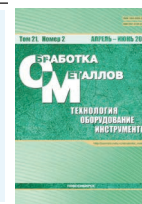




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Применение способа подвода ультразвукового воздействия и оценка его эффективности при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов

Алексей Иванов ^{a, *}, Владимир Белобородов ^b, Владимир Красновейкин ^c,
 Валерий Рубцов ^d, Евгений Колубаев ^e

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

^a <http://orcid.org/0000-0001-8959-8499>, ivan@ispms.tsc.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, vabel@ispms.tsc.ru,
^c <http://orcid.org/0000-0003-1405-0597>, volodia74ms@yandex.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.ru,
^e <http://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14:620.172.242

История статьи:

Поступила: 18 марта 2019
 Рецензирование: 17 апреля 2019
 Принята к печати: 04 мая 2019
 Доступно онлайн: 15 июня 2019

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием
 Ультразвуковое воздействие
 Лазерная доплеровская виброметрия
 Алюминиевый сплав

Финансирование

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23.

АННОТАЦИЯ

Введение. Технологические возможности сварки трением с перемешиванием имеют ограничения, связанные с образованием сварочных дефектов, изменением структуры материала и возникновением остаточных напряжений, что ухудшает эксплуатационные характеристики сварных соединений. Известным методом улучшения характеристик сварных соединений является приложение различными способами ультразвукового воздействия в процессе сварки. Однако применение таких способов либо требует сложного технологического оснащения, либо сопровождается значительными потерями мощности и затуханием ультразвуковых колебаний. Перспективным представляется приложение ультразвукового воздействия способом с жесткой фиксацией соноотрода на свариваемом материале, поскольку он не требует сложного технологического оснащения и обеспечивает эффективную передачу колебаний в зону формирования сварного соединения. **Целью работы** является оценка эффективности ультразвукового воздействия, подводимого способом с жесткой фиксацией соноотрода, путем измерения интенсивности результирующих колебаний и анализа их влияния на прочностные характеристики сварных соединений, получаемых сваркой трением с перемешиванием. **Результаты и обсуждение.** При помощи лазерной доплеровской виброметрии проведено сравнение двух способов подвода ультразвуковых колебаний. Показано, что способ с жесткой фиксацией соноотрода является более эффективным в сравнении с контактным способом, поскольку при значительно меньшей подводимой мощности обеспечивает интенсивность воздействия колебаний в 2,5...4 раза выше на весь объем материала независимо от расстояния до места их приложения. Механические испытания образцов сварных соединений из сплава Д16Т, полученных сваркой трением с перемешиванием, продемонстрировали, что приложение ультразвуковых колебаний в процессе сварки приводит к повышению прочности на разрыв в соединениях на 10...13 %. При этом достигнутая максимальная прочность составляет 92 % от прочности основного металла. Кроме того, показано, что приложение ультразвуковых колебаний в процессе сварки соединений толщиной 2,5 и 5,0 мм привело к повышению прочности материала в зоне перемешивания, а для соединений толщиной 10,0 мм – к упрочнению в зоне термомеханического воздействия.

Для цитирования: Применение способа подвода ультразвукового воздействия и оценка его эффективности при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов / А.Н. Иванов, В.А. Белобородов, В.А. Красновейкин, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 40–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-40-52.

Введение

Сварка трением с перемешиванием является перспективным способом получения неразъемных соединений и может рассматриваться в качестве альтернативы традиционным способам

сварки плавлением особенно применительно к алюминиевым сплавам [1, 2]. При оптимальном сочетании параметров сварочного режима такая сварка позволяет формировать неразъемные соединения, прочностные и усталостные характеристики которых приближаются к характеристикам основного металла [3]. Технологические возможности сварки имеют некоторые ограничения, связанные с образованием сварочных дефектов [4], изменением структуры материала в зоне формирования сварного шва [5] и

*Адрес для переписки

Иванов Алексей Николаевич, м.н.с.
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
 пр. Академический 2/4,
 г. Томск, 634055, Россия
 Тел.: 8 (382) 228–68–63, e-mail: ivan@ispms.tsc.ru

возникновением остаточных напряжений [6]. Для устранения указанных ограничений разрабатываются различные способы воздействия на исходный материал либо сварное соединение как в процессе, так и после его формирования [7–9].

Одним из методов улучшения характеристик сварных соединений является приложение ультразвуковых колебаний непосредственно в процессе сварки. В результате наблюдается снижение дефектообразования и повышение их прочностных и усталостных характеристик [10]. Кроме того, приложение ультразвукового воздействия оказывает влияние и на параметры сварочного процесса, такие как усилие сварки и осевое усилие на инструменте, повышающие эффективность процесса формирования сварного соединения [11].

На сегодняшний день известны несколько основных способов приложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки. Широко используется контактное с усилием прижима приложение колебаний к сварочному инструменту [12] в его радиальном [13] и осевом [14] направлении, которое преобразуется в высокочастотные механические колебания, передаваемые от инструмента к свариваемому материалу. Однако данный способ либо требует сложного технологического оснащения, либо сопровождается большими потерями мощности при передаче колебаний от их источника к свариваемому материалу [15].

Другим способом является контактное с усилием прижима приложение ультразвуковых колебаний к свариваемому материалу. Для передачи колебаний к заготовке от соноотрода (волновода) используется закрепленный на его конце специальный индентор округлой формы, изготовленный из материала с высокой твердостью [16, 17]. Недостатком контактного способа является низкая эффективность передачи колебаний – соотношение генерируемой источником и поступающей к материалу мощности может колебаться в пределах от 3:1 до 6:1 [18].

Авторами настоящей работы предложен способ ультразвукового воздействия на свариваемый материал с жесткой фиксацией соноотрода [19], не требующий сложного технологического оснащения и обеспечивающий эффективную передачу колебаний в зону образования сварного соединения в процессе сварки.

Целью работы является оценка эффективности ультразвукового воздействия, подводимого способом с жесткой фиксацией соноотрода, путем измерения интенсивности результирующих колебаний и анализа их влияния на прочностные характеристики сварных соединений, получаемых сваркой трением с перемешиванием.

Методика исследований

Исследования проводились с использованием экспериментального стенда для сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием (рис. 1, а), разработанного ИФПМ СО РАН совместно с ЗАО «Сеспель» и комплекта ультразвукового оборудования, разработанного ООО «УЗОиТ».

Комплект ультразвукового оборудования включал в себя: охлаждаемый магнитострикционный преобразователь с резонансными соноотходами первой и второй ступени, изготовленными из высокопрочного титанового сплава (рис. 1, б); генератор ультразвуковых колебаний с функцией автоматического поиска и подстройки резонансной частоты преобразователя (рис. 1, в); автономный охладитель магнитострикционного преобразователя (рис. 1, г). Прямолинейный соноотрод первой ступени диаметром 32 мм интегрирован с магнитостриктором. Соноотрод второй ступени диаметром 22 мм имел изгиб 90° и прикреплялся к соноотроду первой ступени с помощью соединительного винта (рис. 2). Данное оборудование обеспечивало генерацию ультразвуковых колебаний частотой $22 \pm 1,65$ кГц и мощностью до 2 кВт.

С помощью комплекта оборудования были реализованы два способа подвода ультразвуковых колебаний с целью сравнения интенсивности их воздействия на свариваемый материал. Первый способ заключается в жесткой фиксации соноотрода и реализуется креплением к одной из заготовок через технологическое отверстие соноотрода второй ступени с фиксацией болтом таким образом, чтобы обеспечить плотный контакт его торца с поверхностью свариваемого материала (рис. 2, а). Момент затяжки болта составлял 150...200 Н·м.

Вторым способом является контактный с усилием прижима подвод колебаний, который реализуется следующим образом. На торце

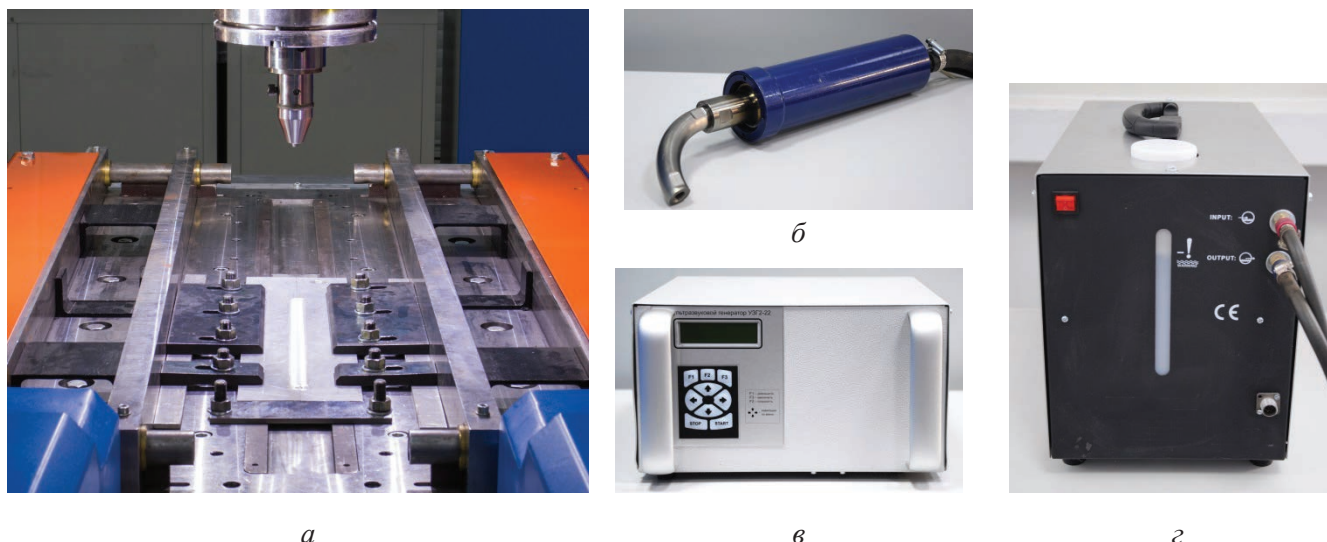


Рис. 1. Экспериментальный стенд для сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием: рабочий стол оборудования (а); магнитостриктор с сонотродами первой и второй ступени (б); генератор ультразвуковых колебаний (в); охладитель (г)

Fig. 1. The test bench for ultrasonic-assisted friction stir welding: welding table of the welding machine (a); magnetostrictor with first-stage and second-stage sonotrods (b); ultrasonic generator (v); cooler (z)

сонотрода второй ступени с использованием резьбового соединения закреплялся твердосплавный наконечник сферической формы радиусом 20 мм. С использованием специальной оснастки магнитостриктор монтировался на рабочем столе оборудования с прижимом наконечника к образцу с усилием $F_N = 150$ Н, достаточным для исключения его отрыва от поверхности при передаче колебаний (рис. 2, б). При этом магнитостриктор устанавливался так, чтобы торец сонотрода второй ступени был параллелен поверхности образца. Таким образом, ввод колебаний осуществлялся максимально эффективно – под углом 90° к поверхности.

Интенсивность ультразвукового воздействия оценивалась по результатам измерений виброскоростей методом лазерной виброметрии с использованием доплеровского сканирующего виброметра PSV-500-3D. Измерения проводились на образце, представляющем собой пластину из сплава Д16Т размером 600×120 мм толщиной 12,0 мм. Для измерения поля виброскоростей на поверхностях образца применялась сканирующая 3D-голова виброметра. Синхронизация осуществлялась по опорному сигналу, который получали с торца сонотрода первой ступени с помощью 1D-головы виброметра (рис. 2). Сканирование проводилось по лицевой поверхности

образца, а также по торцевой поверхности, удаленной от места подвода колебаний (рис. 2, в, г).

Ввиду ограничения прямой видимости лицевой поверхности заготовки, закрепленной на сварочном столе, ее сканирование выполнялось с использованием металлического зеркала из комплекта поставки виброметра. Зеркало устанавливалось под углом 45° к поверхности заготовки и обеспечивало необходимый обзор для ее сканирования. Размер области сканирования лицевой поверхности, расположенной на расстоянии 5 мм от места ввода колебаний, составлял $\approx 180 \times 85$ мм. При сканировании торца захватывалось все поперечное сечение образца. Область сканирования разбивалась на прямоугольную сетку с шагом $\approx 1,2$ мм, в каждом узле которой проводились прямые бесконтактные измерения величины компоненты виброскорости, нормальной к поверхности образца.

По измеренным значениям компонента виброскорости программным обеспечением виброметра рассчитывалось соответствующее значение компонента виброперемещения. В качестве критерия интенсивности воздействия принималась величина амплитуды виброперемещения, которая показывает, насколько смещается из положения равновесия точка на поверхности образца при прохождении через нее ультразвуковой волны.

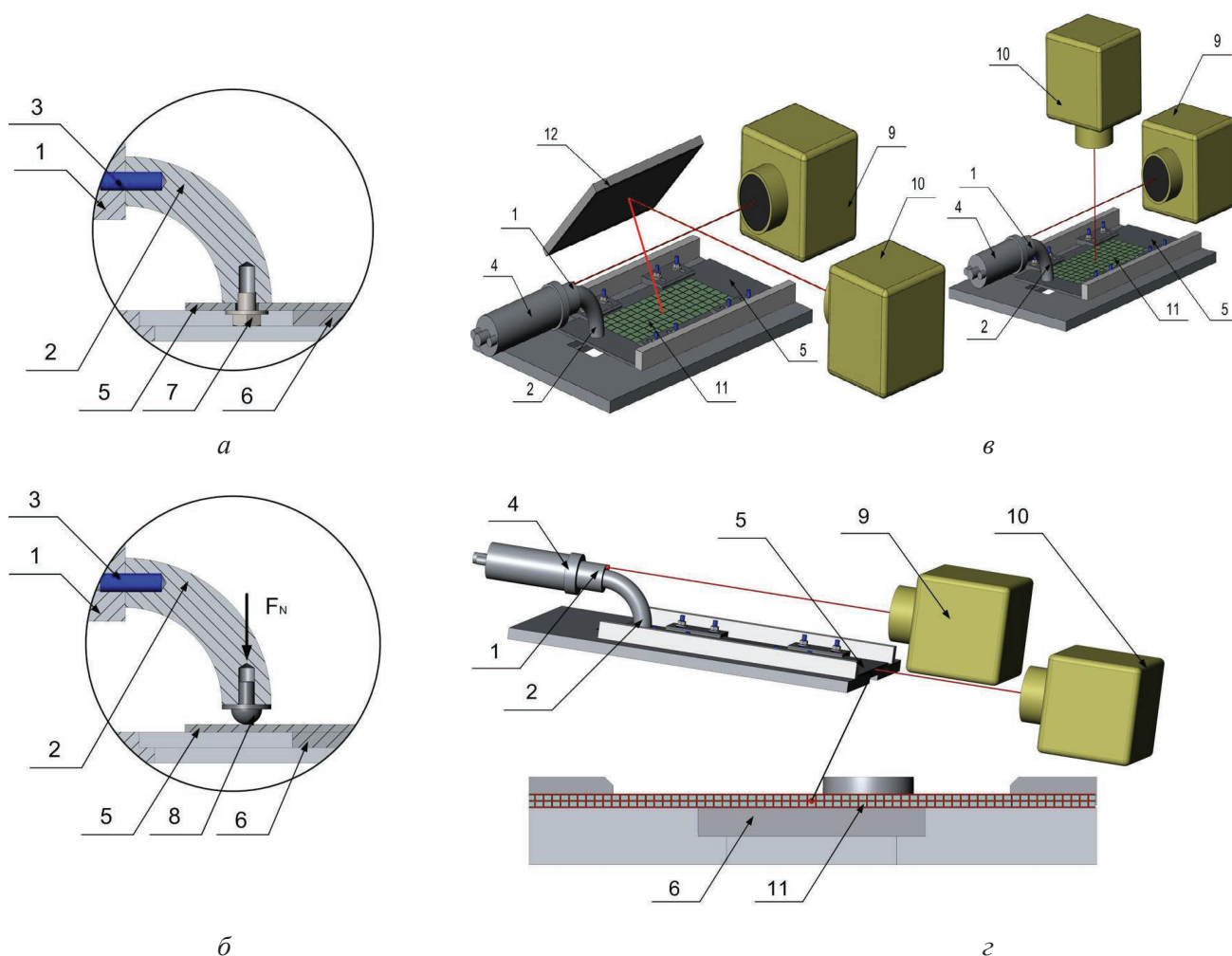


Рис. 2. Способы подвода ультразвукового воздействия с фиксацией сонотрода (а), с контактом и усилием прижима (б) и схемы сканирования лицевой (в) и торцевой (г) поверхности образца:

1 – сонотрод первой ступени; 2 – сонотрод второй ступени; 3 – соединительный винт; 4 – магнитоистриктор; 5 – образец; 6 – подложка; 7 – фиксирующий болт; 8 – твердосплавный сферический наконечник; 9 – 1D голова виброметра; 10 – сканирующая 3D голова виброметра; 11 – зона сканирования; 12 – зеркало

Fig. 2. Ways of ultrasonic assistance with using the sonotrode fixation (а), with using the contact and pressure (б) and scans of the face surface (в) and the front edge (г) of the workpiece:

1 – first-stage sonotrode; 2 – second-stage sonotrode; 3 – joining screw; 4 – magnetostrictor; 5 – workpiece; 6 – backing plate; 7 – fixing bolt; 8 – spherical hard-alloy tip; 9 – 1D vibrometer head; 10 – 3D vibrometer scanning head; 11 – scanned area; 12 – mirror

Процесс сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием выполнялся следующим образом. Заготовки свариваемого материала толщиной h с предварительно обработанными кромками устанавливались на рабочий стол оборудования с подложкой (рис. 3). Фиксация заготовок в направлении оси Z осуществлялась прижимными планками, а в направлении оси Y – фиксаторами, обеспечивающими прижим свариваемых кромок друг к другу. К одной из заготовок через технологическое отверстие крепился сонотрод второй ступени магнитоистриктора согласно схеме (рис. 2, а).

После приложения ультразвуковых колебаний с мощностью P_{US} шпиндель, с установленным в нем инструментом, перемещался по оси Z до касания пина инструмента поверхности заготовок свариваемого материала по линии их стыка. Далее инструменту сообщалось вращение с частотой RR_T и усилие внедрения F_p . Инструмент внедрялся в материал заготовок до касания его заплечиков поверхности заготовок, затем инструменту сообщалось перемещение вдоль оси X со скоростью V_w (скорость сварки). При поступательном перемещении вращающегося инструмента вдоль линии стыка заготовок

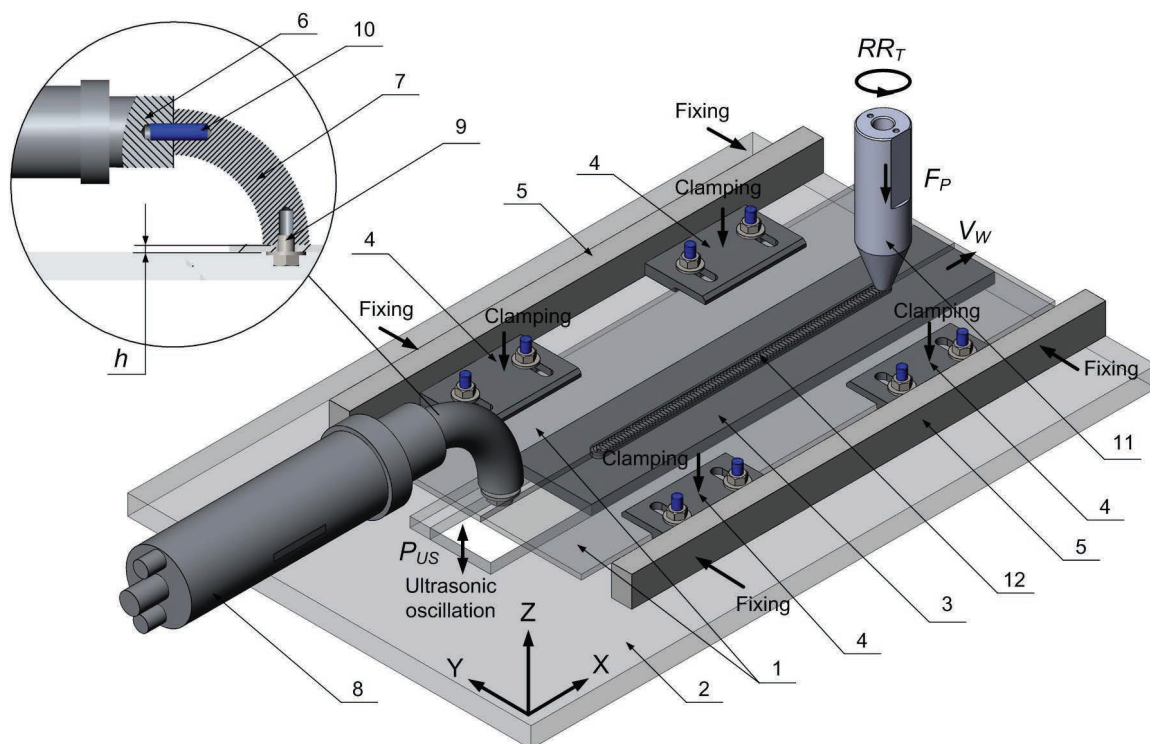


Рис. 3. Схема процесса сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием:
1 – образец; 2 – рабочий стол; 3 – подложка; 4 – прижимные планки; 5 – фиксаторы; 6 – соноотрод первой ступени; 7 – соноотрод второй ступени; 8 – магнитостриктер; 9 – фиксирующий болт; 10 – соединительный винт; 11 – сварочный инструмент; 12 – сварное соединение

Fig. 3. Flowchart of ultrasonic-assisted friction stir welding process:

1 – workpiece; 2 – welding table; 3 – backing plate; 4 – clamping plates; 5 – fixing clamps; 6 – first-stage sonotrode; 7 – second-stage sonotrode; 8 – magnetostrictor; 9 – fixing bolt; 10 – joining screw; 11 – welding tool; 12 – weld seam

на заданную длину формировалось сварное соединение.

Данным способом были получены образцы сварных соединений из алюминиевого сплава Д16Т. Образцы получены при одинаковых параметрах как с приложением, так и без приложения ультразвуковых колебаний. Технологические параметры получения образцов приведены в таблице.

Для оценки влияния ультразвукового воздействия на механические свойства были проведены испытания образцов полученных соединений на одноосное растяжение. Значения предела прочности определены при растяжении со скоростью 15 мм/мин с использованием универсальной испытательной машины УТС 110М-100.

Для оценки интенсивности ультразвукового воздействия в процессе сварки трением с перемешиванием были проведены измерения виброскоростей по схеме, изображенной на рис. 2, в. Вследствие того что измерить поле виброскоростей

непосредственно в процессе сварки технически невозможно, измерения проводились в статических состояниях, когда сварочный инструмент оставался неподвижным, но был прижат к образцу с рабочим усилием сварки. Сканирование осуществлялось по лицевой поверхности образцов из листовых заготовок, закрепленных на сварочном столе станда. Заготовки были выполнены из сплава АМгб толщиной 5 мм с размерами 450 × 60 мм, стык заготовок располагался примерно посередине прямоугольной области сканирования с размерами 270 × 110 мм вдоль ее длинной стороны. При этом были смоделированы две ситуации. Первая соответствовала моменту перед началом сварки, когда образец состоит из двух отдельных заготовок, и инструмент прижат к образцу с рабочим усилием сварки через проставку (рис. 4, а). Вторая ситуация соответствовала моменту времени в процессе сварки, когда сварной шов уже частично сформирован, а инструмент погружен в материал.

Технологические параметры сварки образцов Technological parameters for welding of samples

Номер эксперимента	h , мм h , mm	V_w , мм/мин V_w , mm/min	F_p , кН F_p , kN	RR_T , об/мин RR_T , rpm	P_{US} , Вт P_{US} , W
1.1	2,5	200	200	450	—
1.2	2,5	200	200	450	1,0
2.1	5,0	130	250	450	—
2.2	5,0	130	250	450	1,0
3.1	10,0	90	360	450	—
3.2	10,0	90	360	450	1,0

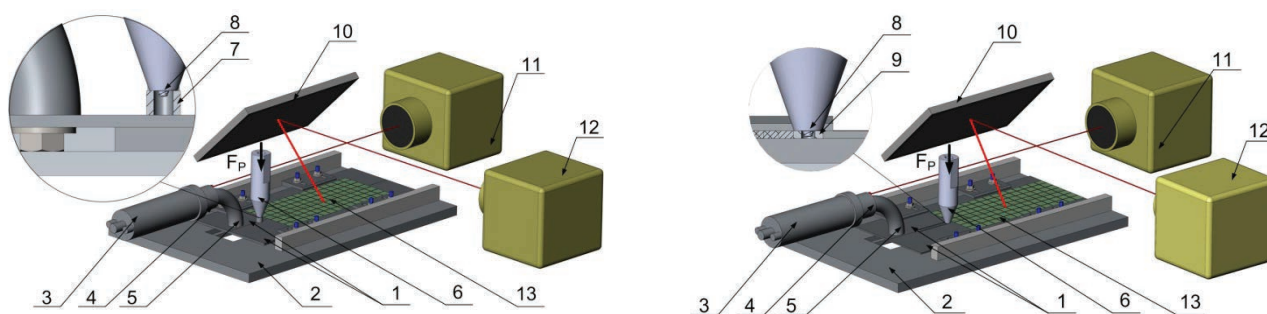


Рис. 4. Схемы сканирования поверхности образца, моделирующие состояния перед началом сварки (а) и в процессе сварки (б):

1 – заготовка; 2 – рабочий стол; 3 – магнитоистриктор; 4 – соноотрод первой ступени; 5 – соноотрод второй ступени; 6 – сварочный инструмент; 7 – проставка; 8 – пин сварочного инструмента; 9 – сварное соединение; 10 – зеркало; 11 – 1D-голова виброметра; 12 – сканирующая 3D-голова виброметра; 13 – зона сканирования

Fig. 4. Scans of the workpiece surface, modeling a state before start welding (a) and a moment during the welding (b):

1 – workpiece; 2 – welding table; 3 – magnetostrictor; 4 – first-stage sonotrode; 5 – second-stage sonotrode; 6 – welding tool; 7 – spacer ring; 8 – welding tool pin; 9 – welded seam; 10 – mirror; 11 – 1D vibrometer head; 12 – 3D vibrometer scanning head; 13 – scanned area

В этом случае проводилось сканирование частично сваренных заготовок, инструмент находился в отверстии выхода сварного шва и был прижат к образцу с рабочим усилием сварки (рис. 4, б). Длина сварного шва составляла 70 мм. Расстояние от места установки соноотрода до начала области сканирования составляло 90 мм – для ситуации перед началом сварки и 160 мм – при моделировании процесса сварки.

Результаты и обсуждение

Измерения полей виброскоростей показали, что при приложении ультразвуковых колебаний на поверхности образцов формируются различные волновые картины, обусловленные интерференцией прямых и многократно переотраженных объемных и поверхностных ультразвуковых

волн. Далее при описании и обсуждении результатов измерений под виброскоростями и виброперемещениями будут пониматься их компоненты, нормальные к сканируемой поверхности.

На рис. 5 представлены карты виброперемещений на поверхности пластины из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 12 мм для двух способов подвода ультразвукового воздействия. При этом, несмотря на то что при контактном способе мощность воздействия была на 36 % больше, максимальная амплитуда виброперемещений на поверхности образца составила не более 0,5 мкм (рис. 5, а), тогда как способ с жесткой фиксацией соноотрода обеспечил в четыре раза большее значение этой величины – 2,4 мкм (рис. 5, б).

Виброперемещения на торцевой стороне образца позволяют судить об интенсивности ультразвукового воздействия в направлении, парал-

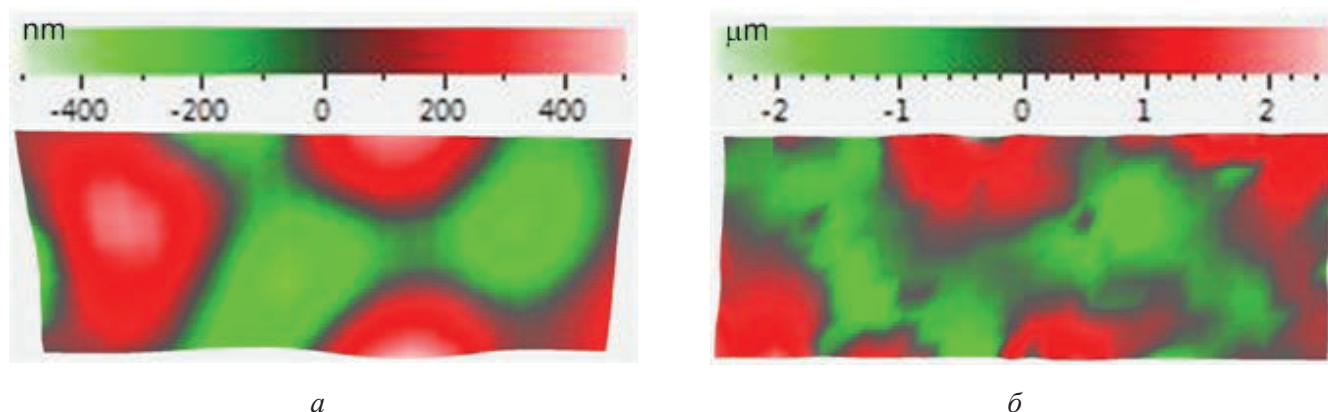


Рис. 5. Карты виброперемещений на лицевой поверхности образца при двух способах ультразвукового воздействия с мощностью:

a – 750 Вт с контактом и усилием прижима; *б* – 550 Вт с жесткой фиксацией сонотрода

Fig. 5. Maps of vibrodisplacement on the face surface of the workpiece for two ways of ultrasonic assistance with power:

a – 750 W with using contact and pressure; *б* – 550 W with using the sonotrode fixation

лельном его лицевой поверхности. Измерения, выполненные на торце пластины, также показали, что при мощности 730 Вт контактный способ обеспечивает максимальную амплитуду виброперемещений 0,4 мкм (рис. 6, *a*), тогда как метод с фиксацией сонотрода при мощности 500 Вт создает максимальную амплитуду виброперемещений до 1 мкм (рис. 6, *б*).

Таким образом, контактный способ подвода ультразвуковых колебаний при большей мощности воздействия демонстрирует меньшие значения виброперемещений, что свидетельствует о его меньшей эффективности по сравнению со способом с жесткой фиксацией сонотрода.

На рис. 7 показаны результаты измерений виброперемещений на образце из сплава АМг5 толщиной 5 мм в условиях, моделирующих мо-

менты перед началом сварки (см. рис. 4, *a*) и в процессе сварки (см. рис. 4, *б*), для двух фаз колебательного процесса со сдвигом на четверть периода.

Хорошо видно, что ультразвуковые колебания формируют на всей поверхности образца из несваренных заготовок квазипериодическую волновую картину с явно выраженными минимумами и максимумами. Для частично сваренного образца волновая картина отличается от квазипериодической, что связано с изменением геометрии образца из-за частичного соединения заготовок сварным швом.

Анализ изменения виброперемещений показал, что для несваренного образца максимальные значения их амплитуды составляют $\approx 1,2$ мкм, имеют пространственный период

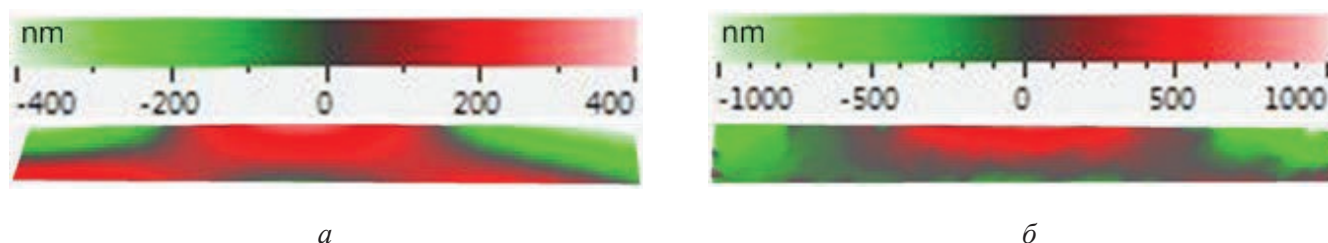


Рис. 6. Карты виброперемещений на торцевой стороне образца при двух способах ультразвукового воздействия с мощностью:

a – 730 Вт с контактом и усилием прижима; *б* – 500 Вт с жесткой фиксацией сонотрода

Fig. 6. Maps of vibrodisplacement on the front edge of the workpiece for two ways of ultrasonic assistance with power:

a – 730 W with using contact and pressure; *б* – 500 W with using the sonotrode fixation

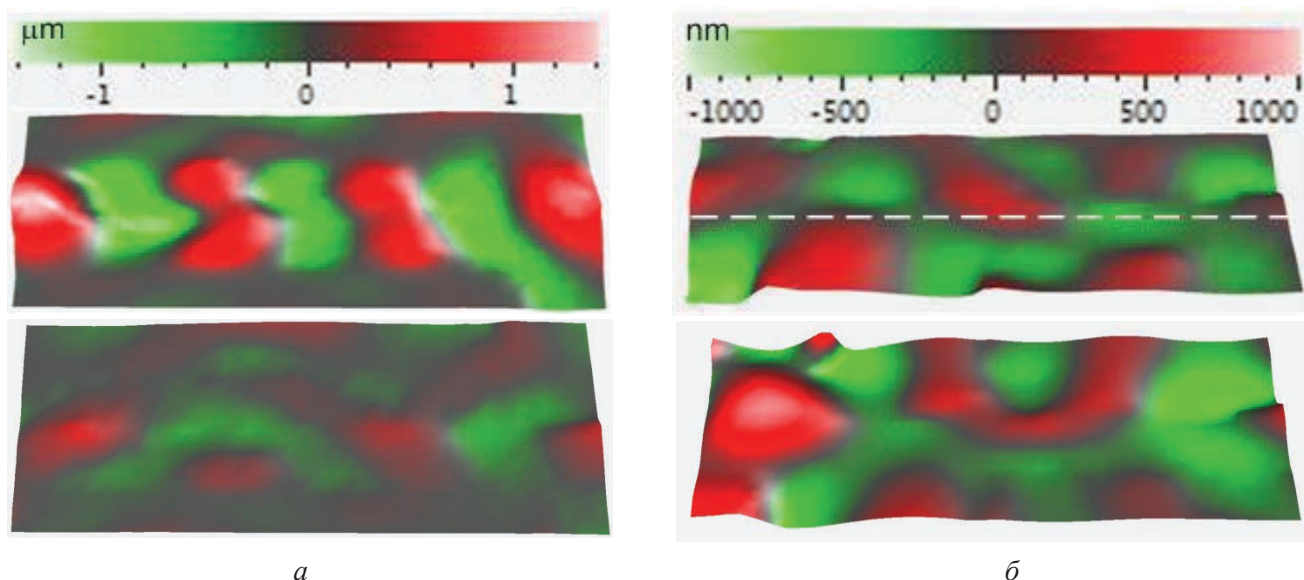


Рис. 7. Карты виброперемещений на поверхности образца из двух несваренных заготовок (а) и частично сваренного образца (б) для двух моментов времени с разницей фаз 90° (сплав АМг5, толщина 5 мм, мощность ультразвукового воздействия 750 Вт); белой пунктирной линией показан стык заготовок (б)

Fig. 7. Maps of vibrodisplacements on the surface of the workpiece consisted of two unwelded parts (a) and the workpiece welded in part (b) for two moments with difference of phases 90° (5182 alloy, 5 mm thickness, ultrasonic power 750 W); the butt joint position demonstrated with the white dashed line (b)

следования максимумов ≈ 86 мм и достигаются в фазе 20° вблизи сварочного инструмента. При этом в фазе со сдвигом 90° максимальные значения амплитуды виброперемещений составляют до 0,2 мкм при пространственном периоде следования максимумов ≈ 120 мм (рис. 8, а). Это позволяет сделать выводы о том, что в образце не формируется стоячая волна, а также, что постепенного затухания подводимых колебаний при удалении от точки их ввода в образец не наблюдается.

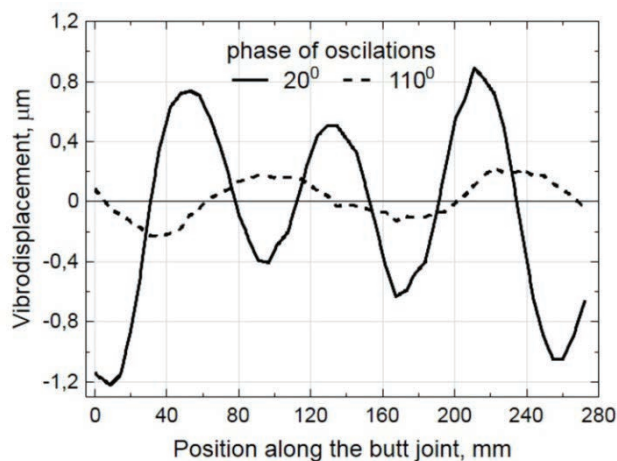
В случае частично сваренного образца максимальная амплитуда виброперемещений на линии стыка наблюдается в начале области измерений. Далее на участке от 60 мм до конца зоны сканирования амплитуды виброперемещений для обеих фаз колебаний составляют 0,2...0,3 мкм (рис. 8, б).

Рассматриваемая карта виброперемещений получена при неподвижном сварочном инструменте. В процессе сварки инструмент постепенно перемещается вдоль линии стыка, увеличивается длина сварного шва, что приводит к непрерывному изменению геометрии колебательной системы. Вследствие этого в процессе сварки будет происходить непрерывное изменение вибрационной картины, максимумы и мини-

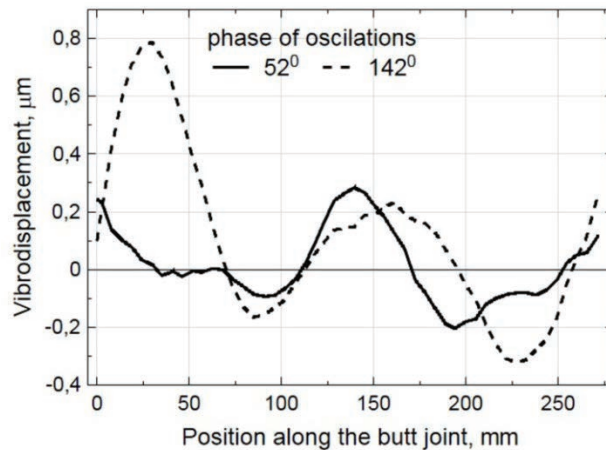
мумы виброперемещений будут перемещаться и обеспечивать интенсивное ультразвуковое воздействие на зону сварки.

Все представленные выше измерения были проведены на поверхности образцов. Однако, как показали результаты моделирования процесса контактного ультразвукового воздействия, по крайней мере, для небольших толщин образцов, вибрационная картина в объеме совпадает с наблюдаемой на поверхности и отличается только несколько меньшей амплитудой [20]. Таким образом, более эффективный способ подвода с жесткой фиксацией соноэлектрода обеспечивает интенсивное воздействие ультразвуковых колебаний на весь объем материала независимо от расстояния до места их приложения.

Испытания на одноосное растяжение образцов сварных соединений из сплава Д16Т показали, что приложение ультразвуковых колебаний в процессе их получения приводит к существенному повышению прочностных характеристик. Прочность соединений толщиной 5,0 и 10,0 мм, полученных сваркой с ультразвуковым воздействием, составила 88 % от прочности основного металла, что на 10 % больше, чем у сварных соединений (рис. 9, а). При сварке соединений толщиной 2,5 мм приложение ультразвуковых



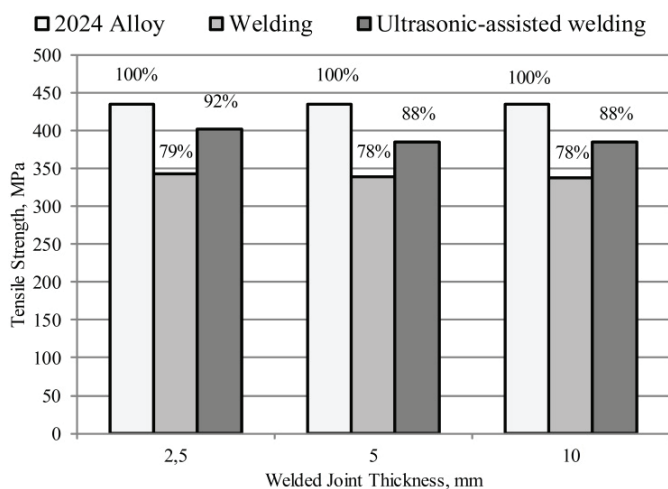
а



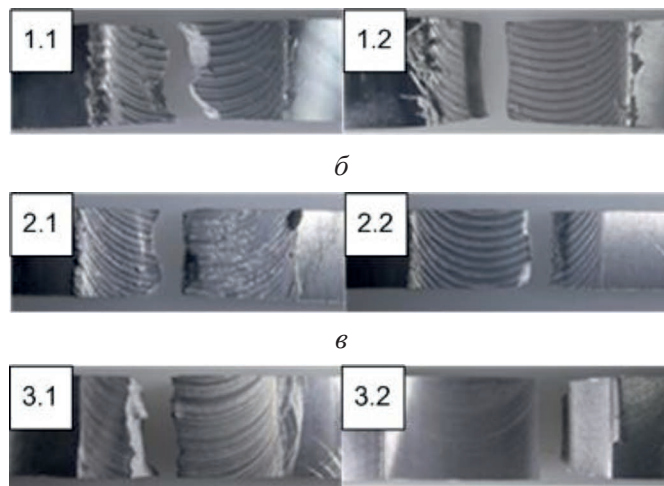
б

Рис. 8. Изменение виброперемещения на поверхности образца из двух несваренных заготовок (а) и частично сваренного образца (б) для двух фаз колебательного процесса (сплав АМг5, толщина 5,0 мм, мощность ультразвукового воздействия 750 Вт)

Fig. 8. Variation of vibrodisplacement on the surface on the surface of the workpiece consisted of two unwelded parts (a) and the workpiece welded in part (b) for various phases of oscillations (5182 alloy, 5,0 mm thickness, ultrasonic power 750 W)



а



г

Рис. 9. Результаты испытаний сварных соединений на одноосное растяжение: прочностные характеристики в сравнении с основным металлом (а) и изображения разрушенных образцов толщиной 2,5 (б), 5,0 (в) и 10,0 мм (г)

Fig. 9. Results of uniaxial tensile tests of welded joints: tensile strength in compared with one of the bulk metal (a) and images of fractured samples with 2,5 (b), 5,0 (v) and 10,0 mm (z) thickness

колебаний привело к еще большему эффекту, в результате прочность увеличилась на 13 % по сравнению со сварными соединениями и достигла 92 % от прочности основного металла.

Характерной особенностью полученных сварных соединений является изменение места

их разрушения при растяжении. Разрушение образцов толщиной 2,5 и 5,0 мм, полученных сваркой, во всех случаях происходило в середине сварного соединения, что соответствует зоне перемешивания (ЗП). Разрушение аналогичных образцов, полученных сваркой с ультразвуковым

воздействием, происходило со смещением, с локализацией по границе зоны перемешивания с зоной термомеханического воздействия (ЗТМВ) (рис. 9, б, в).

При испытаниях образцов сварных соединений толщиной 10,0 мм разрушение происходило по границе зоны перемешивания с зоной термомеханического воздействия. Разрушение образцов, полученных сваркой с ультразвуковым воздействием, происходило по границе между зонами термомеханического воздействия и термического влияния (рис. 9, г).

Проведенный анализ характера разрушения сварных соединений показал, что приложение ультразвуковых колебаний в процессе их получения привело к увеличению прочности материала в зоне перемешивания (ЗП) для соединений толщиной 2,5 и 5,0 мм и в зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ) для соединений толщиной 10,0 мм.

Заключение

С помощью лазерной доплеровской виброметрии отмечено, что приложение ультразвуковых колебаний к поверхности материала приводит к формированию на ней устойчивой вибрационной картины, обусловленной интерференцией переотраженных объемных и поверхностных волн. Сравнение величин виброперемещений для двух способов подвода ультразвукового воздействия показало, что способ с жесткой фиксацией сонотрода является более эффективным по сравнению с контактным способом, поскольку при значительно меньшей подводимой мощности обеспечивает интенсивность воздействия в 2,5...4 раза выше. Кроме того, показано, что способ подвода с жесткой фиксацией сонотрода обеспечивает интенсивное воздействие ультразвуковых колебаний на весь объем материала независимо от расстояния до места их приложения.

Механические испытания образцов сварных соединений из сплава Д16Т, полученных сваркой трением с перемешиванием, продемонстрировали, что приложение ультразвуковых колебаний в процессе сварки приводит в соединениях к повышению прочности на разрыв на 10...13 %. При этом максимальная прочность 92 % от прочности основного металла достигнута для тол-

щины 2,5 мм. Вместе с тем отмечено, что приложение ультразвуковых колебаний в процессе сварки соединений толщиной 2,5 и 5,0 мм привело к повышению прочности материала зоны перемешивания, а для соединений толщиной 10,0 мм – к упрочнению зоны термомеханического воздействия.

Список литературы

1. Nandan R., Debroy T., Bhadeshia H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding – process, welding structure and properties // *Progress in Materials Science*. – 2008. – Vol. 53 (6). – P. 980–1023.
2. Stephen Leon J.L., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding // *American Journal of Mechanical Engineering and Automation*. – 2014. – Vol. 1, N 1. – P. 6–9.
3. Suman P., Srinivasa Rao P., Sreeramulu D. A survey on friction stir welding of dissimilar magnesium alloys // *International Journal of Scientific Research and Review*. – 2019. – Vol. 8, iss. 1. – P. 26–38. – DOI: 10.13140/RG.2.2.11026.91844.
4. Podržaj P., Jerman B., Klobčar D. Welding defects at friction stir welding // *Metalurgija*. – 2015. – Vol. 54 (2). – P. 387–389.
5. Microstructure and properties of friction stir welded aluminium alloys / J. Karlsson, B. Karlsson, H. Larsson, L. Karlsson, L.E. Svensson // *Proceedings of 7th International Conference on Joints in Aluminium – IN-ALCO 98*. – Cambridge: Woodhead Publishing, 1998. – P. 231.
6. Cerri E., Leo P. Influence of high temperature thermal treatment on grain stability and mechanical properties of medium strength aluminium alloy friction stir welds // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213. – P. 75–83.
7. Review on friction stir welding process / R.V. Arunprasad, G. Surendhiran, M. Ragul, T. Soundarajan, S. Moutheepan, S. Boopathi // *International Journal of Applied Engineering*. – 2018. – Vol. 13, N 8. – P. 5750–5758.
8. Nirgude S.K., Choudhari C.M., Kalpande S.D. A review on pre/post treatments used in friction stir welding // *International Conference on Advances in Thermal Systems, Materials and Design Engineering (ATSMDE-2017)*, 21–22 December 2017. – Mumbai, India, 2017. – P. 503–509. – DOI: 10.2139/ssrn.3101621.
9. Effect of heat treatment T6 on the friction stir welded SSM 6061 aluminum alloys / W. Boonchouytan, J. Chatthong, S. Rawangwong, R. Burapa // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol. 56. – P. 172–180. – DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.146.

10. *Park K.* Development and analysis of ultrasonic assisted friction stir welding process: PhD dissertation / University of Michigan. – Ann Arbor, MI, 2009. – 125 p.
11. *Amini S., Amiri M.R.* Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2014. – Vol. 73. – P. 127–135. – DOI: 10.1007/s00170-014-5806-7.
12. *Padhy G.K., Wu C.S., Gao S.* Auxiliary energy assisted friction stir welding – status review // *Science and Technology of Welding and Joining.* – 2015. – Vol. 20 (8). – P. 631–649. – DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000048.
13. Effect of ultrasonic vibration on welding load, macrostructure, and mechanical properties of Al/Mg alloy joints fabricated by friction stir lap welding / *S. Kumar, C.S. Wu, S. Zhen, W. Ding* // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. – Vol. 100, iss. 5–8. – P. 1787–1799. – DOI: 10.1007/s00170-018-2717-z.
14. A study of the temperature field during ultrasonic-assisted friction-stir welding / *L. Ruilin, H. Diqu, L. Luocheng, Y. Shaoyong, Y. Kunyu* // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2014. – Vol. 73 (1–4). – P. 321–327. – DOI: 10.1007/s00170-014-5813-8.
15. *Muhammad N.A., Wu C.S., Padhy G.K.* Review: Progress and trends in ultrasonic vibration assisted friction stir welding // *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series).* – 2018. – Vol. 25 (3). – P. 16–42. – DOI: 10.11916/j.issn.1005-9113.17105.
16. *Liu X.C., Wu C.S.* Experimental study on ultrasonic vibration enhanced friction stir welding // *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding.* – Osaka, Japan, 2013. – P. 151–154. – DOI: 10.1533/978-1-78242-164-1.151.
17. Realization of Al/Mg-Hybrid-Joints by ultrasound supported friction stir welding – mechanical properties, microstructure and corrosion behavior / *B. Strass, G. Wagner, C. Conrad, B. Wolter, S. Benfer, W. Fürbeth* // *Advanced Materials Research.* – 2014. – Vol. 966–967. – P. 521–535. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.521.
18. Effect of ultrasonic vibration on the friction stir weld quality of aluminium alloy / *X.C. Liu, C.S. Wu, H. Zhang, M. Chen* // *China Welding (English Edition).* – 2013. – Vol. 22 (3). – P. 12–17.
19. Патент 2616313 Российская Федерация. Способ сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием / *Е.А. Колубаев, В.Е. Рубцов, А.Н. Иванов, С.Г. Псахье, С.В. Фортуна, В.А. Бакшаев, П.А. Васильев.* – № 2015153096; заявл. 10.12.15; опубл. 14.04.17, Бюл. № 11.
20. Ultrasonic-assisted laser welding on AISI 321 stainless steel / *S.Y. Tarasov, A.V. Vorontsov, S.V. Fortuna, V. E. Rubtsov, V. A. Krasnoveikin, E. A. Kolubaev* // *Welding in the World.* – 2019. – Vol. 63, iss. 3. – P. 875–886. – DOI: 10.1007/s40194-019-00716-1.

Конфликт интересов

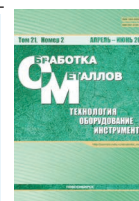
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 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



Application for the Way of Ultrasonic Assistance Input and Estimation of its Efficiency for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys

Alexey Ivanov^{a,*}, Vladimir Beloborodov^b, Vladimir Krasnoveikin^c, Valery Rubtsov^d, Evgeny Kolubaev^e

Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0001-8959-8499>,  ivan@ispms.tsc.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0003-4609-1617>,  vabel@ispms.tsc.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0003-1405-0597>,  volodia74ms@yandex.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>,  rvy@ispms.ru

^e  <http://orcid.org/0000-0001-7288-3656>,  eak@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 March 2019

Revised: 17 April 2019

Accepted: 04 May 2019

Available online: 15 June 2019

Keywords:

Friction stir welding

Ultrasonic assistance

Laser Doppler vibrometry

Aluminum alloy

Funding

This work is performed within the frame of the Fundamental Research Program of the State Academies of Sciences for 2013-2020, line of research III.23.

ABSTRACT

Introduction. Manufacturing capabilities of friction stir welding has some restrictions caused by the formation of welding defects, the alteration in material structure and the appearance of residual stresses that results in worsening of utilization properties of welded joints. A well-known method for improvement of welded joint properties is an input of ultrasonic assistance by different ways during the welding process. However, the application of known ways of the input either requires a complex technique or accompanied by a significant power loss and an attenuation of ultrasonic oscillation. The way for the input of the ultrasonic assistance using a sonotrode fixation on a weld material is seemed to be promising since it has no requirements for a complex technique and provides an effective transmission of the oscillation into the joint formation zone. **Goal of this research** is the estimation of efficiency of the ultrasonic assistance way, in which the sonotrode fixation is used, by a measuring of the intensity of resulting oscillations and an estimation of its effect on a tensile strength of welded joints obtained by the friction stir welding. **Results and discussion.** The comparison of two ways of ultrasonic oscillation input is carried out by the means of laser Doppler vibrometry. It's shown that the way of input using the sonotrode fixation is more effective than the contact one. The way proposed with much less power input provides 2.5-4.0 times higher intensity of oscillation all over the volume of material not depending of a distance to the point of the oscillation input. Tensile tests of the 2024 alloy samples of joints obtained by friction stir welding demonstrated that the input of ultrasonic oscillation during the welding process results in 10-13% increase of tensile strength. Herewith, the maximum tensile strength achieved 92% of bulk metal. Also it's shown that the input of ultrasonic oscillation during the welding process results in strength increasing of material in a stir zone for joints with 2.5 and 5.0 mm thickness and results in reinforcement of a thermomechanically affected zone for joints with 10.0 mm thickness.

For citation: Ivanov A.N., Beloborodov V.A., Krasnoveikin V.A., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Application for the way of ultrasonic assistance input and estimation of its efficiency for friction stir welding of aluminum alloys. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 40–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-40-52. (In Russian).

References

1. Nandan R., Debroy T., Bhadeshia H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding – process, welding structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2008, vol. 53 (6), pp. 980–1023.
2. Stephen Leon J.L., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding. *American Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 6–9.
3. Suman P., Srinivasa Rao P., Sreeramulu D. A survey on friction stir welding of dissimilar magnesium alloys. *International Journal of Scientific Research and Review*, 2019, vol. 8, iss. 1, pp. 26–38. DOI: 10.13140/ RG.2.2.11026.91844.

* Corresponding author

Ivanov Alexey N., Junior researcher

Institute of Strength Physics and Materials Science

Siberian Branch of Russian Academy of Science,

2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

Tel.: 8 (382) 228–68–63, e-mail: ivan@ispms.tsc.ru

4. Podržaj P., Jerman B., Klobčar D. Welding defects at friction stir welding. *Metalurgija*, 2015, vol. 54 (2), pp. 387–389.
5. Karlsson J., Karlsson B., Larsson H., Karlsson L., Svensson L.E. Microstructure and properties of friction stir welded aluminium alloys. *Proceedings of 7th International Conference on Joints in Aluminium – INALCO 98*. Cambridge, Woodhead Publishing, 1998, pp. 221–230.
6. Cerri E., Leo P. Influence of high temperature thermal treatment on grain stability and mechanical properties of medium strength aluminium alloy friction stir welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, pp. 75–83.
7. Arunprasad R.V., Surendhiran G., Ragul M., Soundarrajan T., Moutheepan S., Boopathi S. Review on friction stir welding process. *International Journal of Applied Engineering*, 2018, vol. 13, no. 8, pp. 5750–5758.
8. Nirgude S.K., Choudhari C.M., Kalpande S.D. A review on pre/post treatments used in friction stir welding. *International Conference on Advances in Thermal Systems, Materials and Design Engineering (ATSMDE-2017)*, 21–22 December 2017, Mumbai, India, pp. 503–509. DOI: 10.2139/ssrn.3101621.
9. Boonchouytan W., Chatthong J., Rawangwong S., Burapa R. Effect of heat treatment T6 on the friction stir welded SSM 6061 aluminum alloys. *Energy Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 172–180. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.146.
10. Park K. *Development and analysis of ultrasonic assisted friction stir welding process*: PhD dissertation. University of Michigan, 2009. 125 p.
11. Amini S., Amiri M.R. Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 73, pp. 127–135. DOI: 10.1007/s00170-014-5806-7.
12. Padhy G.K., Wu C.S., Gao S. Auxiliary energy assisted friction stir welding – status review. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, vol. 20 (8), pp. 631–649. DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000048.
13. Kumar S., Wu C.S., Zhen S., Ding W. Effect of ultrasonic vibration on welding load, macrostructure, and mechanical properties of Al/Mg alloy joints fabricated by friction stir lap welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 100, iss. 5–8, pp. 1787–1799. DOI: 10.1007/s00170-018-2717-z.
14. Ruilin L., Diqiu H., Luo Cheng L., Shaoyong Y., Kunyu Y. A study of the temperature field during ultrasonic-assisted friction-stir welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 73 (1–4), pp. 321–327. DOI: 10.1007/s00170-014-5813-8.
15. Muhammad N.A., Wu C.S., Padhy G.K. Review: Progress and trends in ultrasonic vibration assisted friction stir welding. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 2018, vol. 25 (3), pp. 16–42. DOI: 10.11916/j.issn.1005-9113.17105.
16. Liu X.C., Wu C.S. Experimental study on ultrasonic vibration enhanced friction stir welding. *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*, Osaka, Japan, 2013, pp. 151–154. DOI: 10.1533/978-1-78242-164-1.151.
17. Strass B., Wagner G., Conrad C., Wolter B., Benfer S., Fürbeth W. Realization of Al/Mg-Hybrid-Joints by ultrasound supported friction stir welding – mechanical properties, microstructure and corrosion behavior. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 966–967, pp. 521–535. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.521.
18. Liu X.C., Wu C.S., Zhang H., Chen M. Effect of ultrasonic vibration on the friction stir weld quality of aluminium alloy. *China Welding (English Edition)*, 2013, vol. 22 (3), pp. 12–17.
19. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Ivanov A.N., Psakh'e S.G., Fortuna S.V., Bakshaev V.A., Vasil'ev P.A. *Sposob svarki treniem s peremeshivaniem s ul'trazvukovym vozdeistviem* [Method of friction welding with mixing with ultrasonic treatment]. Patent RF, no. 2616313, 2017.
20. Tarasov S.Y., Vorontsov A.V., Fortuna S.V., Rubtsov V.E., Krasnoveikin V.A., Kolubaev E.A. Ultrasonic-assisted laser welding on AISI 321 stainless steel. *Welding in the World*, 2019, vol. 63, iss. 3, pp. 875–886. DOI: 10.1007/s40194-019-00716-1.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 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/>).