продольных колебаний для образцов из различных материалов, скользящих по рабочей поверхности из инструментальной стали:

сплошные линии – расчётные данные; отдельные точки – экспериментальные точки

Увеличение амплитуды колебаний приводит к значительному снижению силы трения. Наибольшее снижение достигается до амплитуды 5,0 мкм. При дальнейшем увеличении амплитуды авторы наблюдали перенос металла на контрповерхность, что изменяет

условия трения, в результате чего сила трения повышается. Данный факт не учитывался при расчётах. В итоге сделан вывод, что наилучшие условия снижения трения достигаются в диапазоне от 1,0 до 5,0 мкм. Результаты исследований по влиянию поперечных коле-

баний показали, что сила трения снижается меньше и более плавно.

Исследования [7, 8] по влиянию колебаний на силу трения при малых скоростях

относительно движения проводились по схожей схеме (рис. 3).

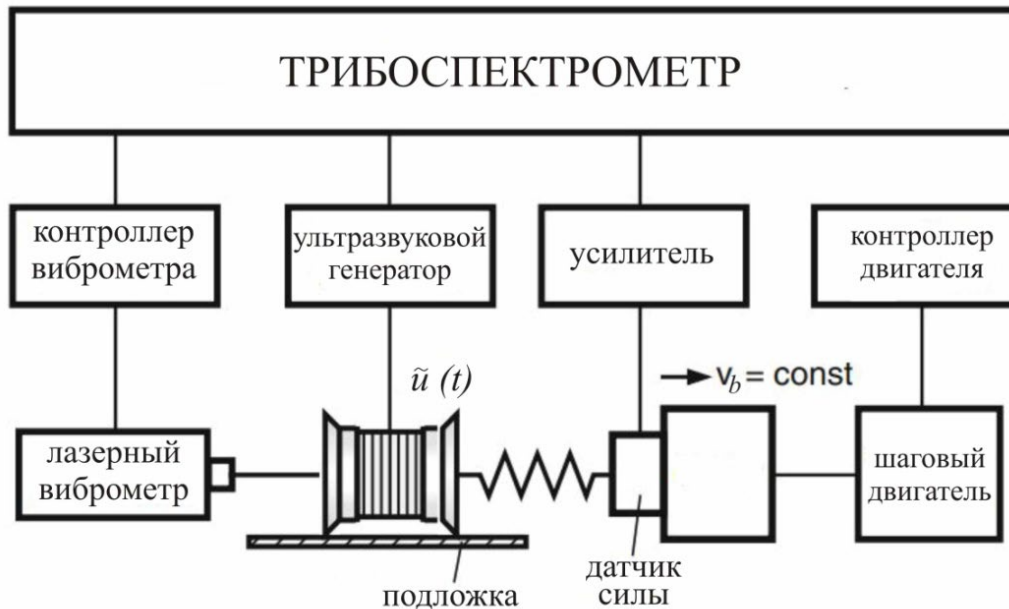


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Колеблющийся с частотой 40...70 кГц образец из стали с пьезокольцами посередине, подключёнными к ультразвуковому генератору, перемещался по подложке из разных материалов со скоростью до 0,05 м/с.

С помощью контрольно-измерительного оборудования определялась величина силы трения при повышении амплитуды колебаний от 0 до 1,0 мкм (рис. 4).

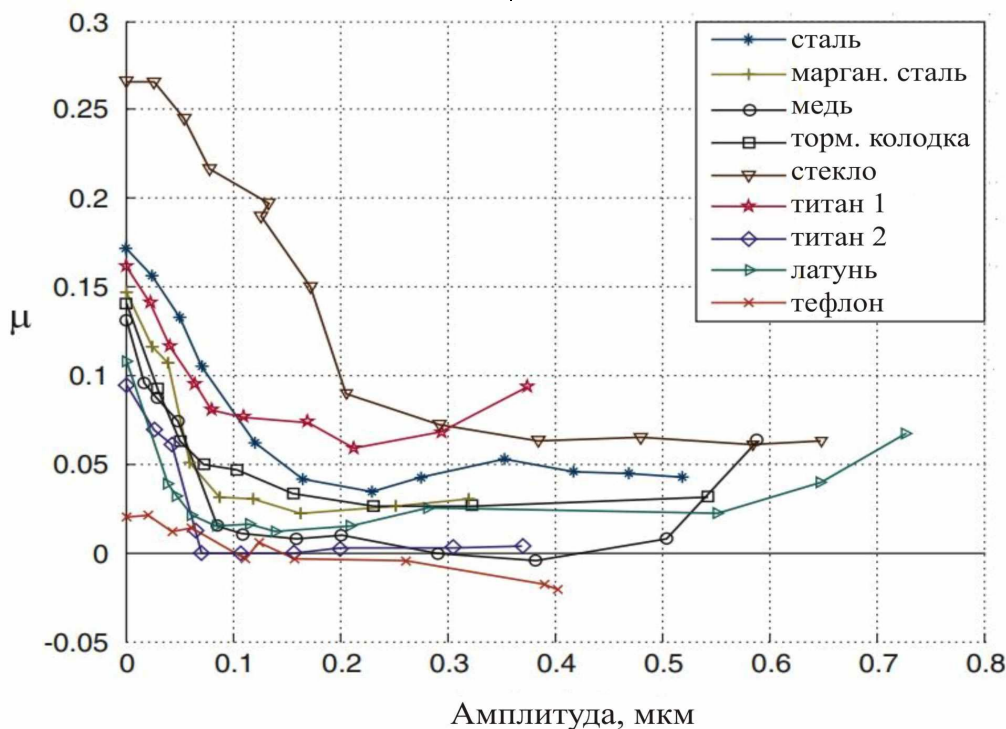


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от амплитуды колебаний

Для всех рассмотренных материалов подложки колебания приводят к снижению коэффициента трения. При этом для значительного снижения достаточно маленькой амплитуды 0,1 мкм. С увеличением скорости скольжения коэффициент трения увеличивается.

Исключения составили образцы из резины и алюминия. При увеличении амплитуды до 1,0 мкм коэффициент трения, наоборот, возрастают.

Авторами [9] произведено сопоставление расчётных данных, основанных на законе трения Кулона, и экспериментальных данных

по изменению силы трения при воздействии ультразвука. Используемая экспериментальная установка аналогична рассмотренным ранее. Принцип её работы основан на перемещении стального образца по алюминиевой направляющей с постоянной скоростью. Проведены эксперименты при параллельной ориентации колебаний и при перпендикулярной. В результате получены зависимости (рис. 5) снижения силы трения при изменении относительной скорости (колебательная скорость к скорости перемещения). При этом частота и амплитуда колебаний не указаны.

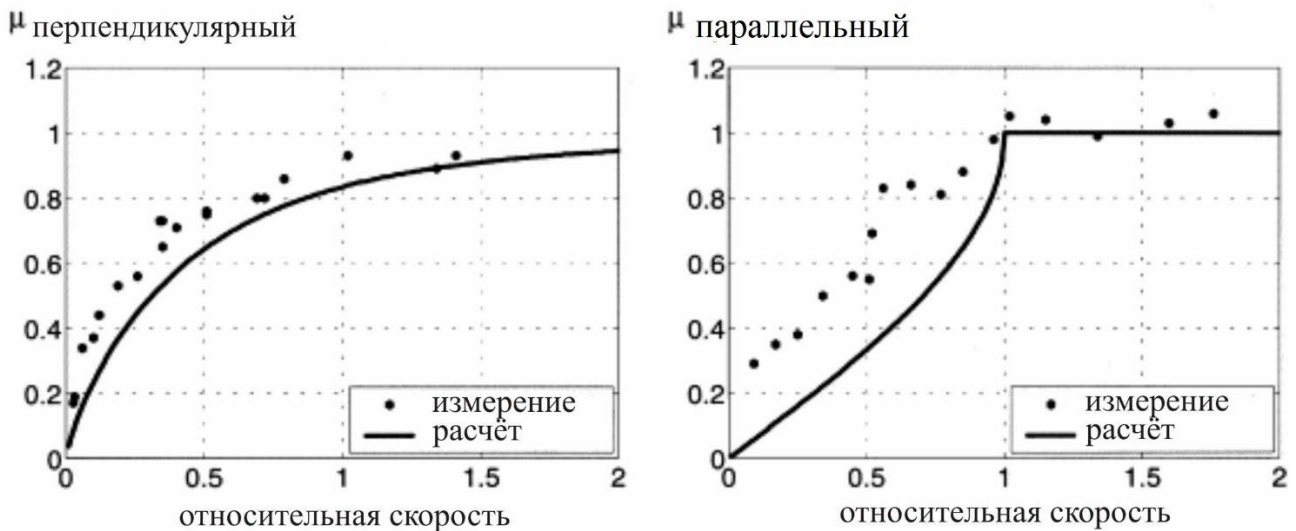


Рис. 5. Измеренное уменьшение трения для параллельного и перпендикулярного наложения компонентов скорости

Полученные измерения подтверждают факт снижения силы трения при ультразвуковом воздействии. Также сделан вывод о применимости закона трения Кулона для описания и прогнозирования характера трения в условиях колебаний.

Применение ультразвука при получении прессовых соединений

В основе процесса получения прессовых посадок с ультразвуком лежит эффект снижения силы трения под действием колебаний, что рассмотрено выше.

В патенте [10] представлен способ запрессовки вала во втулку с наложением ультразвуковых колебаний. Способ реализуется по следующей схеме (рис. 6)

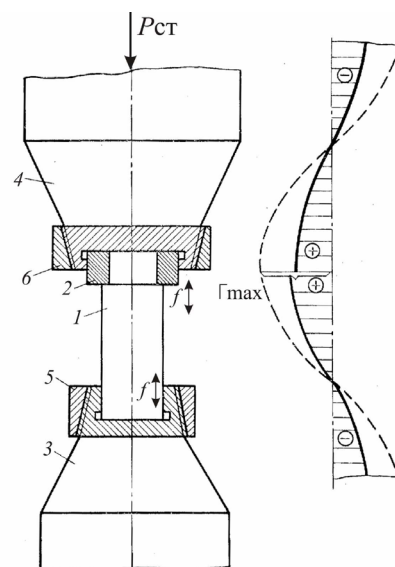


Рис. 6. Схема запрессовки:
1 – вал; 2 – втулка; 3, 4 – ультразвуковые концентраторы; 5 – цапга для вала; 6 – цапга для втулки

Вал и втулка закрепляются на торцах концентраторов двух направленных друг на друга стержневых колебательных систем. Со стороны одной из деталей прикладывается статическая сила. Далее включаются ультразвуковые колебания в синфазном режиме для обеспечения максимального эффекта в месте сборки. Суммарная амплитуда таких колебаний составляет 4,0...5,0 мкм. Отмечено, что при реализации данной схемы сила трения при запрессовки снижается до четырех раз.

После достижения требуемого положения вала относительно втулки снимется статическое усилие и соединение выдерживается при колебаниях порядка 5,0 с. В результате действия ультразвука разрушаются оксидные плёнки и возникают мостики сварки, что обеспечивает повышение прочности соединения.

Патент [11] рассматривает запрессовку вала во внутреннее кольцо подшипника по аналогичной схеме. Притом в процессе сборки у подшипника вращают наружное кольцо. Совместное действие колебаний и вращатель-

ного движения кольца приводит к упрочнению двух колец подшипника через тела качения, что приводит к повышению долговечности подшипника на 10 % по сравнению реализации такой же схемы без колебаний.

В работе [12] рассматривается вопрос запрессовки зубков из ВК10 шарошечных долот с применением ультразвука. В качестве шарошек использовались плоские диски из стали 19ХГНМА, прошедшие механическую и термическую обработку. Экспериментальный стенд состоял из гидроцилиндра, закреплённого на станине, шток которого соединялся с магнитострикционным преобразователем ПМС 2,5-18 с концентратором из закалённой стали. Питание преобразователя осуществлялось ультразвуковым генератором УЗГ 3-4. При амплитуде колебаний 20 мкм и частоте 22000 Гц получали соединения с натягом 11 мкм. В процессе контролировались усилия запрессовки и далее распрессовки образцов (рис. 7).

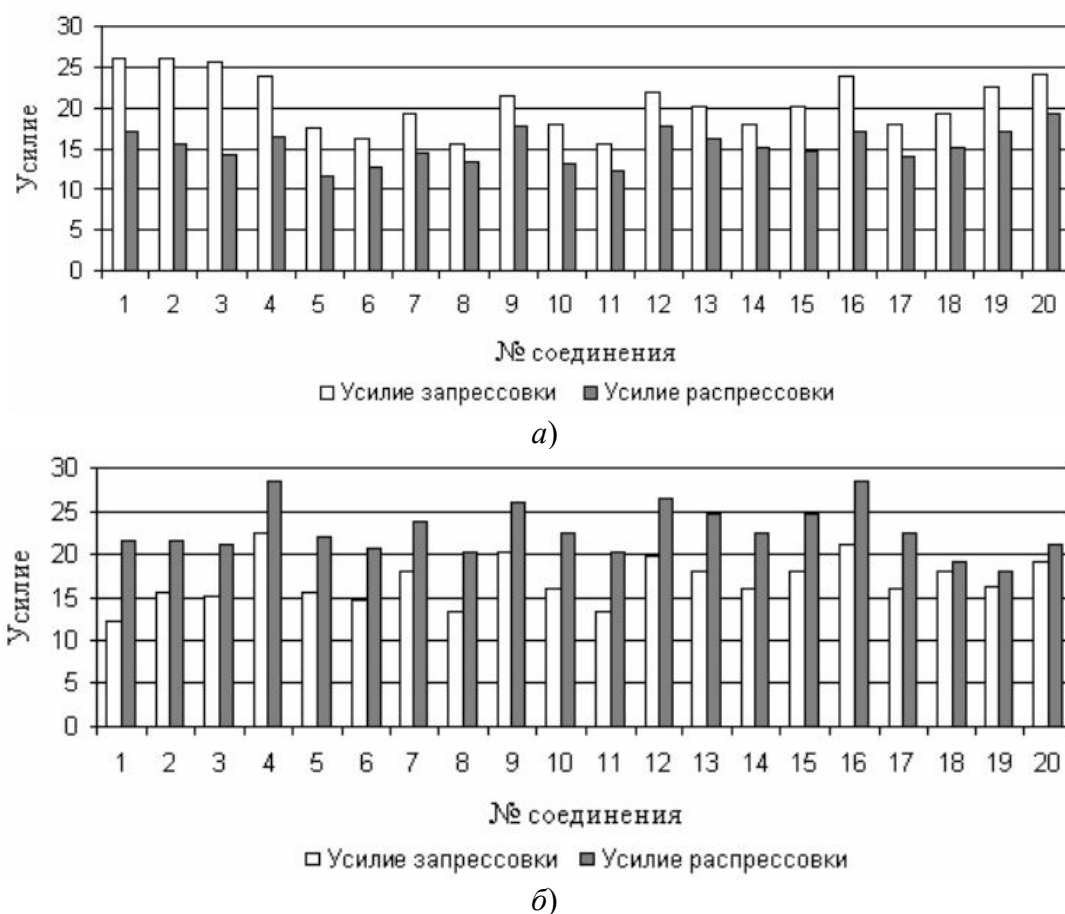


Рис. 7. Величина усилия запрессовки и распрессовки:
а – без ультразвука; б – с ультразвуком

Применение высокочастотных колебаний приводит к снижению усилия сборки до 20 % при одновременном возрастании прочности соединения до 5,0 %. При этом усилия сборки при ультразвуке меньше, чем при разборке соединения.

Исследования [13] посвящены получению посадок с натягом 10...20 мкм валов и втулок диаметром 25 мм при длине соединения 20 мм. Для получения соединения применялась стержневая пьезокерамическая колебательная система с амплитудой колебаний до 15 мкм. Соединяемым деталям сообщалось статическое усилие 3000 Н, которое создавалось гидропрессом. Время сборки составляло 2,0 с. В данной работе больше описывается процесс контроля параметров процесса сборки, поэтому дополнительных данных не представлено.

Отличительной особенностью работы [14] от других является то, что рассматривается процесс запрессовки без сообщения дополнительного статического усилия. В качестве образцов использовались пары иглы и корпуса распылителя форсунки двигателя КАМАЗ-740 (материал 18Х2Н4МА), разбитые на группы для получения различных величин натяга. В процессе проведения эксперимента, собираемые детали устанавливались на подпружиненное основание и поджимались торцом концентратора трёхполуволновой магнитострикционной колебательной системы. Влияние ультразвука на силу трения оценивалось по глубине запрессовки при различных амплитудах колебаний. Сравнивались расчётные значения, учитывающие только механическую составляющую ультразвукового воздействия при ударе излучателя о вал, и экспериментальные значения (рис. 8).

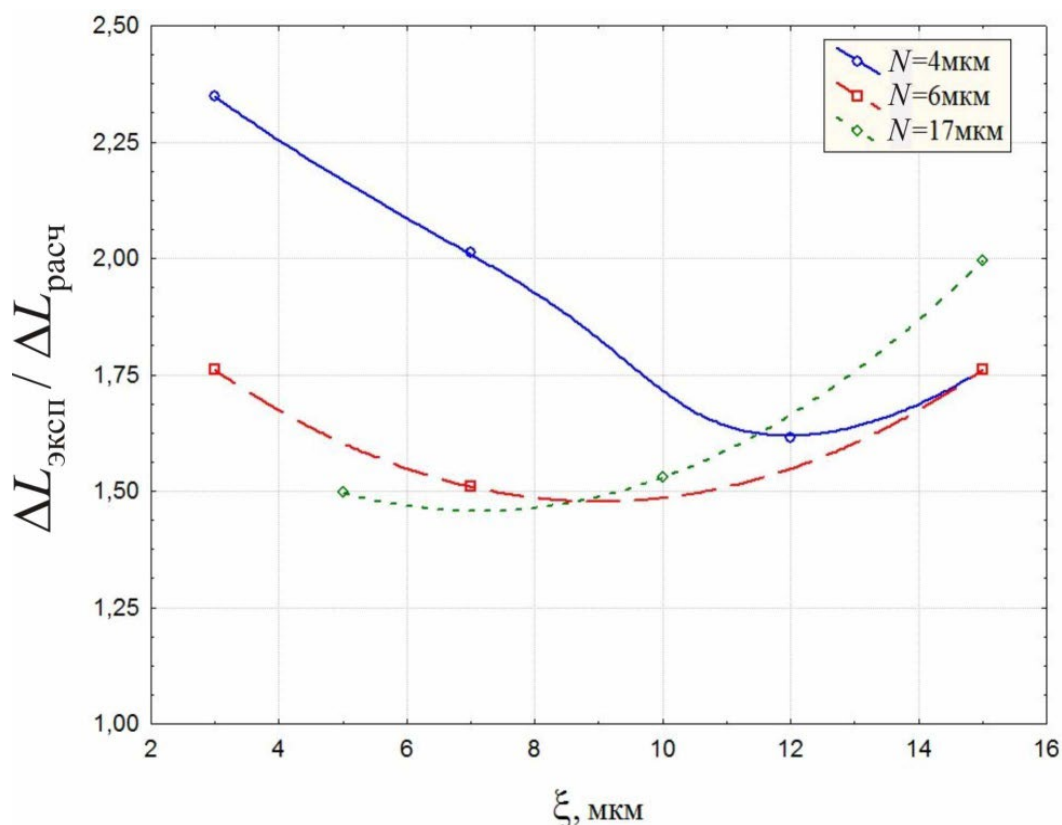


Рис. 8. Зависимость глубины запрессовки от режима ультразвуковой обработки для соединений с натягом 4,6 и 17 мкм

Экспериментальная глубина запрессовки с ультразвуком в 1,5 – 2,5 раза больше, что показывает аналогичное уменьшение силы трения. При этом отмечено, что при маленьких величинах натяга эффективны низкоам-

плитудные колебания, а при увеличении натяга больший эффект возникает при высокоамплитудных режимах обработки.

Процесс получения неразъёмного соединения металлических и пластиковых

деталей рассмотрен в [15]. К запрессовываемой металлической детали подводились ультразвуковые колебания, и прикладывалось статическое усилие (рис. 9).

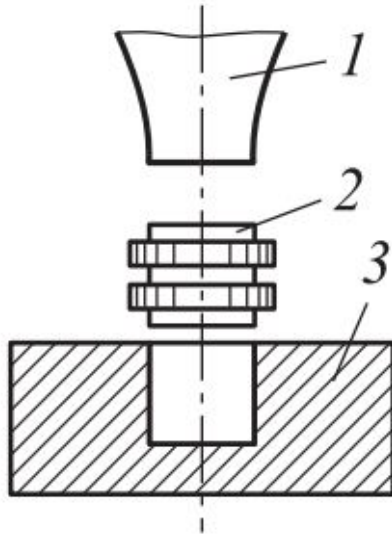


Рис. 9. Схема запрессовки металлической детали в пластиковую:

1 – ультразвуковой концентратор; 2 – металлическая деталь; 3 – пластиковая деталь

Под действием ультразвуковых колебаний в зоне контакта деталей выделяется тепло, что приводит к размягчению термопласта. Форма запрессовываемой детали подобрана так, чтобы после ведущей части, имеющей диаметр больше отверстия, была полость для затекания избыточного пластифицированного материала. После затвердевания и усадки пластмассы металлическая деталь прочно закрепляется в ней.

Заключение

Использование ультразвуковых колебаний эффективно для снижения трения при получении прессовых соединений.

Эффект снижения трения основан на двух механизмах, к которым относится переход к эффективному трению при высокочастотных колебаниях, и создание смазочного слоя при разрушении микронеровностей трущихся поверхностей.

Анализ результатов работ, посвящённых данной теме, показал значительное снижение силы трения для металлических и неметаллических деталей.

Несмотря на положительный эффект от применения ультразвуковых технологий данное направление не получило широкого распространения и нуждается в проведении дополнительных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эрдеди А.А. Техническая механика. Детали машин // М.: Издательство «Высшая школа» 1991. 272с.
2. Орлов П.Н. Краткий справочник металлста – 3-е изд., перераб. и доп./ под ред. Орлова П.Н., Скороходова Е.А. // М.: «Машиностроение», 1987. 960 с.
3. Приходько В.М. Ультразвуковая разборка // М.: Издательство МГАДИ (ТУ), 1995. 94 с.
4. Фатюхин Д. С., Нигметзянов Р. И., Сундуков С. К. Технологический процесс получения заклёпочно-го соединения с помощью ультразвукового ударного воздействия // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2019. № 6 (96). С. 17–21.
5. Приходько В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте автотракторной техники // М.: Издательство «Техполиграфцентр», 2003. 253 с.
6. 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. Iss. 10. P. 833–840.
7. Teidelt E., Starcevic J., Popov V. L. Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction //Tribology Letters. 2012. Vol. 48. P. 51–62.
8. Popov V. L., Starcevic J., Filippov A. E. Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and intrinsic length scale of dry friction processes //Tribology letters. 2010. Vol. 39. P. 25–30.
9. Storck H. et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to traveling wave ultrasonic motors // Ultrasonics. 2002. Vol. 40. №1–8. P. 379–383.
10. Николаев В.А., Папшева Н.Д., Штриков Б.Л. Способ сборки прессовых соединений типа вал-втулка. Патент № SU 1764921 A1, опубл. 30.09.1992.
11. Николаев В.А., Штриков Б.Л., Куликов М.А. Способ соединения с натягом деталей типа вал – втулка. Патент № SU 1556858 A1, опубл. 15.04.1990.
12. Батищева О.М., Шуваев В.Г., Папшев В.А., Анкудинов Д.В. Методика и результаты экспериментальных исследований процесса ультразвуковой запрессовки зубков шарошечных долот с использованием автоматизированной системы научных исследований // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. №1-2. С. 415–417.
13. Шуваев В.Г. Диагностика прессовых соединений при ультразвуковой сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. №1. С. 4–7.
14. Сундуков С.К. Совершенствование технологии получения неразъёмных соединений за счёт использования ультразвука // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 1. С. 7–13.

15. Волков С.С., Розанов Д.С., Станкевич И.В. Разработка и исследование основных особенностей соединения пластмасс с металлами // Известия вузов. Машиностроение. 2020. № 3 (720). С. 15–22.

REFERENCES

1. Erdedi A.A. Engineering mechanics. Machine parts// Moscow: Publishing House «Higher School» 1991, 272 p. (in Russian)

2. Orlov P.N. A quick reference metal worker – 3rd ed., updated and revised/ ed. Orlova P.N., Skorokhodova E.A. // Moscow: "Mashinostroenie", 1987, 960 p. (in Russian).

3. Prihodko V.M. Ultrasonic disassembly // Moscow: Publishing House MADI (TU), 1995, 94 p. (in Russian).

4. Fatyukhin R. I., Nigmatzyanov S. K., Sundukov S.K. Engineering process of manufacturing riveted joint using ultrasonic percussive impact / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2019, no. 6 (96), pp. 17–21.

5. Prihod'ko V.M. Ultrasonic technologies in the production, operation and repair of transport equipment. Moscow: Tekhpolygoncentr, 2003, 253 p.

6. 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. Iss. 10. P. 833–840.

7. Teidelt E., Starcevic J., Popov V. L. Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction //Tribology Letters. 2012. Vol. 48. P. 51–62.

8. Popov V. L., Starcevic J., Filippov A. E. Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and in-trinsic length scale of dry friction process-es //Tribology letters. 2010. Vol. 39. P. 25–30.

9. Storck H. et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors // Ultrasonics. 2002. Vol. 40. №. 1–8. P. 379–383.

10. Nikolaev V.A., Papsheva N.D., Shtrikov B.L. Method of assembling press joints of the shaft-sleeve type. Patent no. SU 1764921 A1, publ. 30.09.1992.

11. Nikolaev V.A., Shtrikov B.L., Kulikov M.A. Pressure coupling of spindle – hob type parts. Patent no. SU 1556858 A1, publ. 15.04.1990.

12. Batishcheva O.M., Shuvaev V.G., Papshev V.A., Ankudinov D.V. Technique and results of experimental researches the process of ultrasonic press fitting dents from cone roll BITS with use of scientific researches automated system / Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2011, no.1–2, pp. 415–417.

13. Shuvaev V.G. Diagnostics of press joints in ultrasonic assembling // Assembly in mechanical engineering, instrument-making. 2007, no. 1. pp. 4–7.

14. Sundukov S.K. Improvement of operational properties of parts permanent joints with ultrasound technologies use/ Assembly in machine-building, instrument-making. 2022, no. 1. pp. 7–13.

15. Volkov S.S., Rozanov D.S., Stankevich I.V. Development and research of the main features of joining plastics and metals / Izvestiya vuzov. Mashinostroenie, 2020, no. 3 (720). pp. 15–22.

Статья поступила в редакцию 14.03.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 30.03.2023

The article was submitted 14.03.2023; approved after reviewing 20.03.2023; assepted for publication 30.03.2023

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.05.2023. Выход в свет 30.05.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16