

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 27-37.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 27-37.

Научная статья
УДК 534-8, 621.9.048.6
doi: 10.30987/2223-4608-2024-27-37

Получение неразъёмных соединений с использованием ультразвуковых колебаний

Вячеслав Михайлович Приходько¹, чл.-кор. РАН, д.т.н.
Сергей Константинович Сундуков², к.т.н.
Равиль Исламович Нигметзянов³, к.т.н.
Дмитрий Сергеевич Фатюхин⁴, д.т.н.

^{1, 2, 3, 4} ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

¹ prikhodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

³ lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

Аннотация. Получение неразъёмных соединений является одним из самых ответственных и трудоёмких этапов сборки изделий машиностроения. Качество выполнения неразъёмных соединений определяет надёжность машины в целом. Это обуславливает актуальность исследований, направленных на повышение качества неразъёмных соединений и на интенсификацию процессов их получения. Эффективным способом для решения данного вопроса является применение ультразвуковых колебаний. Наложение колебаний на свариваемые элементы приводит к изменению параметров кристаллизации, измельчает микроструктуру сварного шва, снижает сварочные деформации и повышает прочность соединения. Деформирование заклёпки ультразвуковым инструментом происходит при снижении требуемого усилия более чем в 10 раз и обеспечивает равномерное распределение радиальных напряжений, что повышает прочность на срез. Ультразвуковая обработка клея при его приготовлении и наложение колебаний на склеиваемые детали снижают вязкость клея, повышают смачиваемость, увеличивают заполняющую способность, что приводит к повышению прочности клеевого соединения на сдвиг. Сообщение ультразвуковых колебаний запрессовываемой детали приводит к снижению трения за счёт его преобразования в квазивязкое, что снижает требуемое усилие запрессовки и уменьшает вероятность повреждения сопрягаемых поверхностей. Ультразвуковая кавитационно-абразивная обработка сложнопрофильных металлических изделий, полученных методами аддитивного производства, позволяет снижать шероховатость на труднодоступных участках и элементах поверхности, что недоступно другими методами. Для каждого из рассматриваемых видов неразъёмных соединений предложены схемы технологических процессов, включающих как типовые операции, так и дополнительные с применением ультразвуковых колебаний, позволяющих повысить свойства получаемых неразъёмных соединений.

Ключевые слова: ультразвук, колебания, неразъёмные соединения

Для цитирования: Приходько В.М., Сундуков С.К., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Получение неразъёмных соединений с использованием ультразвуковых колебаний // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 27–37. doi: 10.30987/2223-4608-2024-27-37

Obtaining fixed joints using ultrasonic vibrations

Vyacheslav M. Prikhodko¹, RAS member-corr, D. Eng.

Sergey K. Sundukov², PhD. Eng.

Ravil I. Nigmatzyanov³, PhD. Eng.

Dmitry S. Fatyukhin⁴, D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Moscow State Automobile and Road Engineering University (MADI), Moscow, Russia

¹ prikhodko@madi.ru

² sergey-lefmo@yandex.ru

³ lefmo@yandex.ru

⁴ mitriy2@yandex.ru

Abstract. Obtaining fixed joints is one of the most demanding and time-consuming stages of assembling machine-building products. The quality of all-in-one connections determines the reliability of the machine as a whole. This determines the relevance of research aimed at improving the quality of non-removable compounds and at the intensification of their production processes. An effective way to solve this issue is the use of ultrasonic vibrations. The imposition of vibrations on the welded elements leads to a change in the crystallization parameters, grinds the microstructure of the weld, reduces welding deformations and increases the strength of the joint. Deformation of the rivet with an ultrasonic tool takes place when the required force is reduced by more than 10 times and ensures uniform distribution of radial stresses, making shear strength better this way. Ultrasonic treatment of the binding material within the process of its production and oscillation superposition on the adherend parts reduce the viscosity of the adhesive, increase wettability and filling capacity, resulting in shear strength hardening in the adhesive joint. The transmittal of ultrasonic vibrations of the pressed part decreases friction due to its transformation into a quasi-viscous one, which takes down the required pressing force and reduces damage probability for mating surfaces. Ultrasonic cavity-abrasive treatment of complex metal products obtained by additive manufacturing methods makes it possible to reduce roughness in hard-to-reach areas and surface elements, which is not possible by other methods. For each fixed joint type under examination, technical plans are proposed, including both standard operations and additional ones using ultrasonic vibrations, which makes properties improvement for the obtained fixed joints possible.

Keywords: ultrasound, vibrations, fixed joints

For citation: Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Obtaining fixed joints using ultrasonic vibrations / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 27–37. doi: 10.30987/2223-4608-2024-27-37

Введение

В машиностроительном производстве одной из наиболее трудоёмких операций является сборка неразъёмных соединений, которые не предполагают последующей разборки, осуществление которой невозможно без повреждения соединённых деталей или соединительного материала [1 – 3].

Неразъёмные соединения классифицируются по способу их образования. К

неразъёмным соединениям, образованным за счёт создания сил молекулярного сцепления, относятся сварные, паяные и клеевые. Для получения данных соединений применяется соединительный материал, который в процессе соединения находится в жидком состоянии (это не относится к механическим и термомеханическим видам сварки), который после кристаллизации (для сварного шва, припоя) или полимеризации (для клеев) создают прочную связь между

соединяемыми элементами [4, 5]. Сюда же можно отнести способ получения неразъёмных соединений методом послойного синтеза, который заключается в изготовлении неразъёмного соединения целиком вместо отдельного изготовления соединяемых деталей и их последующей сборки [6, 7]. Неразъёмные соединения, полученные с применением механической силы, делятся на заклёпочные, которые получают путём деформирования соединительного элемента, и пресовые посадки с гарантированным натягом [8, 9].

Неразъёмные соединения играют важнейшую роль в обеспечении работы механизмов и составляют до половины всех соединений. В случаях ремонта изделия, связанного с поломкой неразъёмного соединения, требуется замена соединения целиком, либо восстановление соединения за счёт сварки, пайки и склейки. При этом возрастают время и затраты на проведение ремонтных работ. Следовательно, от качества выполнения неразъёмных соединений деталей зависит работоспособность и ремонтпригодность узлов и механизмов машин [10].

Поэтому актуальным направлением исследований является повышение эксплуатационных свойств неразъёмных соединений и интенсификация процессов их получения.

В лаборатории электрофизических методов обработки МАДИ данное направление разрабатывается за счёт использования в технологиях создания неразъёмных соединений ультразвуковых колебаний. В данной статье предложены схемы технологических процессов с применением ультразвука на основе полученных ранее результатов.

Получение сварных соединений методом приложения колебаний к свариваемым элементам

Способ сварки с приложением ультразвуковых колебаний к свариваемым элементам позволяет осуществлять воздействие в течение всего сварочного цикла от формирования ванны расплава до охлаждения соединения. В результате действия звукового давления, кавитации и акустических течений снижается температура начала кристаллизации, увеличивается количество образуемых зародышей и уменьшается скорость их роста, что приводит к измельчению микроструктуры сварного шва, повышению свойств на субмикроуровне, сглаживанию значений микротвёрдости, повышению прочности и пластичности соединения [11].

Для реализации данного способа сварки предлагается следующая последовательность технологического процесса (рис. 1):

1. Подготовка кромок под сварку для очистки поверхности от окалины или оксидных плёнок;

2. Подготовка места приложения колебаний требуется для обеспечения акустического контакта между поверхностью ультразвукового излучателя и свариваемым элементом и заключается в шлифовании его поверхности до шероховатости $Ra12,5$. При этом места приложения колебаний и наложения сварного шва должны находиться в местах максимальной амплитуды изгибных колебаний, которые определяются из условия равенства резонансной частоты источника колебаний и собственной частоты колебаний свариваемых пластин, что подробно описано в [11];

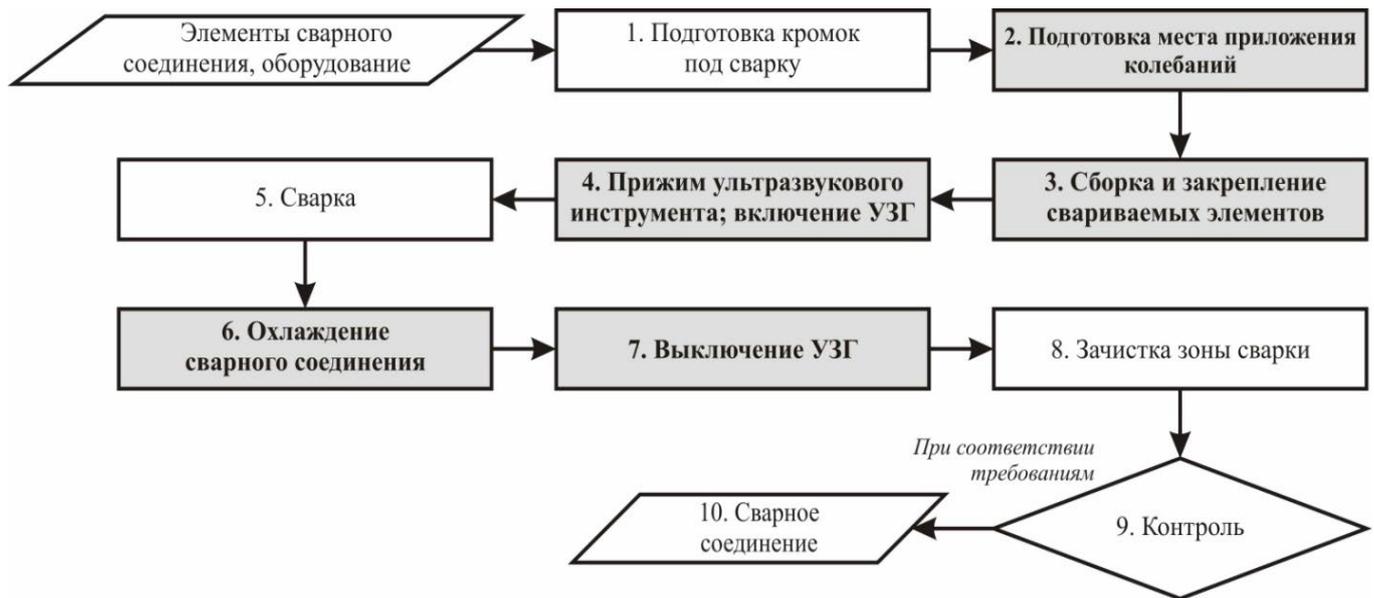


Рис. 1. Схема технологического процесса сварки с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 1. Diagram of the technical welding process of welding using ultrasonic vibrations

3. Сборка и закрепление свариваемых элементов заключается в их расположении с требуемым зазором и, в случае необходимости, прихватки с последующей её зачисткой. Закрепление заготовок осуществляется в местах, обеспечивающих расстояние, необходимое для согласования резонансных частот источника колебаний и собственных колебаний свариваемых элементов;

4. Прижим ультразвукового инструмента с силой, обеспечивающей акустический контакт (при $Ra_{12,5}$ составляет порядка 50 Н) и включение ультразвукового генератора, в результате чего свариваемые элементы совершают изгибные колебания ультразвуковой частоты;

5. Сварка элементов на режимах, определённых стандартными расчётными методами;

6. Охлаждение сварного соединения осуществляется при продолжении действия ультразвуковых колебаний до достижения в зоне сварки температуры, ниже температуры

рекристаллизации свариваемого материала, с целью обеспечения ультразвукового воздействия в течение всего процесса формирования структуры шва;

7. Выключение ультразвукового генератора и последующий отвод ультразвукового инструмента от сваренной конструкции;

8. Зачистка зоны сварки от брызг расплавленного металла;

9. Контроль осуществляется неразрушающими методами;

10. Получение сварного соединения, обладающего повышенными механическими свойствами.

Область применения технологии: сварка изделий и конструкций из простого профиля, обладающего геометрией с плоскостями (листы, квадраты, шестигранники, швеллеры и т. д.), например автомобильные рамы и стрелы дорожно-строительных машин.

Получение заклёпочных соединений под действием ультразвука

Деформация заклёпки в условиях ультразвуковых колебаний осуществляется в результате микроударного высокочастотного воздействия при значительном повышении пластической деформации материала заклёпки. Способ отличается от ударной и прессовой клёпки меньшим усилием расклёпывания (более, чем в 10 раз), большим временем деформации (для заклёпки из Д16 порядка 7 с), но при этом более полным заполнением зазора между стержнем заклёпки и установочным отверстием, равномерным распределением радиальных напряжений, что приводит к росту прочности на срез до 20 % [12]. Для реализации данного способа клёпки предлагается следующая последовательность технологического процесса (рис. 2):

1. Нанесение герметика на сопрягаемые поверхности требуется при требовании герметичности соединений, используемых, например, в авиа- и судостроении;

2. Фиксация элементов соединения требуется для обеспечения соосности

отверстий соединяемых элементов при выполнении следующей операции;

3. Сверление и зенкерование отверстий под заклёпки требуется для получения установочного отверстия с необходимым зазором 0,1 мм и места установки закладной головки заклёпки;

4. Установка заклёпок в установочное отверстие;

5. Прижим ультразвукового инструмента к заклёпке с оптимальной силой, которая при расклёпывании обеспечит максимальное поглощение акустической энергии деформируемым элементом (для заклёпки из Д16 $F = 50$ Н при амплитуде колебаний 10 мкм);

6. Клёпка ультразвуковым инструментом;

7. Герметизация замыкающей головки требуется для герметичных конструкций, чтобы исключить воздействие среды в месте зазора между стержнем и установочным отверстием, образованным вследствие бочкообразной формы стержня. Так как при разработанном способе заполнение отверстия полное, без зазоров, то появляется возможность отказа от этой операции

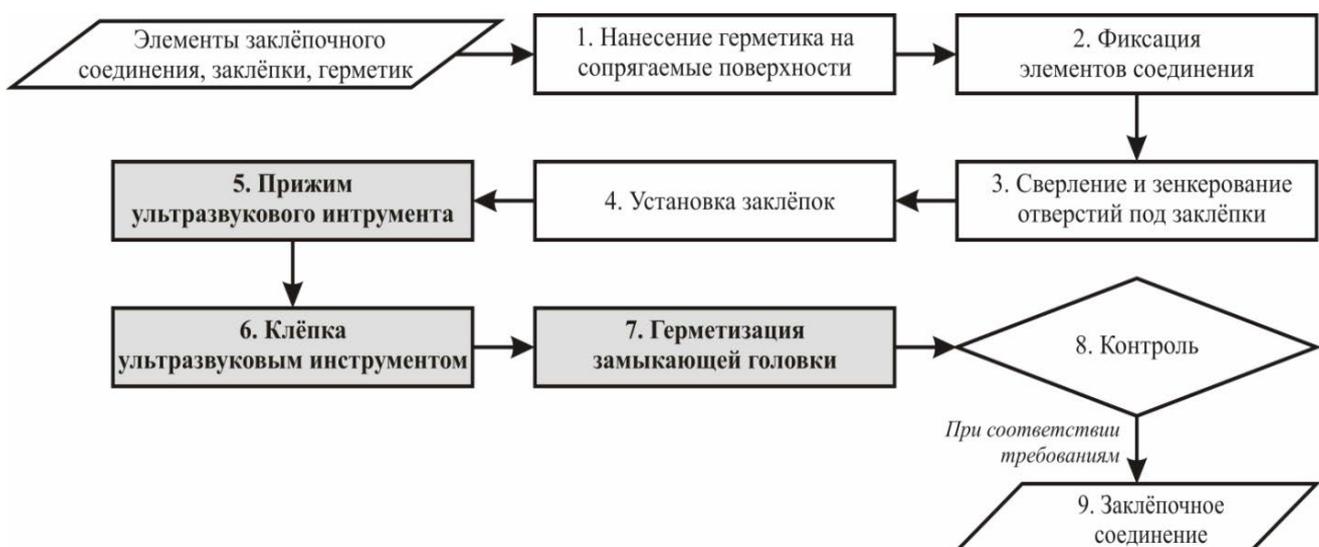


Рис. 2. Схема технологического процесса клёпки с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 2. Diagram of the technical riveting process using ultrasonic vibrations

8. Контроль осуществляется неразрушающими методами;

9. Получение заклёпочного соединения, обладающего повышенными механическими свойствами.

Область применения разработанной технологии: сборка фюзеляжей летательных аппаратов, сборка высоконагруженных узлов машиностроения, например, крепление гусеничных звеньев дорожно-строительной техники, сборка резервуаров, работающих под высоким давлением, где имеются повышенные требования по герметичности.

Получение клеевых соединений с использованием ультразвуковых колебаний

Применение ультразвуковых колебаний в технологии получения клеевых соединений эффективно при приготовлении клеевого состава и при приложении к склеиваемым элементам [13]. Обработка клеевого состава приводит к снижению его вязкости за счёт разрушения макромолекул под действием

кавитации, обеспечивает дегазацию смеси, что повышает прочность самого клея и увеличивает его заполняющую способность. Прочность клеевого соединения повышается в 1,5 раза. Наложение колебаний на склеиваемые элементы повышает смачиваемость поверхности и создаёт звукокапиллярный эффект, позволяющий клею лучше проникать в микронеровности поверхности, что повышает прочность соединения на 40 %.

Для реализации данного способа склеивания предлагается следующая последовательность технологического процесса (рис. 3):

1. Подготовка склеиваемых поверхностей
2. Смешивание компонентов клеевого состава
3. Ультразвуковая обработка клеевого состава
4. Нанесение клея на склеиваемые поверхности
5. Сборка соединения
6. Прижим ультразвуковым инструментом
7. Выдержка
8. Очистка от излишков клея
9. Контроль
10. Клеевое соединение



Рис. 3. Схема технологического процесса склеивания с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 3. Diagram of the technical adhering process using ultrasonic vibrations

2. Смешивание компонентов клеевого состава заключается в равномерном перемешивании связующего и отвердителя в заданных пропорциях с последующей дегазацией смеси. Последующее применение ультразвуковой обработки осуществляет полную дегазацию смеси, что позволяет осуществлять данный этап вручную с высокой скоростью перемешивания;

3. Ультразвуковая обработка клеевого состава с целью снижения вязкости, уменьшения угла смачивания, и повышения его свойств после полимеризации;

4. Нанесение клея на склеиваемые поверхности механическим способом;

5. Сборка соединения заключается в ориентации склеиваемых деталей в конечном положении;

6. Выполнение этапа прижима склеиваемых соединений зависит от их геометрии и возможности приложения ультразвуковых колебаний. Если производится склеивание мелкогабаритных и/или сложнопрофильных деталей, не имеющих плоских поверхностей для приложения ультразвуковых колебаний, то осуществляется механический прижим, далее идёт этап 9. Если склеиваются детали, обладающие геометрией, обеспечивающей возможность приложения ультразвуковых колебаний, то прижим осуществляется ультразвуковым инструментом;

7. Включение ультразвукового генератора для сообщения колебаний на режиме, обеспечивающем максимальный капиллярный эффект для используемого клея;

8. Выключение ультразвукового генератора после 2...3 с обработки, что соответствует времени подъёма клея в капилляре до максимального значения;

9. Выдержка клеевого соединения под нагрузкой до полной полимеризации в соответствии с инструкцией;

10. Очистка от излишков клея механическими способами;

11. Контроль соединения осуществляется неразрушающими методами;

12. Получение клеевого соединения, обладающего повышенными механическими свойствами.

Область применения разработанной технологии: повышение прочности клеевых соединений в машиностроении, например, соединение элементов кузова, наклеивание фрикционных накладок на тормозные колодки, стопорение резьбовых деталей (шатунные болты, болты крепления поршневых пальцев); заделка трещин; нанесение полимерных покрытий; создание полимерных композиционных материалов.

Получение прессовых соединений методом с наложением ультразвуковых колебаний

Приложение продольных колебаний при запрессовке позволяет снизить силу трения между сопрягаемыми поверхностями до 50...80 % в зависимости от величины натяга и начальной шероховатости, что позволяет значительно снизить усилие запрессовки и снизить вероятность повреждения соединяемых деталей. В зависимости от параметров соединяемых деталей возможно сообщение охватывающей детали радиальных колебаний с амплитудой, превышающей величину требуемого натяга [14].



Рис. 4. Схема технологического процесса запрессовки с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 4. Technical process scheme of pressing using ultrasonic vibrations

Для реализации данного способа запрессовки предлагается следующая последовательность технологического процесса (рис. 4):

1. Подготовка соединяемых поверхностей заключается в обеспечении требуемой шероховатости, позволяющей обеспечить требуемую величину натяга. С учётом наложения колебаний в процессе запрессовки можно использовать меньшую шероховатость для увеличения фактического натяга при одинаковом усилии запрессовки;

2. Установка элементов соединения для последующей запрессовки;

3. Прижим ультразвукового инструмента к запрессовываемой детали при использовании схемы с продольными колебаниями или к охватываемой при использовании схемы с радиальными колебаниями;

4. Включение ультразвукового генератора для начала передачи колебаний с целью снижения силы трения при запрессовке;

5. Запрессовка производится с меньшим усилием, чем без применения колебаний. При этом в зависимости от геометрии соединения и условий сборки усилие может прикладываться со стороны ультразвуковой колебательной системы или за счёт прессы;

6. Выключение ультразвукового генератора после незначительной выдержки для

создания мостиков сварки, что предлагалось в работе [9];

7. Контроль соединения осуществляется неразрушающими методами;

8. Получение прессового соединения, обладающего повышенным натягом и с меньшей вероятностью повреждения сопрягаемых поверхностей.

Область применения разработанной технологии: процессы механической запрессовки без применения нагрева и охлаждения собираемых деталей, например, запрессовка вкладышей подшипников скольжения, запрессовка направляющей втулки клапана в отверстие блока цилиндров, запрессовка шпонки в шпоночный паз на валу.

Селективное лазерное плавление с финишной ультразвуковой кавитационно-абразивной обработкой (КАО)

При ультразвуковой жидкостной обработке рабочими телами являются кавитационные пузырьки, что позволяет осуществлять воздействие на поверхностный слой обрабатываемой детали, обладающей сложной геометрией. При добавлении в технологическую жидкость абразивных частиц им передаётся

энергия, возникающая при схлопывании кавитационных пузырьков. При соударении с поверхностью частицы абразива оказывают

микрорежущее воздействие, приводящее к снижению высотных параметров шероховатости более, чем в 2 раза [15].



Рис. 5. Схема технологического процесса селективного лазерного плавления с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 5. Technical process scheme of selective laser melting using ultrasonic vibrations

Для реализации технологического процесса селективного лазерного плавления с финишной ультразвуковой обработкой предлагается следующая последовательность операций (рис. 5):

1. Разработка стратегии обработки заключается в программной обработке 3D-модели с разделением её на слои и создании программы лазерного плавления металлического порошка для каждого слоя с учётом необходимых поддержек. Разработка стратегии ультразвуковой КАО на установке координатной обработки осуществляется по той же 3D-модели;
2. Загрузка металлического порошка после просеивания в бункер установки лазерного селективного плавления;
3. Селективное лазерное плавление слоёв металлического порошка по разработанной ранее программе;
4. Отделение заготовки от подложки для её последующей обработки. Осуществляется механическими способами;

5. Очистка от остатков порошка, налипшего на поверхности и застрявшего в труднодоступных местах, осуществляется механическими и вибрационными способами. Для удаления порошка из сложнопрофильных внутренних поверхностей возможно использование ультразвуковой очистки;
6. Контроль пористости и шероховатости полученной заготовки;
7. Термообработка для устранения деформаций и снятия внутренних напряжений;
8. Удаление поддержек, напечатанных для обеспечения формообразования заготовки;
9. Ультразвуковая КАО сложнопрофильных участков поверхности с целью снижения шероховатости до требуемых показателей;
10. Контроль параметров шероховатости после ультразвуковой финишной обработки;
11. Получение неразъёмного соединения, обладающего сложной геометрией и

соответствующего требованиям по качеству поверхности.

Область применения разработанной технологии: производство сложнопрофильных металлических изделий методами аддитивного производства, в том числе для замены сборочных операций получения неразъёмного соединения на синтез соединения целиком, например, решётка воздухозаборника и стопорная шайба [15].

Заключение

Предложены схемы технологических процессов для получения сварных, заклёпочных, клеевых, прессовых соединений и изделий, полученных аддитивным производством, с применением ультразвуковых колебаний. Во всех случаях эффекты, возникающие при использовании колебаний, приводят к повышению свойств получаемых соединений или интенсифицируют технологию их получения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Влияние, оказываемое активным охлаждением, на неразъёмное соединение, образованное в результате электродуговой сварки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. № 3. С. 160–169.
2. Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А. Составные конструктивные элементы для неразъёмных соединений // Сварочное производство. 2016. № 3. С. 33–38.
3. Эрдеди А.А. Техническая механика. Детали машин. М.: Издательство «Высшая школа». 1991. 272с.
4. Баурова Н.И., Сергеев А.Ю. Структурные исследования механизма разрушения клеевых соединений после испытаний методом pull-out // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 4. С. 24–28.
5. Скупов А.А. и др. Создание неразъёмных соединений из интерметаллидных титановых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). С. 31–38.
6. Зорин В.А., Полухин Е.В. Аддитивные технологии // СТТ: Строительная техника и технологии. 2016. № 3. С. 54–57.

7. Garcia R., Prabhakar P. Bond interface design for single lap joints using polymeric additive manufacturing // Composite Structures. 2017. Т. 176. С. 547–555.

8. Овчинников В.В., Новиков В.А., Малов Д.А. Сравнительные испытания заклёпочных соединений алюминиевых сплавов, полученных различными методами клепки // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 3. С. 7–12.

9. Авт. св-во № 1764921 А1 СССР, МПК В23Р 11/02. Способ сборки прессовых соединений типа вал-втулка: № 4839393: заявл. 15.06.1990: опубл. 30.09.1992 / В.А. Николаев, Н.Д. Папшева, Б.Л. Штриков; заявитель Самарский политехнический институт им. В.В. Куйбышева, самарский филиал института машиноведения им. А.А. Благодрава

10. Сундуков С.К. Ультразвуковые технологии в процессах получения неразъёмных соединений. М.: ООО «Техполиграфцентр», 2023. 269 с.

11. 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

12. Сундуков С.К. Анализ деформации заклёпки при наложении ультразвуковых колебаний // Технология металлов. 2023. № 1. С. 28–37. DOI 10.31044/1684-2499-2023-0-1-28-37

13. Сундуков С.К. Подготовка эпоксидного клея методом ультразвуковой обработки // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 9. С. 32–40. DOI 10.31044/1813-7008-2023-0-9-32-40

14. Сундуков С.К. Снижение силы трения при запрессовке с наложением ультразвуковых колебаний // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2023. № 12. С. 25–33. DOI 10.31044/1684-2561-2023-0-12-25-33

15. Influence of Postprocessing on Wear Resistance of Aerospace Steel Parts Produced by Laser Powder Bed Fusion / A.S. Metel, S.N. Grigoriev, T.V. Tarasova [et al.] // Technologies. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 73. DOI 10.3390/technologies8040073

REFERENCES

1. Tkacheva A.V., Abashkin E.E. The influence exerted by active cooling on the permanent connection formed as a result of electric arc welding // The bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics, 2022, no. 3, pp. 160–169.
2. Latypova E.Yu., Tsumarev Yu.A. Composite structural elements for permanent joints // Welding production. 2016, no. 3, pp. 33–38.

3. Erdedi A.A. Technical mechanics. Machine parts. Moscow: Publishing house "Higher School", 1991, 272 p.

4. Baurova N.I., Sergeev A.Yu. Structural studies of fracture patterns in adhesive joints after pullout testing // Glues. Sealants. Technologies, 2014, no. 4, pp. 24–28.

5. Skupov A.A. et al. Creation of non-removable compounds from intermetallic titanium alloys (review) // Proceedings of VIAM. 2021, no. 7 (101), pp. 31–38.

6. Zorin V.A., Polukhin E.V. Additive technologies // CMT: Construction machinery and technologies. 2016, no. 3, pp. 54–57.

7. Garcia R., Prabhakar P. Bond interface design for single lap joints using polymeric additive manufacturing // Composite Structures. 2017. T. 176. C. 547–555.

8. Ovchinnikov V.V., Novikov V.A., Malov D.A. Comparative tests of rivet connections of aluminum alloys obtained by different methods of riveting // Procurement production in machine building. 2015, no. 3, pp. 7–12.

9. Inventor's cert. No. 1764921 A1 of the USSR, IPC B23P 11/02. Method of assembly of press joints of the shaft-sleeve type: No. 4839393: application 06/15/1990 : publ. 30.09.1992 / V.A. Nikolaev, N.D. Papsheva, B.L. Shtrikov; applicant Samara Polytechnic

Institute named after V.V.Kuibyshev, Samara branch of the Institute of Mechanical Engineering named after A.A.Blagonravov

10. Sundukov S.K. Ultrasonic technologies in the processes of obtaining permanent joints. Moscow : Tech-Polygraphcenter LLC, 2023, 269 p.

11. Sundukov S.K. Features of applying ultrasonic vibrations in the welding process // Metalworking (technology, equipment, tools). 2022, vol. 24, no. 2, pp. 50–66. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66

12. Sundukov S.K. Study of rivet deformation under the application of ultrasonic vibrations // Technology of metals. 2023, no. 1, pp. 28–37. DOI 10.31044/1684-2499-2023-0-1-28-37

13. Sundukov S.K. Preparation of epoxy glue by ultrasonic treatment // Glues. Sealants. Technologies. 2023, no. 9, pp. 32–40. DOI 10.31044/1813-7008-2023-0-9-32-401

14. Sundukov S.K. Reduction of friction force during pressing with imposition of ultrasonic vibrations // Repair. Recovery. Modernization. 2023, no. 12, pp. 25–33. DOI 10.31044/1684-2561-2023-0-12-25-33

15. Influence of Postprocessing on Wear Resistance of Aerospace Steel Parts Produced by Laser Powder Bed Fusion / A.S. Metel, S.N. Grigoriev, T.V. Tarasova [et al.] // Technologies. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 73. DOI 10.3390/technologies8040073

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 28.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 17.04.2024.