

НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





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



Исследования соединений AA7075, сваренных трением с перемешиванием и ультразвуковым воздействием: механические свойства и анализ разрушения

Вайбхав Гайквад^{a, *}, Сатииш Чинчаникар^b

Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуне – 411048, Махараштра, Индия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-3818-1893>,  vaibhav.219p0007@viit.ac.in; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchaniкар@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14

История статьи:

Поступила: 06 января 2024

Рецензирование: 09 февраля 2024

Принята к печати: 20 марта 2024

Доступно онлайн: 15 июня 2024

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием

Дробеструйная обработка

Анализ разрушения

Ультразвуковые колебания

AA7075

АННОТАЦИЯ

Введение. Прочность сварного соединения и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла, особенно в алюминиевых сплавах, имеют решающее значение для аэрокосмической, оборонной и промышленной сфер. Обработка сварных соединений, например дробеструйная и лазерная нагартровка, значительно повышает эффективность и прочность соединения, увеличивая усталостную долговечность, зернистую структуру и прочность на растяжение. **Цель работы.** Обзор литературы показывает, что сварка трением с перемешиванием и ультразвуковым воздействием (UVaFSW) и послесварочная обработка улучшают механические свойства и текучесть материала. Однако исследований, посвященных изучению влияния скорости сварки, скорости вращения инструмента и дробеструйной обработки после сварки UVaFSW-соединений AA7075-T651, проведено ограниченное количество. **Методы исследования.** Изучались прочность на растяжение, микротвердость, микроструктура и поведение при разрушении AA7075-T651-соединения, сваренного трением с перемешиванием (UVaFSW), с учетом влияния вращения инструмента, скорости сварки и дробеструйной обработки после сварки. **Результаты и обсуждение.** UVaFSW-соединения, подвергнутые дробеструйной обработке после сварки, продемонстрировали максимальную прочность на разрыв 373,43 МПа, микротвердость 161 HV и наименьшую шероховатость поверхности 15,16 мкм при скорости сварки 40 мм/мин по сравнению с соединениями, полученными сваркой трением с перемешиванием (FSW). Эти результаты показывают, что дробеструйная обработка улучшила механические свойства и качество поверхности UVaFSW-соединений. Высокая прочность на разрыв и низкая шероховатость поверхности делают эти соединения пригодными для применений, требующих прочности и эстетики. Разрушение UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки в основном происходило в зоне термического влияния (ЗТВ) во время испытания на растяжение. Это можно объяснить более высокой температурой во время сварки, которая привела к росту зерен и снижению прочности материала в ЗТВ. UVaFSW-соединение, подвергнутое дробеструйной обработке, имеет более равномерное распределение зерен, чем FSW-соединение, что способствует более высокому временному сопротивлению разрушению. На поверхности излома UVaFSW-соединений, подвергнутых дробеструйной обработке, наблюдались более крупные, равноосные и неглубокие ямки, что привело к более высокому временному сопротивлению разрушению (σ_b) и микротвердости по сравнению с обычными FSW-соединениями. Механические свойства и микроструктура, наблюдаемые в зонах сварки UVaFSW-соединений, подвергнутых дробеструйной обработке, превосходят свойства обычных FSW-соединений. Однако необходимы дальнейшие исследования для определения конкретных факторов, способствующих этому локализованному разрушению в ЗТВ, учитывая влияние параметров дробеструйной обработки. Это исследование также предполагает возможность оптимизации UVaFSW-соединений из AA7075-T651, подвергнутых дробеструйной обработке.

Для цитирования: Гайквад В., Чинчаникар С. Исследования соединений AA7075, сваренных трением с перемешиванием и ультразвуковым воздействием: механические свойства и анализ разрушения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 6–22. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-6-22.

Введение

В последнее время в различных отраслях промышленности наметилась тенденция к поиску инновационных и экономически эффек-

тивных способов снижения веса собственной продукции, увеличения скорости собственных транспортных средств, самолетов и ракет, а также сокращения выбросов парниковых газов, образующихся в процессе производства. Поэтому продолжают исследования инновационных методов соединения материалов, позволяющих приблизиться к обозначенным выше целям. Алюминиевый сплав AA7075 находит широ-

*Адрес для переписки

Гайквад Вайбхав, к.т.н., старший инженер по обеспечению качества
Институт информационных технологий Вишвакармы,
Кондва (Бадрек), Пуне – 411048, Махараштра, Индия
Тел.: 91-20269502401, e-mail: vaibhav.219p0007@viit.ac.in

кое применение в аэрокосмической, оборонной, военной и автомобильной отраслях благодаря своей низкой плотности и высоким механическим свойствам. Это дисперсионно-твердеющий сплав с магнием, цинком и медью в качестве основных легирующих элементов. Из-за того, что при сварке плавлением при затвердевании образуются горячие трещины, для соединения алюминиевых сплавов предпочтительна сварка трением с перемешиванием (FSW) [1].

FSW-процесс предпочтителен для соединения трудносвариваемых однотипных и разнородных алюминиевых сплавов. Сварка трением с перемешиванием – это процесс соединения деталей в твердом состоянии, благодаря чему в сварном соединении снижаются искажения и остаточные напряжения. По сравнению с методами сварки плавлением FSW обеспечивает более качественные соединения. При реализации процесса сварки трением с перемешиванием специально разработанный вращающийся инструмент погружают в стык соединяемых деталей и перемещают вдоль их границы. Следовательно, разупрочненный материал вблизи инструмента переносится со стороны набега на сторону отхода, образуя шов [2]. Для того чтобы при сварке трением выделялось большое количество тепла, требуются высокая направленная вниз сила и крутящий момент шпинделя. Выделяемое тепло разупрочняет материал, обеспечивая необходимое пластическое течение рядом с инструментом. Это приводит к увеличению объема сварочного оборудования и к большей нагрузке сваривания [3].

Профиль рабочего стержня при FSW подвергается более высоким нагрузкам во время сварки, что приводит к быстрой деградации инструмента и преждевременному выходу его из строя. Износ инструмента приводит также к ухудшению качества сварки, что, в свою очередь, влечет за собой увеличение производственных затрат. Кроме того, более высокая нагрузка сваривания при FSW ограничивает скорость сварки. Эти трудности можно решить, используя различные вторичные источники энергии во время FSW. Группа исследователей применила ультразвуковые колебания во время FSW. Сварка трением с перемешиванием при ультразвуковом воздействии (UVaFSW) способствует разупрочнению материала без существенного нагрева [4–6].

Лю и др. (Liu et al.) [7] обнаружили, что сварка трением с перемешиванием при ультразвуковом воздействии улучшает механические свойства соединения, качество сварного шва и тепловложение в локализованном участке. По данным Сюй и др. (Xu et al.) [8] пайка с применением ультразвуковых колебаний позволила получить соединение с меньшим размером зерна, что улучшило коррозионную стойкость и временное сопротивление разрушению (UTS). Лю и др. (Liu et al.) [9], исследуя UVaFSW алюминиевого сплава AA1060, обнаружили, что ультразвуковая энергия увеличивает скорость течения материала, объем деформируемого материала и скорость деформации.

При аэрокосмическом, оборонно-промышленном и промышленном использовании ключевую роль играют прочность сварного соединения и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла, особенно это касается соединений из одинаковых и разнородных алюминиевых сплавов. Широко освещалось, что прочность сварного соединения и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла существенно улучшаются при использовании послесварочной обработки. В последние несколько лет исследователи сосредоточились на послесварочной обработке алюминиевых соединений. В литературе зачастую упоминаются дробеструйная и лазерная нагартовка в качестве послесварочной обработки, поскольку оба процесса вызывают остаточные сжимающие напряжения в сварном образце и улучшают усталостную долговечность, зернистую структуру и прочность на растяжение. На рис. 1, а, б показаны принципиальные схемы лазерной и дробеструйной обработки соответственно.

Амуда и др. (Amuda et al.) [10] исследовали влияние криогенного охлаждения и добавления металлического порошка во время дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе пластины из стали AISI 430. Их исследование показало, что обе стратегии улучшают зернистую структуру. Однако при накоплении металлического порошка обнаружено значительное уменьшение зоны термического влияния (ЗТВ) – до 50 %, а криогенное охлаждение снижает ЗТВ до 36 %. С другой стороны, криогенное охлаждение привело к повышению

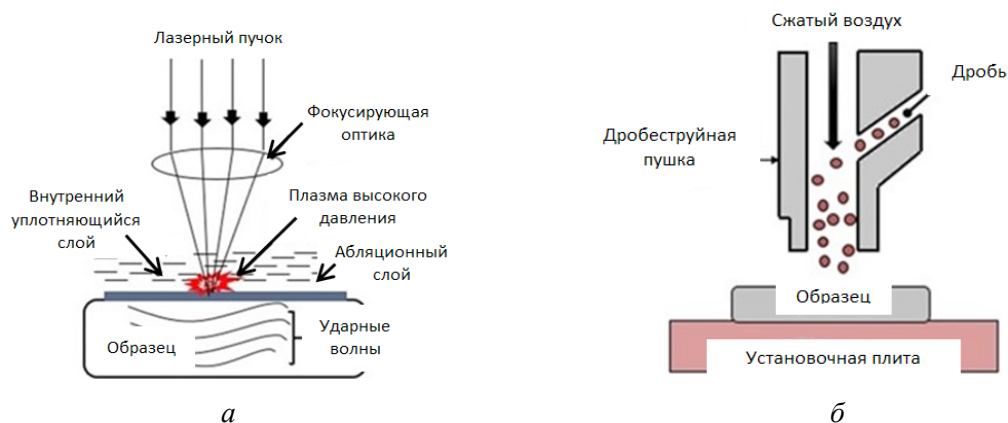


Рис. 1. Схематическое изображение процесса лазерной нагартовки (а), дробеструйной обработки (б)

Fig. 1. Schematics of Laser shock peening process (а), Shot peening process (б)

пластичности соединения на 80 % по сравнению с основным металлом (ОМ), тогда как добавление порошка элементарного металла привело к повышению пластичности соединения до 60 %. Хатамле и др. (Hatamleh et al.) [11] исследовали влияние лазерной и дробеструйной обработки, а также криогенного охлаждения на развитие усталостных трещин и остаточные напряжения в соединениях из алюминиевого сплава AA2195, полученных сваркой трением с перемешиванием (FSW). Их исследование показало, что развитие усталостных трещин для образца, подвергнутого лазерной нагартовке, было таким же, как и для образца, подвергнутого дробеструйной обработке и сварке при температуре окружающей среды. Кроме того, при криогенной обработке было трудно отличить рост трещин от остаточных напряжений.

Хатамле и др. (Hatamleh et al.) в работе [12] исследовали влияние лазерной нагартовки и дробеструйной обработки на соединение FSW из алюминиевого сплава AA2195. Их исследование показало улучшение механических свойств при лазерной нагартовке по сравнению с дробеструйным упрочнением. Повышение предела текучести в ядре сварной точки наблюдалось ими примерно на 38 %, когда в качестве послесварочной обработки использовалась лазерная нагартовка, по сравнению с повышением предела текучести в ядре сварной точки на 8 %, наблюдаемым при дробеструйной обработке. Хоррами и др. (Khorrami et al.) в работе [13] исследовали влияние криогенной температуры и температуры окружающей среды на FSW сильноде-

формированного алюминиевого сплава AA1050 с наночастицами SiC. В их работе наблюдались бимодальные и более мелкие размеры зерен при использовании соединений FSW с криогенной охлаждающей обработкой в качестве меры против аномального роста зерен во время FSW.

Сингх и др. (Singh et al.) в работе [14] провели криогенную обработку после FSW-соединения из алюминиевого сплава AA7075. Их экспериментальное исследование показало, что криогенная обработка после сварки привела к незначительному повышению твердости соединения и временного сопротивления разрушению. Ван и др. (Wang et al.) [15] исследовали влияние низкотемпературного старения и криогенной обработки на механические свойства FSW алюминиевого сплава AA2024-T351. Отмечено устранение разупрочненных зон вблизи ЗТВ за счет однократного низкотемпературного старения. Однако за счет однократного низкотемпературного старения отмечено снижение прочности соединения.

Ван и др. (Wang et al.) [16] проводили криогенную обработку FSW медного соединения. Их экспериментальная работа показала, что измельчение зерна в ядре сварной точки изначально увеличивается с повышением скорости вращения. Однако при дальнейшем увеличении скорости вращения рабочего стержня измельчение зерна замедляется. Жемчужникова и др. (Zhemchuzhnikova et al.) [17] наблюдали значительное измельчение зерна и повышение временного сопротивления разрушению криогенно обработанных FSW-соединений Al-Mg-Sc-Zr.

Феррейра и др. (Ferreira et al.) [18] рассмотрели влияние стеклянных и стальных шариков при дробеструйной обработке на сварное соединение. Они заметили лучшие результаты по усталости и временному сопротивлению разрушению при обработке стеклянными шариками по сравнению со стальными. При использовании стальных шариков наблюдалась также более высокая шероховатость поверхности, чем в случае обработки стеклянными шариками.

Группа ученых [19–21] исследовала влияние лазерного ударного упрочнения на микроструктурные свойства, усталостные свойства и коррозионную стойкость FSW-соединений из алюминиевых сплавов. Они наблюдали более мелкий размер зерна, лучшую коррозионную стойкость и более высокую усталостную прочность в соединениях после лазерного ударного упрочнения по сравнению с соединениями без лазерного ударного упрочнения в качестве послесварочной обработки. Однако необходимы дополнительные исследования послесварочной обработки для получения лучших механических свойств сварного соединения.

Обзор литературы показывает, что UVaFSW и послесварочная обработка улучшают механические свойства и текучесть материала. Однако на UVaFSW-соединениях AA7075-T651 было проведено ограниченное количество исследований с учетом влияния скорости сварки, вращения инструмента и дробеструйной обработки после сварки. Используя эту интерпретацию, в настоящей работе сравниваются характеристики необработанных и подвергнутых дробеструйной обработке соединений, сваренных трением

с перемешиванием (UVaFSW) AA7075-T651, с учетом влияния скорости сварки и вращения инструмента. Характеристики оцениваются с точки зрения микротвердости в различных областях сварного шва, временного сопротивления разрушению (UTS), шероховатости поверхности, анализа микроструктуры и разрушения с использованием изображений растровой электронной микроскопии (РЭМ). Эксперименты проводились посредством инструмента с конической резьбой штифтового типа. Результаты сопоставлены с доступной литературой по FSW-соединениям AA7075-T651, изготовленным с использованием рабочих инструментов конической формы и в форме конуса с резьбой.

Методика исследований

В настоящем исследовании стыковое соединение пластин AA7075-T651 без разделки кромок изготовлено с использованием UVaFSW. Экспериментальная UVaFSW-установка изображена на рис. 2. Эксперименты проводили при скоростях сварки 20, 28 и 40 мм/мин и частоте вращения инструмента 1000, 1400 и 2000 об/мин. Эксперименты проводили с использованием инструмента в форме конуса с резьбой на универсальном фрезерном станке. Две свариваемые пластины изначально имели прямоугольную форму и были очищены от заусенцев.

Соприкасающиеся кромки пластин обрабатывали до гладкой поверхности и очищали ацетоном. Ультразвуковые колебания, генерируемые ультразвуковым преобразователем, распространялись через преобразователь амплитуды,

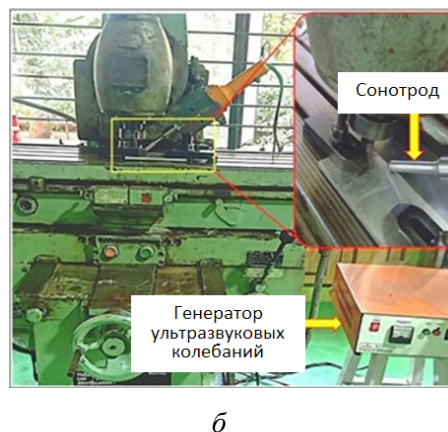
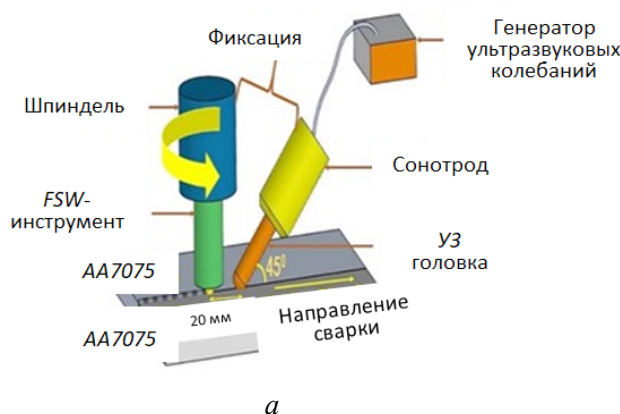


Рис. 2. Схематическое изображение (а), реальная экспериментальная установка (б)

Fig. 2. Schematic view (a), actual experimental setup (b)

позволяющий расширять амплитуду и фокусировать энергию на линии сварки двух пластин. Эта энергия передавалась локализованным заготовкам в окрестностях и перед инструментом FSW с помощью сонотрода. В процессе сварки применялась выходная мощность 1,2 кВт и частота ультразвуковых колебаний 20 кГц. При отсутствии нагрузки использовалась амплитуда вибрации 24 мкм. Сонотрод размещали под углом 45° к плоскости заготовки и на расстоянии 20 мм от FSW-инструмента.

Инструмент с поступательным и вращательным движением обеспечивает термомеханическое воздействие по траектории сварки. Профиль рабочего инструмента, изготовленного из инструментальной стали типа H13 в форме конуса с резьбой и плоским заплечиком, изображен на рис. 3. Осевая нагрузка на рабочую поверхность передается заплечиком инструмента. Разупрочненный материал с помощью рабочего инструмента переносится в сварочную ванну. В табл. 1 и 2 представлен химический состав инструмента и материала заготовки соответственно. В настоящем исследовании в качестве послесварочной обработки выбран процесс дробеструйной обработки. Экспериментальная установка и пара-

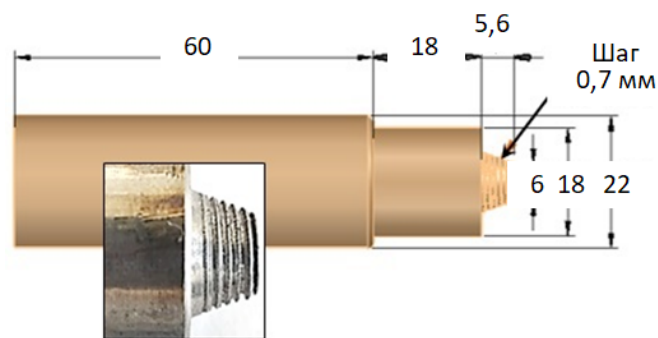


Рис. 3. Инструмент с конической резьбой (все размеры указаны в мм)

Fig. 3. Conical threaded pin type tool (all dimensions are in mm)

метры дробеструйной обработки представлены на рис. 4.

Микроструктура подвергнутых дробеструйной обработке UVaFSW-соединений на различных участках сварного шва и течение материала в ядре сварной точки исследованы с помощью РЭМ-изображений. Механические характеристики соединения, такие как временное сопротивление разрушению, микротвердость в ядре сварной точки, зона термомеханического воздействия (ЗТМВ), ЗТВ, основной металл и шероховатость поверхности (ШП),

Таблица 1

Table 1

Химический состав инструмента H13 для сварки трением с перемешиванием (% масс.)

Chemical composition of H13 FSW tool (% weight)

Elements / Элемент	Cr	Mo	Si	V	C	Ni	Cu	Mn	P	S
% weight / % масс.	4,75	1,10	0,80	0,80	0,32	0,3	0,25	0,2	0,03	0,03

Таблица 2

Table 2

Химический состав сплава AA7075 (% масс.)

Chemical composition of AA7075 alloy (% weight)

Elements / Элементы	% weight / % масс.	Elements / Элементы	% weight / % масс.	Elements / Элементы	% weight / % масс.	Elements / Элементы	% weight / % масс.
Si	0,069	Mn	0,006	Ni	0,012	Ti	0,028
Fe	0,204	Mg	2,33	Pb	0,012	Cr	0,195
Cu	1,64	Zn	5,28	Sn	< 0,005	Al	90,22



Рис. 4. Образец, установленный для дробеструйной обработки

Fig. 4. Mounted specimen for shot peening

проверяются с учетом влияния технологических переменных.

Временное сопротивление разрушению и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла оценивали для всех UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки, полученных при различных технологических параметрах. Испытание на растяжение проводили на универсальной испытательной машине по стандарту ASTM E8. На рис. 5, а, б показана схема раскроя пластины из алюминиевого сплава AA7075-T651 для получения испытуемого образца и образца для испытания на растяжение соответственно. Микротвердость в ядре сварной точки, ЗТМВ, ЗТВ и основном металле измеряли с помощью микротвердомера Vicker в соответствии со стандартом ISO 6507 с помощью алмазного индентора (136°) при

нагрузке 100 грамм и времени индентирования 20 секунд. Было получено среднее значение шероховатости поверхности, измеренное в начале, середине и конце сварного шва.

Для изучения течения материала в ядре сварочной точки и микроструктуры соединения в различных зонах сварки использовали сканирующий электронный микроскоп с полевой эмиссией (FESEM) при различных увеличениях. Образцы вырезали в перпендикулярном направлении к контуру сварного шва на проволоочном электроэрозионном вырезном станке.

Результаты и их обсуждение

В этом разделе обсуждаются характеристики UVaFSW-соединений алюминиевого сплава AA7075-T651, подвергнутых дробеструйной обработке. Оценены временное сопротивление разрушению, микротвердость, поведение при разрушении и микроструктура сварных соединений с учетом влияния скорости сварки и вращения инструмента. Временное сопротивление разрушению основного материала, полученное после испытания на растяжение, составляет 550 МПа. Матрица эксперимента и механические свойства UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки (проходы P1–P9) представлены в табл. 3.

Механические свойства UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки

Получены кривые растяжения-деформации для UVaFSW-соединений AA7075-T651, подвергнутых дробеструйной обработке (проходы

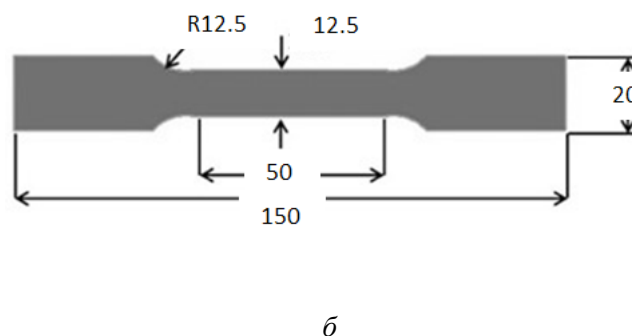
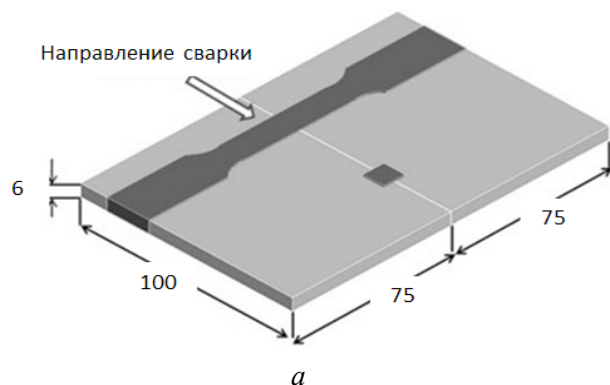


Рис. 5. Пластины AA7075 с изображением образцов для испытаний (а), образец для испытаний на растяжение (б) (все размеры указаны в мм)

Fig. 5. AA7075 plates showing abstraction of test specimens (а), tensile test specimen (б) (all dimensions are in mm)

Таблица 3

Table 3

Матрица эксперимента с механическими свойствами для UVaFSW-соединений AA7075, подвергнутых дробеструйной обработке

Experimental matrix with mechanical properties for shot-peened UVaFSWed AA7075 joints

Проход / Run	Вращение инстру- мента, об/мин / Tool rotation (rpm)	Скорость сварки, мм/ мин / Weld- ing speed (mm/min)	σ_b , МПа / UTS (MPa)	Отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла, % / Joint efficien- cy (%)	Микротвердость, HV / Microhardness (HV)			Шерохо- ватость поверх- ности, мкм / Surface roughness (μm)
					WN	TMAZ	HAZ / ЗТВ	
P1	1000	20	301,98	54,91	148	129	119	15,350
P2	1000	28	294,57	53,56	152	133	125	15,480
P3	1000	40	292,32	53,15	154	143	130	16,341
P4	1400	20	281,88	51,25	150	138	127	15,976
P5	1400	28	304,20	55,31	158	145	129	18,277
P6	1400	40	312,95	56,90	149	141	132	15,918
P7	2000	20	345,73	62,86	155	145	135	17,672
P8	2000	28	362,95	65,99	160	144	132	15,169
P9	2000	40	373,43	67,90	161	145	136	15,651

от P1 до P9). Для UVaFSW-соединений из алюми-
ниевого сплава AA7075-T651, подвергнутых
дробеструйной обработке, максимальное вре-
менное сопротивление разрушению составило
373,43 МПа (проход P9) и было получено при
вращении инструмента со скоростью 2000 об/мин
и скорости сварки 40 мм/мин, тогда как мини-
мальное временное сопротивление разрушению
281,88 МПа (проход P4) получено при вращении
инструмента со скоростью 1400 об/мин и ско-
рости сварки 20 мм/мин. Временное сопротив-
ление разрушению для UVaFSW-соединений
AA7075-T651, подвергнутых дробеструйной
обработке, сравнивали с показателями, полу-
ченными с использованием традиционной FSW
с коническими и коническими резьбовыми про-
филями инструмента [22–25]. Это исследование
показало более высокие значения временного
сопротивления разрушению для соединений, по-
лученных с помощью UVaFSW с последующей
дробеструйной обработкой.

При дробеструйной обработке стальные
шарики с высокой скоростью воздействовали
на UVaFSW-соединение. Высокая скорость вы-
зывает сжимающие остаточные напряжения

в полученном соединении. Этот эффект улуч-
шает временное сопротивление разрушению,
а также микротвердость соединения. Лучшие
эксплуатационные характеристики, почти в два
раза более высокие значения временного сопро-
тивления разрушению и отношения прочности
сварного соединения к прочности основного ме-
талла можно наблюдать у UVaFSW-соединений
после дробеструйной обработки по сравнению
с FSW-соединениями, полученными при об-
работке инструментом с конической резьбой
[22–25]. Более высокие механические свойства
UVaFSW-соединений после дробеструйной об-
работки можно объяснить повышенной скоро-
стью деформации, что приводит к более высокой
пластической деформации и лучшему течению
материала вокруг инструмента из-за ультразву-
ковых колебаний. Группа исследователей на-
блюдала более высокие механические свойства
UVaFSW-соединений из одинаковых и разнород-
ных алюминиевых сплавов [7–9].

Более высокие значения временного сопро-
тивления разрушению достигаются при более
высокой скорости вращения инструмента. Чем
выше скорость вращения инструмента, тем

больше выделяющаяся при трении теплота между плечом инструмента и поверхностью заготовки. Повышенная теплота трения разупрочняет материал и усиливает его движение к сварочной ванне, что приводит к равномерному перемешиванию материала. Микротвердость соединений измеряли в нескольких точках от центра шва с обеих сторон соединения. Динамическая рекристаллизация зерен и более интенсивная пластическая деформация вызывают изменение микротвердости в зоне сварки. Микротвердость UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки не была постоянной в зонах сварки, она имела распределение в основном в соответствии с формой буквы «W» и достигала максимальных значений в ядре сварочной точки и минимальных – в ЗТВ. Для UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки (проходы P1–P9) получена более высокая микротвердость во всех зонах сварного шва (ядре сварной точки, ЗТМВ и ЗТВ) по сравнению с полученной при использовании традиционной FSW с коническими и коническими резьбовыми профилями инструмента [22–25]. Это исследование показало более высокую микротвердость соединений, полученных с помощью UVaFSW с последующей дробеструйной обработкой.

Более высокая микротвердость в ядре сварной точки получается для UVaFSW-соединений, подвергнутых дробеструйной обработке, при более высоких скоростях вращения инструмента. Процесс дробеструйной обработки создает сжимающие остаточные напряжения на полученных соединениях, что приводит к повышению микротвердости в зоне ядра сварной точки. Максимальная микротвердость в ядре сварной точки составила 161 HV и была получена при более высокой скорости вращения инструмента 2000 об/мин для UVaFSW-соединений из алюминиевого сплава AA7075-T651 после дробеструйной обработки (проходы P1–P9).

UVaFSW-соединения, подвергнутые дробеструйной обработке, показали лучшие механические свойства по сравнению с FSW-соединениями. UVaFSW-соединения, подвергнутые дробеструйной обработке, выдерживали более высокие растягивающие нагрузки, поскольку дробеструйная обработка вызывает сжимающие напряжения в заготовке. UVaFSW-соединения выдерживали более высокие растя-

гивающие нагрузки, что можно объяснить более высоким тепловложением из-за воздействия ультразвуковых колебаний на сварной шов. Более того, ультразвуковые колебания, воздействовавшие на валик шва, способствовали динамической рекристаллизации и улучшали движение материала к сварному валику. Кроме того, использование ультразвуковых колебаний также уменьшило количество дефектов сварки в ядре сварной точки на границах с ЗТМВ по сравнению с традиционными FSW-соединениями. Качество соединения оценивали по шероховатости поверхности. Средняя шероховатость поверхности составила 15–18 мкм для UVaFSW-соединений из алюминиевого сплава AA7075-T651, подвергнутых дробеструйной обработке. Меньшие значения шероховатости поверхности получены при меньшей скорости вращения инструмента 1000 об/мин независимо от скорости сварки (проходы P1–P3).

На рис. 6 представлен внешний вид верхней поверхности UVaFSW-соединений из алюминиевого сплава AA7075-T651, подвергнутых дробеструйной обработке. Видны изменения поверхности и заполнение сварного валика. Образуются кольца, и можно увидеть следы заплечиков инструмента.

Структура UVaFSW-соединений, подвергнутых дробеструйной обработке

На рис. 7, а–в показаны соответственно РЭМ-изображения ядра сварной точки, ЗТМВ и ЗТВ UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки, полученных на проходе P9. Однородное распределение зерен в ядре сварной точки и отсутствие туннельных дефектов видно на рис. 7, а. Благодаря этим особенностям UVaFSW-соединения после дробеструйной обработки обладают более высоким временным сопротивлением разрушению по сравнению с обычным FSW-соединением. Мелкие, равноосные и равномерно распределенные зерна размером ~ 630 нм...5 мкм в ядре сварной точки UVaFSW-соединения, подвергнутого дробеструйной обработке, можно увидеть на рис. 7, а. UVaFSW улучшает размер зерна в ядре сварной точки, и материал течет внутри сварного валика по сравнению с обычной FSW.

На рис. 7, б показано РЭМ-изображение ЗТМВ UVaFSW-соединения после дробест-

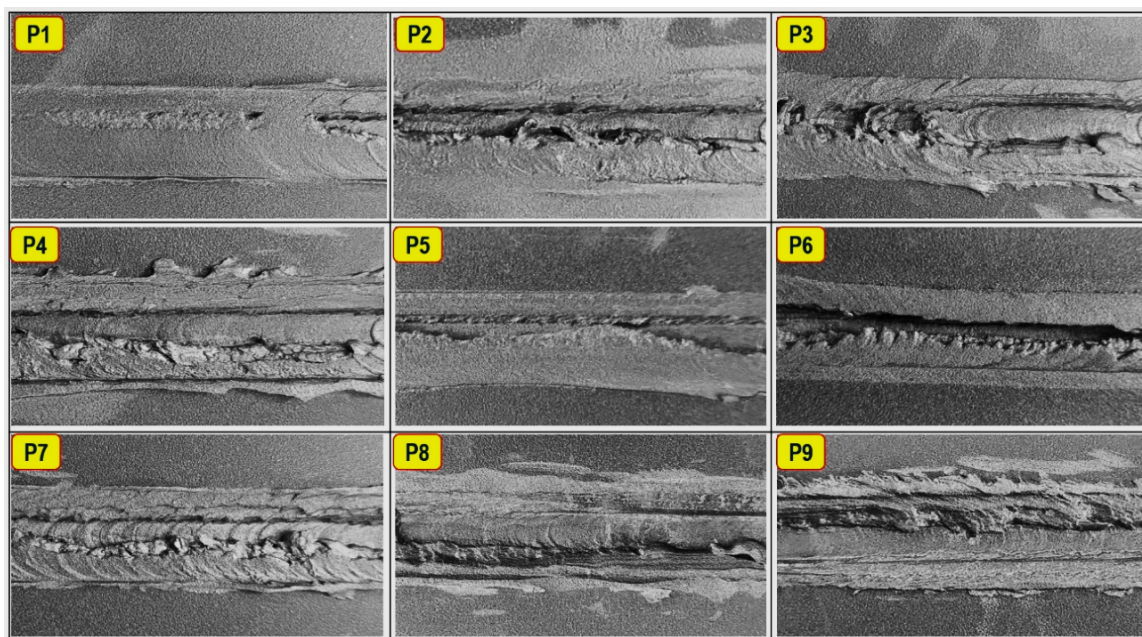
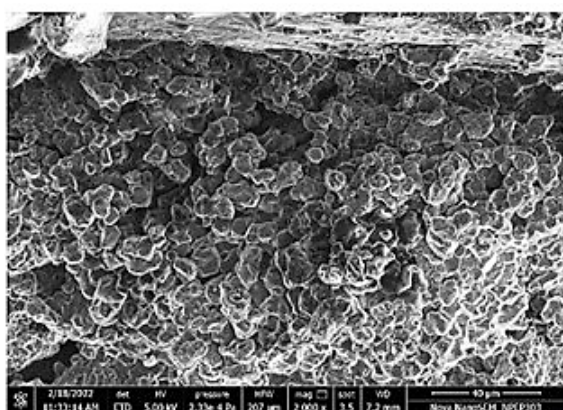
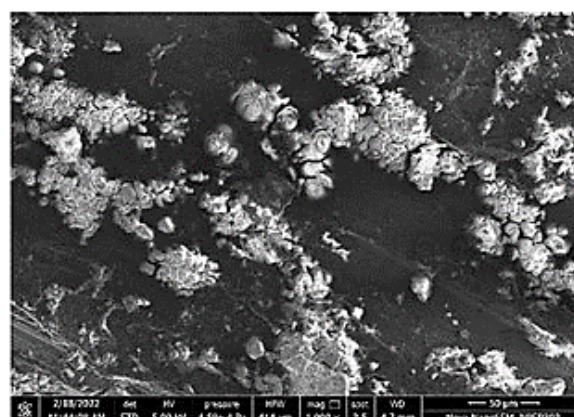


Рис. 6. Верхняя поверхность сварного шва UVaFSW-соединений AA7075, подвергнутого дробеструйной обработке

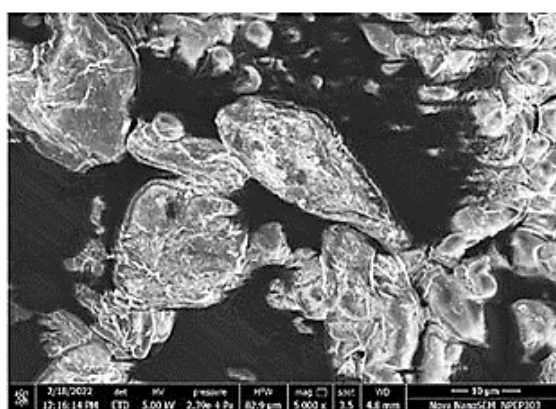
Fig. 6. Weld top surface of AA7075 UVaFSWed shot-peened joints



a



б



в

Рис. 7. РЭМ-изображения подвергнутых дробеструйной обработке UVaFSW-соединений в WN (*a*), TMAZ (*б*) и ЗТВ (*в*)

Fig. 7. SEM images of the shot-peened UVaFSWed joints at WN (*a*), TMAZ (*б*), and HAZ (*в*)

руйной обработки. Видно однородное перемешивание материала с равноосными зернами. В этой зоне структура отличается более грубым зерненным строением, чем в ядре сварной точки. В ЗТМВ можно увидеть зерна более крупных размеров, ~5–7 мкм. Это может быть связано с меньшим распределением тепла от ядра сварной точки к ЗТМВ. На рис. 7, в показано РЭМ-изображение ЗТВ UVaFSW-соединения после дробеструйной обработки. Видны удлиненные зерна, размеры которых варьируются в диапазоне ~8...11 мкм. Эта зона сварки находится между ЗТМВ и основным материалом и обозначается ЗТВ. Снижение микротвердости с увеличением размера зерна можно наблюдать в направлении от ядра сварной точки до ЗТВ. Самая высокая микротвердость характерна для ядра сварной точки и составляет 161 HV, за ней следуют 145 HV для ЗТМВ и 136 HV для ЗТВ.

Изображения, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, показывают, что дробеструйная обработка UVaFSW-соединений улучшает размер зерна в зоне ядра сварной точки и течение материала внутри сварного валика по сравнению с обычной FSW [21–25]. В зоне ядра сварного шва UVaFSW-соединения после дробеструйной обработки можно увидеть мелкие, равноосные и равномерно распределенные зерна. Более высокие механические свойства UVaFSW-соединений,

подвергнутых дробеструйной обработке, можно подтвердить по РЭМ-изображениям, демонстрирующим более высокую пластическую деформацию, динамическую рекристаллизацию и лучшее течение материала к сварному валику.

Характер разрушения UVaFSW-соединений AA7075

На рис. 8 изображены изломы подвергнутых дробеструйной обработке UVaFSW-соединений AA7075-T651, полученных в ходе испытаний от P1 до P9. Эти образцы были подвергнуты испытанию на растяжение, а полученные результаты – сравнительному анализу. Исследование показало, что все испытываемые образцы были разрушены в ЗТВ и продемонстрировали пластичное поведение во время разрушения. На рис. 9 показаны РЭМ-изображения поверхности излома образцов UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки, полученных во время прохода P9. Большие и неглубокие ямки на образцах UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки демонстрируют более высокую пластическую деформацию. Размеры ямок влияют на устойчивость пластической деформации во время испытаний на растяжение. Ямки, наблюдаемые на образцах UVaFSW-соединений, подвергнутых дробеструйной обработке, больше и равнооснее, чем у разрушенных в ходе испытания образцов обычных FSW-соединений [22–



Рис. 8. Характер разрушения UVaFSW-соединений AA7075, подвергнутых дробеструйной обработке

Fig. 8. Fracture behavior of shot-peened UVaFSWed AA7075 joints

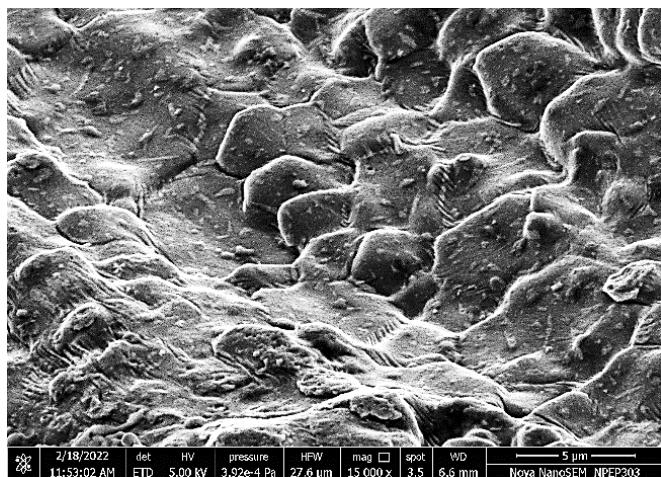


Рис. 9. РЭМ-изображения поверхности излома UVaFSWed-соединений AA7075, подвергнутых дробеструйной обработке

Fig. 9. SEM images of fractured surface of shot peened UVaFSWed joint of AA7075

25]. Следовательно, по временному сопротивлению разрушению и микротвердости в различных зонах сварного шва UVaFSW-соединения после дробеструйной обработки превосходят обычные FSW-соединения.

Исследователи наблюдали различный характер разрушения UVaFSW-соединений после дробеструйной обработки. Причина этого связана с выделением тепла во время процесса. Двойной эффект ультразвуковых колебаний и выделяющейся при трении теплоты, создаваемый заплечиком инструмента, приводит к выделению большего количества тепла при UVaFSW. Чем выше тепловыделение, тем больше пластическая деформация и текучесть материала, что в конечном итоге приводит к более высоким значениям временного сопротивления разрушению и микротвердости. Кроме того, группа исследователей отметила корреляцию между большими и равноосными ямками, наблюдаемыми на поверхности излома, с более высокими значениями временного сопротивления разрушению и микротвердости FSW-соединений [26–28].

Течение материала в UVaFSW-соединениях AA7075

В процессе сварки трением с перемешиванием (FSW) качество сварного шва зависит от течения пастообразного материала под инструментом. На рис. 10 показано движение материала в ядре сварной точки для UVaFSW-соединений

AA7075-T651, подвергнутых дробеструйной обработке, при проходе P9. При указанном проходе наблюдалось ламинарное течение материала. Микроструктура UVaFSW-соединений AA7075-T651, подвергнутых дробеструйной обработке, при проходе P9 лишена дефектов и пористости по сравнению с традиционными FSW-соединениями [22–25]. На рис. 10 показано, что поток материала является однонаправленным, это указывает на правильное перемешивание материала в ядре сварной точки. Правильное смешивание материала улучшает механические свойства соединений. За счет ультразвуковых колебаний устраняются туннельные дефекты и микропустоты, улучшается сплавление между материалами. Это приводит к более высоким механическим свойствам по сравнению с обычными FSW-соединениями.

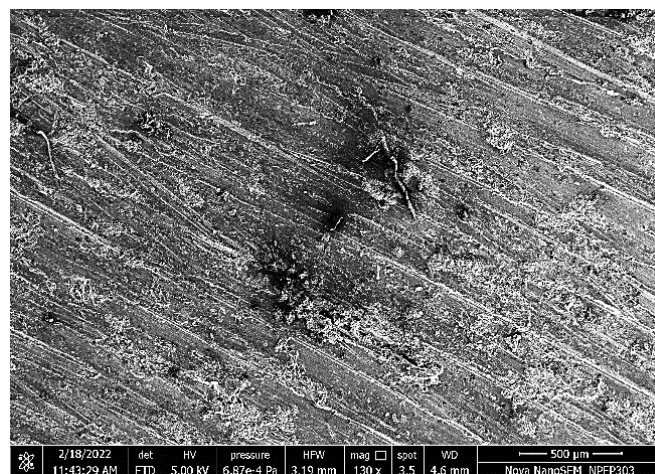


Рис. 10. Течение материала UVaFSW-соединения AA7075, подвергнутого дробеструйной обработке

Fig. 10. Material flow of shot-peened UVaFSWed AA7075 joint

В настоящем исследовании было отмечено, что UVaFSW-соединения AA7075-T651 после дробеструйной обработки демонстрируют превосходные механические свойства, благоприятную микроструктуру и поведение при разрушении пластичного типа по сравнению с обычными FSW-соединениями. Однако комбинация дробеструйной обработки и UVaFSW дала еще лучшие результаты. Необходимы дополнительные исследования для оптимизации комбинации UVaFSW и дробеструйной обработки с учетом различных промежуточных слоев, параметров процесса и геометрии рабочего инструмента.

Заключение

Целью данного исследования была оценка характеристик соединений алюминиевого сплава AA7075-T651, сваренных трением с перемешиванием и ультразвуковым воздействием с помощью инструмента с конической резьбой с последующей дробеструйной обработкой (UVaFSW). В ходе исследования варьировались скорости вращения инструмента и скорости сварки, чтобы оценить их влияние на прочность соединений на разрыв, микротвердость, микроструктуру и поведение при разрушении. Кроме того, в ходе исследования при помощи растрового электронного микроскопа изучалось распределение зерен, течение материала в ядре сварочной точки и поверхности разрушения соединения после испытания на растяжение. По итогам исследования были сделаны следующие выводы.

– UVaFSW-соединения имеют лучшее временное сопротивление разрушению, микротвердость в ядре сварной точки и минимальную шероховатость поверхности по сравнению с традиционными FSW-соединениями. UVaFSW-соединение после дробеструйной обработки характеризуется максимальным значением временного сопротивления разрушению (373,43 МПа) и микротвердости в ядре сварной точки (161 HV) при вращении инструмента со скоростью 2000 об/мин и скорости сварки 40 мм/мин. Однако следует отметить, что при снижении скорости сварки до 28 мм/мин была получена меньшая шероховатость поверхности – 15,16 мкм.

– Микротвердость UVaFSW-соединений, прошедших дробеструйную обработку, варьируется в различных зонах сварки, ее распределение в основном соответствует форме буквы «W». Максимальное значение микротвердости наблюдается в зоне ядра сварочной точки, а минимальное – в зоне ЗТВ. Кроме того, значения микротвердости выше в UVaFSW-соединениях, подвергнутых дробеструйной обработке, по сравнению с обычными FSW-соединениями.

– Осмотр подвергнутого дробеструйной обработке UVaFSW-соединения показывает, что проплавление материала в ядре сварочной точки хорошее; наблюдается течение пастообразного материала; соединение не имеет тоннельных дефектов и пустот, наблюдается однородное распределение более мелких зерен. Обнаружено,

что по отмеченным выше характеристикам указанные соединения превосходят традиционные FSW-соединения.

– Разрушение всех испытанных образцов UVaFSW-соединений, подвергнутых дробеструйной обработке, происходит в ЗТВ из-за более низкой микротвердости, а поверхность разрушения носит вязкий характер. На поверхности разрушения UVaFSW-соединений, подвергнутых дробеструйной обработке, наблюдаются более крупные, равноосные и неглубокие ямки, что выражается в более высоком временном сопротивлении разрушению и микротвердости по сравнению с обычными FSW-соединениями.

– Механические свойства и микроструктура, наблюдаемые в зонах сварки UVaFSW-соединений, подвергнутых дробеструйной обработке, превосходят свойства обычных FSW-соединений. Это исследование предполагает возможность оптимизации обработанных дробью UVaFSW-соединений алюминиевого сплава AA7075-T651.

Список литературы

1. Cetkin E., Çelik Y.H., Temiz S. Microstructure and mechanical properties of AA7075/AA5182 jointed by FSW // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 268. – P. 107–116. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.01.005.
2. Chinchani S., Gaikwad V.S. State of the art in friction stir welding and ultrasonic vibration-assisted friction stir welding of similar/dissimilar aluminum alloys // *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 11. – P. 67–100. – DOI: 10.22061/JCARME.2021.7390.1983.
3. Arora A., De A., Debroy T. Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter // *Scripta Materialia*. – 2011. – Vol. 64. – P. 9–12. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.08.052.
4. Shi L., Wu C.S., Liu X.C. Modeling the effects of ultrasonic vibration on friction stir welding // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 222. – P. 91–102. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.002.
5. Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting / Z. Yao, G.Y. Kim, L. Faidley, Q. Zou, D. Mei, Z. Chen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212. – P. 640–646. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.10.017.
6. Siddiq A., El Sayed T. Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM // *Materials Letters*. – 2011. – Vol. 65. – P. 356–359. – DOI: 10.1016/j.matlet.2010.10.031.

7. *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.
8. Evolution of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of ultrasonic assisted welded-brazed Mg/Ti joint / C. Xu, G. Sheng, X. Cao, X. Yuan // Journal of Materials Science and Technology. – 2016. – Vol. 32. – P. 1253–1259. – DOI: 10.1016/j.jmst.2016.08.029.
9. *Liu X., Wu C., Padhy G.K.* Characterization of plastic deformation and material flow in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding // Scripta Materialia. – 2015. – Vol. 102. – P. 95–98. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.02.022.
10. *Amuda M.O.H., Mridha S.* Comparative evaluation of grain refinement in AISI 430 FSS welds by elemental metal powder addition and cryogenic cooling // Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. – P. 609–618. – DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.066.
11. Fatigue crack growth performance of peened friction stir welded 2195 aluminum alloy joints at elevated and cryogenic temperatures / O. Hatamleh, M. Hill, S. Forth, D. Garcia // Materials Science and Engineering A. – 2009. – Vol. 519. – P. 61–69. – DOI: 10.1016/j.msea.2009.04.049.
12. *Hatamleh O., Mishra R.S., Oliveras O.* Peening effects on mechanical properties in friction stir welded AA 2195 at elevated and cryogenic temperatures // Materials and Design. – 2009. – Vol. 30. – P. 3165–3173. – DOI: 10.1016/j.matdes.2008.11.010.
13. Influence of ambient and cryogenic temperature on friction stir processing of severely deformed aluminum with SiC nanoparticles / M.S. Khorrami, M. Kazeminezhad, Y. Miyashita, N. Saito, A.H. Kokabi // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 718. – P. 361–372. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.05.234.
14. *Singh S., Dhuria G.* Investigation of post weld cryogenic treatment on weld strength in friction stir welded dissimilar aluminum alloys AA2014-T651 and AA7075-T651 // Materials Today Proceedings. – 2017. – Vol. 4. – P. 8866–8873. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.237.
15. *Wang J., Fu R., Li Y.* Effects of deep cryogenic treatment and low-temperature aging on the mechanical properties of friction-stir-welded joints of 2024-T351 aluminum alloy // Materials Science and Engineering A. – 2014. – Vol. 609. – P. 147–153. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.04.077.
16. Grain refinement and nanostructure formation in pure copper during cryogenic friction stir processing / Y. Wang, R. Fu, L. Jing, Y. Li, D. Sang // Materials Science and Engineering A. – 2017. – Vol. 703. – P. 470–476. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.07.090.
17. Cryogenic properties of Al-Mg-Sc-Zr friction-stir welds / D. Zhemchuzhnikova, S. Malopheyev, S. Mironov, R. Kaibyshev // Materials Science and Engineering A. – 2014. – Vol. 598. – P. 387–395. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.060.
18. Effect of bead characteristics on the fatigue life of shot peened Al 7475-T7351 specimens / N. Ferreira, J.S. Jesus, J.A.M. Ferreira, C. Capela, J.M. Costa, A.C. Batista // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 134. – P. 105521. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105521.
19. *Liu P., Sun S., Hu J.* Effect of laser shock peening on the microstructure and corrosion resistance in the surface of weld nugget zone and heat-affected zone of FSW joints of 7050 Al alloy // Optics & Laser Technology. – 2019. – Vol. 112. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.10.054.
20. Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating / Y. Sano, K. Masaki, T. Gushi, T. Sano // Materials and Design. – 2012. – Vol. 36. – P. 809–814. – DOI: 10.1016/j.matdes.2011.10.053.
21. *Gaikwad V.S., Chinchani S.* Mechanical behaviour of friction stir welded AA7075-T651 joints considering the effect of tool geometry and process parameters // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2022. – Vol. 8 (4). – P. 3730–3748. – DOI: 10.1080/2374068X.2021.1976554.
22. *Gaikwad V., Chinchani S., Manav O.* Investigation and multi-objective optimization of friction stir welding of AA7075-T651 plates // Welding International. – 2023. – Vol. 37 (2). – P. 68–78. – DOI: 10.1080/09507116.2023.2177568.
23. *Gaikwad V.S., Chinchani S.S.* Adaptive neuro fuzzy inference system to predict the mechanical properties of friction stir welded AA7075-T651 joints // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 16 (3). – P. 381–393.
24. *Gaikwad V.S., Chinchani S.* Mechanical properties, microstructure, and fracture behavior of friction stir welded AA7075 joints with conical pin and conical threaded pin type tools // Scientia Iranica. – 2022. – Vol. 30. – P. 1–20. – DOI: 10.24200/sci.2022.59154.6087.
25. *Gaikwad V.S., Chinchani S.* Investigation on surface roughness, ultimate tensile strength, and microhardness of friction stir welded AA7075-T651 joint // Materials Today Proceedings. – 2021. – Vol. 46. – P. 8061–8065. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.034.
26. Improving tensile properties of Al/Mg joint by smashing intermetallic compounds via ultrasonic-assisted stationary shoulder friction stir welding /



Z. Liu, X. Meng, S. Ji, Z. Li, L. Wang // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 31. – P. 552–559. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.12.022.

27. Gao S., Wu C.S., Padhy G.K. Material flow, microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA 2024-T3 enhanced by ultrasonic vibrations // Journal of Manufacturing Processes. –

2017. – Vol. 30. – P. 385–395. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.10.008.

28. Dissimilar friction stir welding of 6061 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy assisted with ultrasonic / S. Ji, X. Meng, Z. Liu, R. Huang, Z. Li // Materials Letters. – 2017. – Vol. 201. – P. 173–176. – DOI: 10.1016/j.matlet.2017.05.011.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Investigations on ultrasonic vibration-assisted friction stir welded AA7075 joints: Mechanical properties and fracture analysis

Vaibhav Gaikwad^{a, *}, Satish Chinchani^b

Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Pune – 411048, Maharashtra, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-3818-1893>, vaibhav.219p0007@viit.ac.in; ^b <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchani@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06 January 2024

Revised: 09 February 2024

Accepted: 20 March 2024

Available online: 15 June 2024

Keywords:

Friction stir welding

Shot peening

Fracture analysis

Ultrasonic vibrations

AA7075

ABSTRACT

Introduction. Joint efficiency and strength, particularly in aluminum alloys, are crucial in aerospace, defense, and industrial applications. Post-welding treatments like shot peening and laser shock peening significantly improve joint efficiency and strength, enhancing fatigue life, grain structure, and tensile strength. **The purpose of the work.** The literature reviewed shows that the ultrasonic vibration-assisted friction stir welding (U_{Va}FSW) and post-weld treatment improved the mechanical properties and material flow. However, limited studies have been observed on the U_{Va}FSW joints of AA7075-T651, considering the consequence of welding speed, tool rotation, and post-weld shot peening treatment. **The methods of investigation.** The study investigates the ultrasonic vibration-assisted friction stir welded (U_{Va}FSWed) AA7075-T651 joint's tensile strength, microhardness, microstructure, and fracture behavior, considering the impact of tool rotation, welding speed, and post-weld shot peening treatment. **Results and Discussion.** The post-weld treated shot-peened U_{Va}FSWed joints demonstrated the maximum tensile strength of 373.43 MPa, the microhardness of 161 HV, and the lowest surface roughness of 15.16 μm at 40 mm/min welding speed when compared to the friction stir-welded (FSWed) joints. These results indicate that shot peening improved the mechanical properties and surface quality of the U_{Va}FSWed joints. The high tensile strength and low surface roughness make these joints suitable for applications requiring strength and aesthetics. The fracture for the shot peened U_{Va}FSWed joints mainly occurred in the heat-affected zone (HAZ) during the tensile test. It could be attributed to the higher temperature experienced during welding, which resulted in grain growth and decreased material strength in the HAZ. The shot-peened U_{Va}FSWed joint has a more uniform grain distribution than the FSWed one, which contributed to the joint's higher tensile strength. The fractured surface of the shot peened U_{Va}FSWed joints showed larger, equiaxed, and shallow dimples, resulting in higher ultimate tensile strength (UTS) and microhardness compared to the conventional FSWed joints. The mechanical properties and microstructure observed in the welding zones of shot peened U_{Va}FSWed joints are superior to those of conventional FSW joints. However, further investigation is required to determine the specific factors contributing to this localized failure at HAZ, considering the effects of shot peening parameters. This study also suggests the potential for optimizing shot peened U_{Va}FSWed joints of AA7075-T651.

For citation: Gaikwad V., Chinchani S. Investigations on ultrasonic vibration-assisted friction stir welded AA7075 joints: Mechanical properties and fracture analysis. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 6–22. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-6-22. (In Russian).

References

1. Cetkin E., Çelik Y.H., Temiz S. Microstructure and mechanical properties of AA7075/AA5182 jointed by FSW. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 268, pp. 107–116. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.01.005.
2. Chinchani S., Gaikwad V.S. State of the art in friction stir welding and ultrasonic vibration-assisted friction stir welding of similar/dissimilar aluminum alloys. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 11, pp. 67–100. DOI: 10.22061/JCARME.2021.7390.1983.
3. Arora A., De A., Debroy T. Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter. *Scripta Materialia*, 2011, vol. 64, pp. 9–12. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.08.052.

* Corresponding author

Gaikwad Vaibhav, Ph.D. (Engineering)

Vishwakarma Institute of Information Technology,

Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk),

Pune – 411048, Maharashtra, India

Tel.: 91-20269502401, e-mail: vaibhav.219p0007@viit.ac.in

4. Shi L., Wu C.S., Liu X.C. Modeling the effects of ultrasonic vibration on friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 222, pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.002.
5. Yao Z., Kim G.Y., Faidley L., Zou Q., Mei D., Chen Z. Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, pp. 640–646. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.10.017.
6. Siddiq A., El Sayed T. Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM. *Materials Letters*, 2011, vol. 65, pp. 356–359. DOI: 10.1016/j.matlet.2010.10.031.
7. 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.
8. Xu C., Sheng G., Cao X., Yuan X. Evolution of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of ultrasonic assisted welded-brazed Mg/Ti joint. *Journal of Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, pp. 1253–1259. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.08.029.
9. Liu X., Wu C., Padhy G.K. Characterization of plastic deformation and material flow in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding. *Scripta Materialia*, 2015, vol. 102, pp. 95–98. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.02.022.
10. Amuda M.O.H., Mridha S. Comparative evaluation of grain refinement in AISI 430 FSS welds by elemental metal powder addition and cryogenic cooling. *Materials and Design*, 2012, vol. 35, pp. 609–618. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.066.
11. Hatamleh O., Hill M., Forth S., Garcia D. Fatigue crack growth performance of peened friction stir welded 2195 aluminum alloy joints at elevated and cryogenic temperatures. *Materials Science and Engineering A*, 2009, vol. 519, pp. 61–69. DOI: 10.1016/j.msea.2009.04.049.
12. Hatamleh O., Mishra R.S., Oliveras O. Peening effects on mechanical properties in friction stir welded AA2195 at elevated and cryogenic temperatures. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, pp. 3165–3173. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.11.010.
13. Khorrami M.S., Kazeminezhad M., Miyashita Y., Saito N., Kokabi A.H. Influence of ambient and cryogenic temperature on friction stir processing of severely deformed aluminum with SiC nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 718, pp. 361–372. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.05.234.
14. Singh S., Dhuria G. Investigation of post weld cryogenic treatment on weld strength in friction stir welded dissimilar aluminum alloys AA2014-T651 and AA7075-T651. *Materials Today Proceedings*, 2017, vol. 4, pp. 8866–8873. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.237.
15. Wang J., Fu R., Li Y. Effects of deep cryogenic treatment and low-temperature aging on the mechanical properties of friction-stir-welded joints of 2024-T351 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2014, vol. 609, pp. 147–153. DOI: 10.1016/j.msea.2014.04.077.
16. Wang Y., Fu R., Jing L., Li Y., Sang D. Grain refinement and nanostructure formation in pure copper during cryogenic friction stir processing. *Materials Science and Engineering A*, 2017, vol. 703, pp. 470–476. DOI: 10.1016/j.msea.2017.07.090.
17. Zhemchuzhnikova D., Malopheyev S., Mironov S., Kaibyshev R. Cryogenic properties of Al-Mg-Sc-Zr friction-stir welds. *Materials Science and Engineering A*, 2014, vol. 598, pp. 387–395. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.060.
18. Ferreira N., Jesus J.S., Ferreira J.A.M., Capela C., Costa J.M., Batista A.C. Effect of bead characteristics on the fatigue life of shot peened Al 7475-T7351 specimens. *International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 134, p. 105521. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105521.
19. Liu P., Sun S., Hu J. Effect of laser shock peening on the microstructure and corrosion resistance in the surface of weld nugget zone and heat-affected zone of FSW joints of 7050 Al alloy. *Optics & Laser Technology*, 2019, vol. 112, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.10.054.
20. Sano Y., Masaki K., Gushi T., Sano T. Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating. *Materials and Design*, 2012, vol. 36, pp. 809–814. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.10.053.
21. Gaikwad V.S., Chinchani S. Mechanical behaviour of friction stir welded AA7075-T651 joints considering the effect of tool geometry and process parameters. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 8 (4), pp. 3730–3748. DOI: 10.1080/2374068X.2021.1976554.
22. Gaikwad V., Chinchani S., Manav O. Investigation and multi-objective optimization of friction stir welding of AA7075-T651 plates. *Welding International*, 2023, vol. 37 (2), pp. 68–78. DOI: 10.1080/09507116.2023.2177568.

23. Gaikwad V.S., Chinchani S.S. Adaptive neuro fuzzy inference system to predict the mechanical properties of friction stir welded AA7075-T651 joints. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2022, vol. 16 (3), pp. 381–393.

24. Gaikwad V.S., Chinchani S. Mechanical properties, microstructure, and fracture behavior of friction stir welded AA7075 joints with conical pin and conical threaded pin type tools. *Scientia Iranica*, 2022, vol. 30, pp. 1–20. DOI: 10.24200/sci.2022.59154.6087.

25. Gaikwad V.S., Chinchani S. Investigation on surface roughness, ultimate tensile strength, and microhardness of friction stir welded AA7075-T651 joint. *Materials Today Proceedings*, 2021, vol. 46, pp. 8061–8065. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.034.

26. Liu Z., Meng X., Ji S., Li Z., Wang L. Improving tensile properties of Al/Mg joint by smashing intermetallic compounds via ultrasonic-assisted stationary shoulder friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 31, pp. 552–559. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.12.022.

27. Gao S., Wu C.S., Padhy G.K. Material flow, microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA 2024-T3 enhanced by ultrasonic vibrations. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 30, pp. 385–395. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.10.008.

28. Ji S., Meng X., Liu Z., Huang R., Li Z. Dissimilar friction stir welding of 6061 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy assisted with ultrasonic. *Materials Letters*, 2017, vol. 201, pp. 173–176. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.05.011.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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