



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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





Влияние геометрии наконечника сварочного инструмента на характеристики растяжения соединений сплава АА8011, полученных сваркой трением с перемешиванием





Йогендра Раджпут^{1, a, *}, Авадеш Шарма^{1, b}, Вибухути Мишра^{2, c}, Кушал Саксена^{1, d},
Деш Дипак^{1, e}, Шиама Шарма^{3, f}

¹ Инженерный колледж Раджкия, Майнпури, Уттар-Прадеш, 205119, Индия

² Инженерный колледж Раджкия, Азамгарх, Уттар-Прадеш, 276201, Индия

³ Манипалский университет, Джайпур, Раджастхан, 303007, Индия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-9662-0903>,  yogendrasingh.rajpoot@recmainpuri.in; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2795-6497>,  aksharma@recmainpuri.in;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-5039-3573>,  vibhooti1810@gmail.com; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-6982-3636>,  saxenakushal05@gmail.com;

^e  <https://orcid.org/0000-0003-2662-9571>,  dd08iitd@gmail.com; ^f  <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>,  shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14

История статьи:

Поступила: 06 июля 2023

Рецензирование: 01 августа 2023

Принята к печати: 15 августа 2023

Доступно онлайн: 15 декабря 2023

Ключевые слова:

СТП

Геометрия наконечника инструмента

Прочность на разрыв при растяжении

Благодарности

Выражаем благодарность своим студентам и аспиранту Мохду Ларебу, г-ну Чандрашекхару и г-ну Анкиту Арье за помощь в проведении экспериментов.

АННОТАЦИЯ

Введение. Алюминиевые сплавы широко востребованы в судостроении и авиастроении. В настоящем исследовании особое внимание уделено влиянию двух видов наконечников сварочного инструмента с различной геометрией на характеристики растяжения сварных соединений сплава АА8011. Технология соединения – сварка трением с перемешиванием (СТП) – выбрана из-за уникальных свойств, таких как очень малая ширина зоны термического влияния при соединении в твердом состоянии. На микроструктуру и механические свойства сварного соединения влияет геометрия инструмента и такие параметры, как скорость вращения и перемещения инструмента. **Методы исследования.** Эксперименты по СТП проводили на универсальном фрезерном станке сварочным инструментом с двумя видами наконечников – в форме усеченного конуса и цилиндра с резьбой – в трех различных режимах (1 – 320 об/мин, 45 мм/мин; 2 – 400 об/мин, 50 мм/мин; 3 – 575 об/мин, 60 мм/мин). Для анализа характеристик соединения были проведены испытания на растяжение и рассчитана максимальная прочность на разрыв, а также для каждого отдельного случая было рассчитано отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла. **Результаты и обсуждение.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что более высокие значения частоты вращения оказывают положительное влияние на прочность сварного соединения в случае использования сварочного инструмента с наконечником как в форме усеченного конуса, так и в форме цилиндра с резьбой. Независимо от частоты вращения и скорости подачи прочность сварного соединения на разрыв и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла стабильно выше в случае использования сварочного инструмента с наконечником в форме усеченного конуса по сравнению с наконечником в форме цилиндра с резьбой. Независимо от геометрии наконечника прочность сварного соединения на разрыв и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла максимальны при более высокой частоте вращения инструмента и составляют 123 МПа и 73,6 % для наконечника в форме усеченного конуса и 142 МПа и 85 % для наконечника в форме цилиндра с резьбой при 575 об/мин и 60 мм/мин. Это самые высокие значения по сравнению с 119 МПа и 72,5 % при 320 об/мин, 45 мм/мин; 115 МПа и 70,1 % при 400 об/мин, 50 мм/мин для инструмента с наконечником в форме усеченного конуса; 138 МПа и 82,6 % при 320 об/мин, 45 мм/мин и 77,8 % и 130 МПа при 400 об/мин, 50 мм/мин для наконечника в форме цилиндра с резьбой. В целом исследование показывает, что соединения, полученные при помощи инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой, имеют более высокую прочность на разрыв и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла, чем соединения, полученные при помощи инструмента с наконечником в форме усеченного конуса. Наибольшая прочность на разрыв и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла – 142 МПа и 84,5 % соответственно – были достигнуты при использовании инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой при 575 об/мин и 60 мм/мин.

Для цитирования: Влияние геометрии наконечника сварочного инструмента на характеристики растяжения соединений сплава АА8011, полученных сваркой трением с перемешиванием / Й.С. Раджпут, А.К. Шарма, В.Н. Мишра, К. Саксена, Д. Дипак, Ш.С. Шарма // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 105–116. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-105-116.

*Адрес для переписки

Раджпут Йогендра Сингх, магистр

Инженерный колледж Раджкия, Майнпури,

205119, Уттар-Прадеш, Индия

Тел.: +917014210761, e-mail: yogendrasingh.rajpoot@recmainpuri.in

Введение

Сварка трением с перемешиванием, которая была изобретена Уэйном Томасом в компании TWI в 1991 году, хорошо подходит для соединения металлов в твердом состоянии [1, 2]. Алюминиевые сплавы часто применяются в авиационной и автомобильной промышленности, железнодорожном транспорте и при строительстве мостов из-за высокого соотношения прочности и веса, а также коррозионной стойкости [2]. По сравнению с традиционными способами сварки, при сварке трением с перемешиванием материал подвергается интенсивной пластической деформации, в результате чего образуется зона перемешивания с очень мелкими рекристаллизованными зернами [3], называемая зоной динамической рекристаллизации [4–6]. Плавления и повторной кристаллизации не происходит, поэтому материалы соединяются в твердом состоянии. Сварка трением с перемешиванием также характеризуется низким потреблением энергии [7].

Сварка трением с перемешиванием (СТП) имеет особое значение для соединения алюминиевых и магниевых сплавов, поскольку она может значительно уменьшить такие дефекты, как растрескивание при затвердевании, пористость и деформации, которые обычно наблюдаются при сварке плавлением. Эти технологические возможности СТП сделали ее очень практичной для соединения некоторых сплавов. Взаимодействие нижней поверхности инструмента и поверхности наконечника с обрабатываемым материалом приводит к образованию достаточного количества тепла в результате трения, необходимого для приведения материала в мягкое состояние без плавления [8, 9]. Таким образом, поверхность наконечника инструмента играет решающую роль в создании тепла, выделяющегося при трении, течении материала и пластической деформации. Смещение инструмента также является критическим фактором, определяющим выделение тепла при трении наконечника инструмента о материал [10], поэтому оно определяет теплофизические свойства в зоне сварки [11, 12]. Качество соединений зависит от правильного выбора параметров процесса СТП [13, 14]. Как показывает практика, в некоторых исследованиях основное внимание уделяется

сварке трением с перемешиванием горяче- и холоднореформированных алюминиевых сплавов [15] с использованием некоторых специально разработанных инструментов [16], имеющих различные формы наконечников: шестиугольные, пятиугольные и квадратные [17].

Некоторые недавние исследования показали, что СТП способна соединять как одинаковые, так и разнородные алюминиевые сплавы [18–21]. Стыковые соединения при сварке трением с перемешиванием очень распространены в отличие от соединений алюминиевых сплавов внахлестку, которые изучали лишь некоторые исследователи [22, 23]. Дэвидсон и др. [24] исследовали характеристики прочности на растяжение СТП-соединений из алюминия AA8011 при различных параметрах процесса и пришли к выводу, что соединения, полученные при скорости перемещения инструмента 45 мм/мин, скорости вращения инструмента 1400 об/мин и осевом усилии 2,15 кН имеют лучшую прочность на растяжение по сравнению с другими соединениями. Палани и др. [25] получили разнородное СТП-соединение и сосредоточили внимание на влиянии переменных процесса и конструкции инструмента на качество соединений. Таким образом, в этой работе была предпринята попытка определить влияние трех различных профилей наконечников (квадратного, пятиугольного и шестиугольного) и комбинации скорости вращения и перемещения инструмента на свойства СТП-соединений разнородных алюминиевых сплавов AA6061-T6 и AA8011 при растяжении. Применяя СТП, Элангован и Баласубраманиан [26–28] исследовали характеристики пяти наконечников с различной геометрией: в форме цилиндра с резьбой, усеченного конуса, треугольника, квадрата и прямого цилиндра – из алюминиевого сплава AA2219. Хотя предыдущие исследования показали, что геометрия [29–31] или форма [32] наконечников инструмента и скорость сварки влияют на повышение прочности, связь между низкой скоростью сварки и геометрией наконечника инструмента еще не установлена. Таким образом, в настоящем исследовании алюминиевый сплав AA8011 подвергался сварке трением с перемешиванием при низкой скорости сварки с различным профилем наконечника, а влияние на качество соединения оценивалось с точки зрения твердости и прочности соединения.

Материалы и методы исследования

Проведен эксперимент по разработке бездефектных СТП-соединений из сплава AA8011 на вертикально-фрезерном станке. Свариваемые пластины фиксировали на опорной плите прижимами, как показано на рис. 1. На рис. 2 изображено пластическое течение материала в процессе сварки. Химический состав сплава AA8011 приведен в табл. 1. Рассматриваемые параметры процесса включают геометрию наконечников инструмента, как показано на рис. 3, со всеми характеристиками инструмента, указанными в табл. 2, и несколькими комбинациями скорости вращения и скорости перемещения инструмента. Известно, что эти параметры оказывают важное влияние на прочность и другие механические свойства соединения.

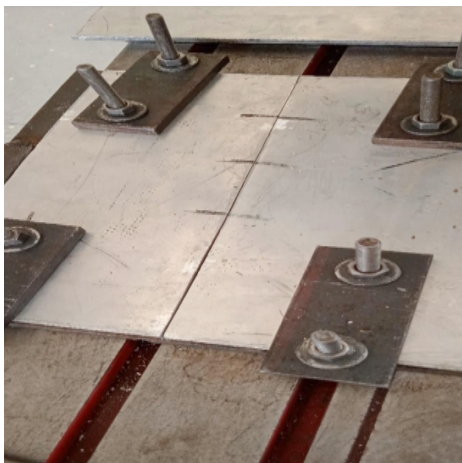


Рис. 1. Пластины, закрепленные на столе вертикально-фрезерного станка

Fig. 1. Plates mounted on the bed of vertical milling machine

Прокатанную пластину толщиной 6 мм нарезали на заготовки необходимых размеров с помощью ручной ножовки. Две пластины расположили рядом для получения стыкового СТП-соединения без разделки кромок. Пластины закрепили на опорной плите, а сварку осу-



Рис. 2. Пластическое течение материала в процессе СТП

Fig. 2. Material flow during FSW

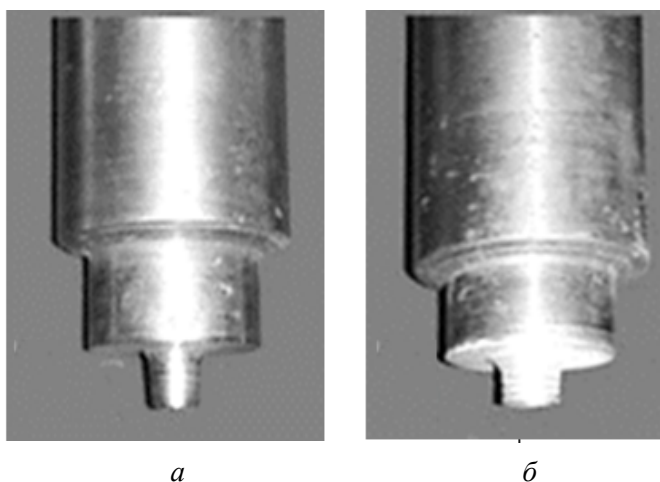


Рис. 3. Геометрия наконечника сварочного инструмента:

a – усеченный конус; *б* – цилиндр с резьбой

Fig. 3. Tool pin profiles:

a – taper cylindrical; *б* – threaded cylindrical

ществляли в направлении прокатки. Сварка производилась двумя разными неплавящимися инструментами из стали D2. Химический состав стали D2 приведен в табл. 3. Выбор материала инструмента зависит от свариваемого материала. Для мягких материалов можно использовать инструментальную или нержавеющую сталь, а для твердых материалов необходимы огнеупорные материалы. Оценку механических свойств

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава AA8011
Chemical Composition of AA8011

Элемент	Al	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn
Содержание, %	97,5–99,1	0,6–0,90	0,5–0,6	0–0,1	0–0,1	0–0,1	0–0,1

Таблица 2

Table 2

Характеристики инструмента
Tool Features

Инструмент	(А)	(В)
Геометрия наконечника	Усеченный конус	Цилиндр с резьбой
Диаметр наконечника	Основание – 6 мм, вершина – 4 мм	6 мм, резьба с шагом 1,2 мм
Длина наконечника	5,7 мм	5,7 мм
Диаметр плеча	14 мм	14 мм

Таблица 3

Table 3

Химический состав стали D2
Chemical Composition of D2 steel

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
C	1,40–1,60	Mo	0,70–1,20
Mn	0,60	V	1,10
Si	0,60	Ni	0,30
Co	1,00	P	0,03
Cr	11,0–13,0	Cu	0,25
S	0,03	Al	остальное

соединений проводили путем испытания на растяжение стандартных образцов. Сваренные пластины разрезали поперек направления сварки и проводили испытание на растяжение на универсальной испытательной машине с постоянной скоростью деформации, а именно со скоростью траверсы 1 мм/мин.

Результаты и их обсуждение

Прочность на растяжение основного материала была измерена и использована в качестве эталона для сравнения. На рис. 4, *а* показан образец основного материала, который был испытан, а на рис. 4, *б* представлен разрушенный

образец основного материала после испытания на растяжение. В табл. 4 приведены результаты испытаний на растяжение основного материала. Разрушенные образцы сварных соединений показаны на рис. 5 и 7, а диаграммы растяжения, полученные после испытаний на растяжение сварных соединений, изготовленных с использованием инструментов с наконечниками разной формы, представлены на рис. 6 и 8.

Результаты показывают, что сварные соединения, выполненные с использованием инструмента с наконечником в форме усеченного конуса и цилиндра с резьбой, имеют меньшую прочность по сравнению с основным материалом.


а

б

Рис. 4. Образцы для испытаний на растяжение:

а – перед испытанием; *б* – после испытания

Fig. 4. Tensile test specimens:

а – before tensile test; *б* – after tensile test

Таблица 4

Table 4

Результаты испытания на растяжение основного материала
Tensile test results of base material

Пиковая нагрузка, кН	Временное сопротивление разрыву при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, мм
15,060	167	21,01



Рис. 5. Разрушенные образцы после испытания на растяжение соединений, полученных с использованием инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой

Fig. 5. Fractured specimens after tensile test of joints fabricated using threaded cylindrical pin

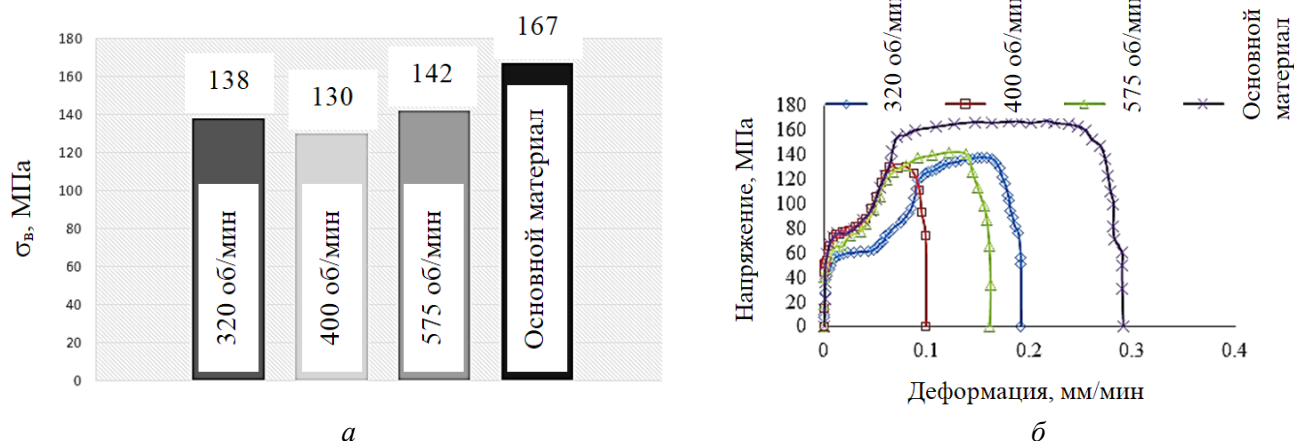


Рис. 6. Результаты испытания на растяжение сварных соединений, полученных с использованием инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой:

a – гистограмма временного сопротивления разрыву при растяжении; *б* – кривая зависимости деформации от напряжений

Fig. 6. Tensile test result of weld fabricated by cylindrical threaded pin profile:

a – bar chart of UTS; *б* – stress-strain diagram

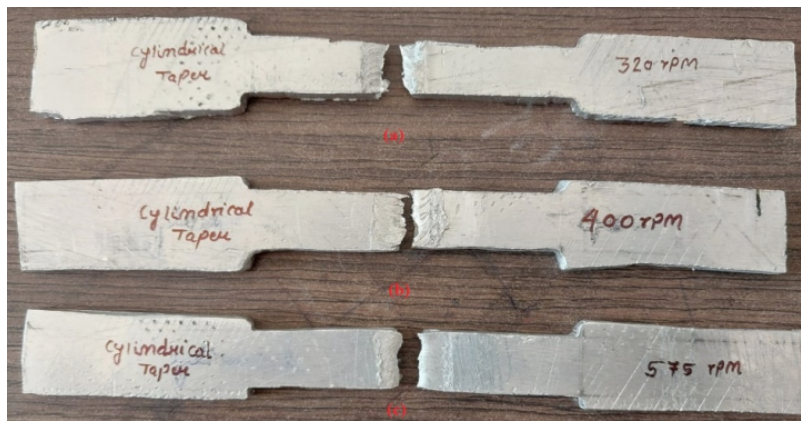


Рис. 7. Разрушенные образцы после испытания на растяжение соединений, полученных с использованием инструмента с наконечником в форме усеченного конуса

Fig. 7. Fractured specimens after tensile test of joints fabricated using taper cylindrical pin

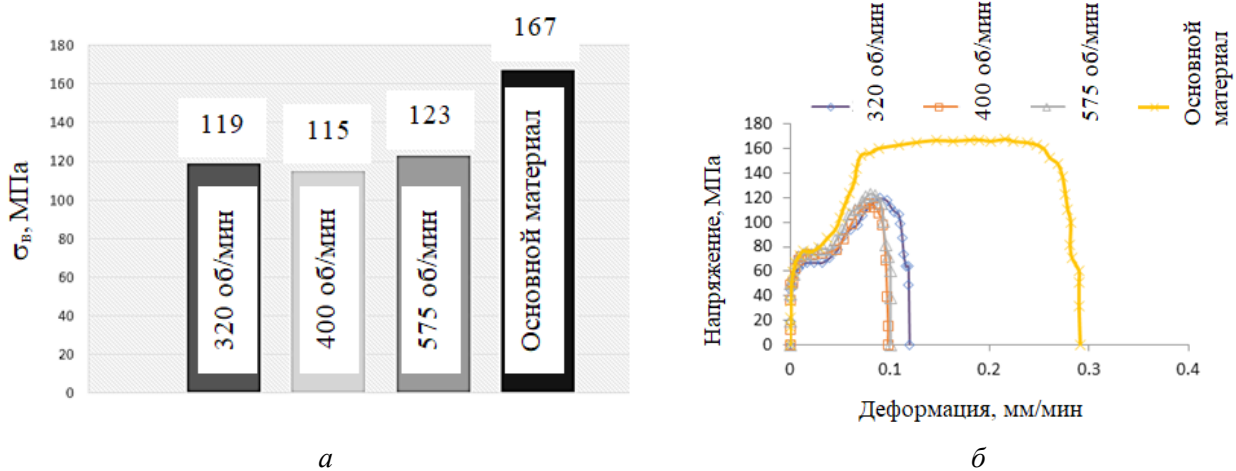


Рис. 8. Результаты испытания на растяжение сварных соединений, полученных с использованием инструмента с наконечником в форме усеченного конуса:

a – гистограмма временного сопротивления разрыву при растяжении; *б* – кривая зависимости деформации от напряжений

Fig. 8. Tensile test results of welds fabricated by cylindrical taper pin profile:

a – bar chart of UTS; *б* – stress-strain diagram

На основании представленных результатов становится очевидным, что с увеличением частоты вращения инструмента повышается прочность сварного соединения и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла независимо от геометрии наконечника инструмента. Для инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой прочность сварного соединения и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла максимальны при 575 об/мин и 60 мм/мин и оставляют 142 МПа и 84,5 %

(табл. 5). Более низкие значения частоты вращения (320 об/мин и 45 мм/мин) приводят к несколько более низким значениям прочности сварного соединения и отношения прочности сварного соединения к прочности основного металла (138 МПа и 82,6 %). Промежуточные значения скорости вращения – 400 об/мин и 50 мм/мин – также дают немного меньшие значения прочности сварного соединения и отношения прочности сварного соединения к прочности основного металла: 130 МПа и 77,84 %.

Таблица 5

Table 5

Результаты испытаний на растяжение соединений, полученных с использованием инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой
Tensile test results of joints fabricated with cylindrical threaded pin profile tool

Характеристика	320 об/мин, 40 мм/мин	400 об/мин, 45 мм/мин	575 об/мин, 60 мм/мин
Предел прочности, МПа	138	130	142
Отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла, %	82,6	77,8	85

Для инструмента с наконечником в форме усеченного конуса прочность сварного соединения и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла являются максимальными при 575 об/мин и 60 мм/мин и составляют 123 МПа и 73,6 % (табл. 6). Более низкие значения частоты вращения (320 об/мин и 45 мм/мин) приводят к снижению значений прочности сварного соединения и отношения прочности сварного соединения к прочности основного металла (119 МПа и 71,25 %). Промежуточные значения частоты вращения (400 об/мин и 50 мм/мин) также приводят к снижению значения прочности сварного соединения и отношения прочности сварного соединения к прочности основного металла (115 МПа и 68,86 %). В целом оказывается, что 575 об/мин и 60 мм/мин являются оптимальными условиями эксплуатации для достижения максимальной прочности сварного соединения и отношения прочности сварного соединения к прочности основного металла независимо от того, используется ли

инструмент с наконечником в форме усеченного конуса или цилиндра с резьбой. При этих конкретных параметрах прочность на разрыв составляет 142 МПа для инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой и 123 МПа для инструмента с наконечником в форме усеченного конуса. Результаты показывают, что создаваемая впоследствии зона перемешивания полностью зависит от скорости вращения инструмента и скорости перемещения. Лучшее перемешивание материала наблюдалось при более высокой скорости вращения инструмента. На форму зоны перемешивания оказывает влияние форма наконечника: более широкая зона перемешивания наблюдалась при использовании инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой.

Заключение

Исследования показывают, что заготовки из алюминиевого сплава АА8011 можно соединять инструментом с наконечниками различной фор-

Таблица 6

Table 6

Результаты испытаний на растяжение соединений, полученных с использованием инструмента с наконечником в форме усеченного конуса
Tensile test result of joints fabricated with cylindrical taper pin profile tool

Характеристика	320 об/мин, 40 мм/мин	400 об/мин, 45 мм/мин	575 об/мин, 60 мм/мин
Предел прочности, МПа	119	115	123
Отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла, %	71,2	68,8	73,6

мы при разном сочетании скорости вращения и скорости перемещения инструмента. Бездефектное соединение, изготовленное с помощью инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой при скорости вращения 575 об/мин и скорости перемещения 60 мм/мин, характеризуется сравнительно более высокими механическими свойствами с точки зрения максимальной прочности сварного соединения и отношения прочности сварного соединения к прочности основного металла. Независимо от типа наконечника инструмента механические свойства и отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла снижались при более низкой скорости вращения. Однако это может быть связано с какими-то дефектами. Повышение прочности на разрыв и отношения прочности сварного соединения к прочности основного металла было достигнуто при использовании инструмента с наконечником в форме цилиндра с резьбой, что может быть связано с образованием мелких зерен в зоне перемешивания.

Список литературы

1. Friction stir butt welding: International patent application No. 9125978.8, PCT/GB92/02203 and GB patent application: 1991 / W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes.
2. Dawes C., Thomas W. Friction stir joining of aluminum alloys // *TWI Bulletin*. – 1995. – Vol. 6. – P. 124–127.
3. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium / C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton // *Scripta Materialia*. – 1997. – Vol. 36 (1). – P. 69–75.
4. Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum / G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega // *Scripta Materialia*. – 1997. – Vol. 37 (3). – P. 355–361.
5. Jata K.V., Semiatin S.L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys // *Scripta Materialia*. – 2000. – Vol. 43 (8). – P. 743–749.
6. Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum / S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown, J.C. McClure // *Scripta Materialia*. – 1999. – Vol. 41 (8). – P. 809–815.
7. Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding / D.K. Rajak, D.D. Pagar, P.L. Menezes, A. Eyvazian // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2020. – Vol. 34 (24). – P. 2613–2637. – DOI: 10.1080/01694243.2020.1780716.
8. On the FSW of AA2024-T4 and AA7075-T6 T-joints: an industrial case study / F. Acerra, G. Buffa, L. Fratini, G. Troiano // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 48. – P. 1149–1157. – DOI: 10.1007/s00170-009-2344-9.
9. Cavaliere P., Cerri E., Squillace A. Mechanical response of 2024–7075 aluminium alloys joined by Friction Stir Welding // *Journal of Materials Science*. – 2005. – Vol. 40. – P. 3669–3676. – DOI: 10.1007/s10853-005-0474-5.
10. Rajpoot Y.S., Narayanan R.G., Das S. Predicting the effect of tool configuration during friction stir welding by cellular automata finite element analyses // *International Journal of Manufacturing Research*. – 2018. – Vol. 13 (4). – P. 359–381. – DOI: 10.1504/IJMR.2018.095377.
11. Influence of probe offset distance on interfacial microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded joint of Ti6Al4V and A6061 dissimilar alloys / Z. Song, K. Nakata, A. Wu, J. Liao, L. Zhou // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 57. – P. 269–278. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.040.
12. Effect of tool eccentricity on the properties of friction stir welded AA6061 aluminum alloys / L.H. Shah, S. Guo, S. Walbridge, A. Gerlich // *Manufacturing Letters*. – 2018. – Vol. 15, pt. A. – P. 14–17. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.019.
13. Hussain A.K., Quadri S.A.P. Evaluation of parameters of friction stir welding for aluminium AA6351 alloy // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2 (10). – P. 5977–5984.
14. Rajpoot Y.S., Saxena K., Deepak D. A review on the influence of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints // *Advances in Manufacturing Engineering: Select Proceedings of ICFAMMT 2022*. – Singapore: Springer, 2022. – P. 119–149. – DOI: 10.1007/978-981-19-4208-2_10.
15. Cam G., Mistikoglu S. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2014. – Vol. 23. – P. 1936–1953. – DOI: 10.1007/s11665-014-0968-x.
16. Mikhail J., Ibrahim R., Lathabai S. Effect of tool design on the microstructure and microhardness of friction stir processed 5005-H34 aluminium alloy // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8793: Fourth International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering. – P. 334–340. – DOI: 10.1117/12.2026587.
17. Venkata Rao Ch., Madhusudhan Reddy G., Srinivasa Rao K. Influence of tool pin profile on microstructure and corrosion behaviour of AA2219 Al–Cu alloy friction stir weld nuggets // *Defence Technology*. – 2015. – Vol. 11 (3). – P. 197–208. – DOI: 10.1016/j.dt.2015.04.004.



18. Formability of similar and dissimilar friction stir welded AA 5182-H111 and AA 6016-T4 tailored blanks / C. Leita, B. Emilio, B.M. Chaparro, D.M. Rodrigues // *Materials & Design*. – 2009. – Vol. 30 (8). – P. 3235–3242. – DOI: 10.1016/j.matdes.2008.12.005.

19. Weld temperature effects during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 6061-t6 and 7075-t6 / E.G. Cole, A. Fehrenbacher, N.A. Duffie, M.R. Zinn, F.E. Pfefferkorn, N.J. Ferrier // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 71. – P. 643–652. – DOI: 10.1007/s00170-013-5485-9.

20. Sharma N., Khan Z.A., Siddiquee A.N. Friction stir welding of aluminum to copper – an overview // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2017. – Vol. 27 (10). – P. 2113–2136. – DOI: 10.1016/S1003-6326(17)60238-3.

21. Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6 / P.M.G.P. Moreira, T. Santos, S.M.O. Tavares, V. Richter-Trummer, P. Vilaça, P.M.S.T. de Castro // *Materials & Design*. – 2009. – Vol. 30 (1). – P. 180–187. – DOI: 10.1016/j.matdes.2008.04.042.

22. Effect of pin length and welding speed on lap joint quality of friction stir welded dissimilar aluminum alloys / Z. Ge, S. Gao, S. Ji, D. Yan // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 98. – P. 1461–1469. – DOI: 10.1007/s00170-018-2329-7.

23. Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties / G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, A. Prisco // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 519 (1–2). – P. 19–26. – DOI: 10.1016/j.msea.2009.04.046.

24. Davidson B.S., Neelakrishnan S. Influence of friction stir welding parameters on tensile properties of AA8011 aluminium alloy plate // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. – 2018. – Vol. 15 (1). – P. 93–98. – DOI: 10.1166/jctn.2018.7060.

25. Effect of pin profile and rotational speed on microstructure and tensile strength of dissimilar

AA8011, AA01-T6 friction stir welded aluminum alloys / K. Palani, C. Elanchezian, B. Vijaya Ramnath, G.B. Bhaskar, E. Naveen // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5 (11). – P. 24515–24524. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.248.

26. Elangovan K., Balasubramanian V. Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 459 (1–2). – P. 7–18. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.124.

27. Elangovan K., Balasubramanian V. Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 200 (1–3). – P. 163–175. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.019.

28. Elangovan K., Balasubramanian V. Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy // *Materials & Design*. – 2008. – Vol. 29 (2). – P. 362–373. – DOI: 10.1016/j.matdes.2007.01.030.

29. Chandana R, Saraswathamma K. Impact of tool pin profiles in friction stir welding process – A review // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 76, pt. 3. – P. 602–606. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.097.

30. Investigation on effects of variation of tool pin profile in a friction stir welding process by finite element approach for joining dissimilar materials / R. Shimpi, C.S. Kumar, R. Katarane, A.K. Shukla // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 66, pt. 3. – P. 1361–1364. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.154.

31. Effect of tool tilt angle on mechanical resistance of AA6082/AA5083 friction stir welded joints for marine applications / G. Di Bella, T. Alderucci, F. Favaloro, C. Borsellino // *Procedia CIRP*. – 2023. – Vol. 118. – P. 879–884. – DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.151.

32. Effect of tool pin shapes on microstructure and mechanical behaviour of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys / S. Balamurugan, K. Jayakumar, B. Anbarasan, M. Rajesh // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 72, pt. 4. – P. 2181–2185. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.459.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 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



Effect of tool pin profile on the tensile characteristics of friction stir welded joints of AA8011

Yogendra Rajpoot^{1, a, *}, Avadesh Sharma^{1, b}, Vibhooti Mishra^{2, c}, Kushal Saxena^{1, d},
Desh Deepak^{1, e}, Shyam Sharma^{3, f}

¹ Department of Mechanical Engineering, Rajkiya Engineering College Mainpuri, Uttar Pradesh, 205119, India

² Department of Mechanical Engineering, Rajkiya Engineering College Azamgarh, Uttar Pradesh, 276201, India

³ Department of Mechanical Engineering, Manipal University Jaipur, Rajasthan, 303007, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-9662-0903>, yogendrasingh.rajpoot@recmainpuri.in; ^b <https://orcid.org/0000-0002-2795-6497>, aksharma@recmainpuri.in;

^c <https://orcid.org/0000-0002-5039-3573>, vibhooti1810@gmail.com; ^d <https://orcid.org/0000-0001-6982-3636>, saxenakushal05@gmail.com;

^e <https://orcid.org/0000-0003-2662-9571>, dd08iitd@gmail.com; ^f <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>, shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06 July 2023

Revised: 01 August 2023

Accepted: 15 August 2023

Available online: 15 December 2023

Keywords:

FSW

Tool pin Profile

Tensile Strength

Acknowledgements

Express our gratitude to our undergraduate and graduate students Mohd Lareb, Mr. Chandrashekhar and Mr. Ankit Arya for assistance in conducting the experiments.

ABSTRACT

Introduction. Aluminum alloys are in abundant demand of shipbuilding and aircraft industries. This study emphasizes on the effects of two different tool pin profiles on the tensile characteristics of welded joints made of AA8011 aluminum alloy welded joints. The joining technique used is friction stir welding (FSW) due to its unique characteristics such as very low heat affected zone when joining in a solid state. The microstructure and mechanical properties of the welded joint are influenced by the geometry of the tool and such parameters as rotational speed and traverse speed of the tool. **The methods of investigation.** The experiments on FSW were performed on universal milling machine with taper cylindrical and cylindrical threaded tool pin profiles using the three different combination of tool rotational and traverse speed (a) 320 rpm, 45 mm/min; b) 400 rpm, 50 mm/min; c) 575 rpm, 60 mm/min. To analyze the joint characteristics, tensile tests were conducted and ultimate tensile strength as well as joint efficiency was calculated for individual joint. **Results and Discussion.** Based on the revised results, it is evident that higher RPM values have a positive impact on joint efficiency and tensile strength for both the taper cylindrical pin profile and the threaded cylindrical pin profile. The findings show that the joint efficiency and tensile strength are consistently higher for the threaded cylindrical pin profile compared to the taper cylindrical pin profile, regardless of the RPM and feed rate. From the results, it was found that joint efficiency and tensile strength is maximum at higher RPM irrespective of the tool pin profile i.e. 73.6 % and 123 MPa for taper cylindrical pin profile and 85 % and 142 MPa for threaded cylindrical pin profile at 575 rpm, 60 mm/min. These are the highest in comparison to 72.5 % and 119 MPa at 320 rpm, 45 mm/min and 70.1 % and 115 MPa at 400 rpm, 50 mm/min for taper pin profile tool and 82.6 % and 138 MPa at 320 rpm, 45 mm/min and 77.8 % and 130 MPa at 400 rpm, 50 mm/min for threaded cylindrical pin profile. Overall, the study demonstrates that joints obtained using the threaded cylindrical pin profile demonstrate higher joint efficiency and tensile strength than those prepared using the taper cylindrical pin profile. The highest joint efficiency and tensile strength of 84.5 % and 142 MPa, respectively, were achieved using the threaded cylindrical pin profile at 575 rpm and 60 mm/min.

For citation: Rajpoot Y.S., Sharma A.K., Mishra V.N., Saxena K., Deepak D., Sharma S.S. Effect of tool pin profile on the tensile characteristics of friction stir welded joints of AA8011. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 105–116. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-105-116. (In Russian).

References

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. *Friction Stir Butt Welding*. Patent GB, no. 9125978.8, 1991.
2. Dawes C., Thomas W. Friction stir joining of aluminum alloys. *TWI Bulletin*, 1995, vol. 6, pp. 124–127.
3. Rhodes C.G., Mahoney M.W., Bingel W.H., Spurling R.A., Bampton C.C. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium. *Scripta Materialia*, 1997, vol. 36 (1), pp. 69–75.

* Corresponding author

Rajpoot Yogendra Singh, M.Tech (Engineering), Assistant Professor
 Department of Mechanical Engineering,
 Rajkiya Engineering College Mainpuri,
 205119, Uttar Pradesh, India.
 Tel.: +917014210761, e-mail: yogendrasingh.rajpoot@recmainpuri.in

4. Liu G., Murr L.E., Niou C.S., McClure J.C., Vega F.R. Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum. *Scripta Materialia*, 1997, vol. 37 (3), pp. 355–361.
5. Jata K.V., Semiatin S.L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. *Scripta Materialia*, 2000, vol. 43 (8), pp. 743–749.
6. Benavides S., Li Y., Murr L.E., Brown D., McClure J.C. Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum. *Scripta Materialia*, 1999, vol. 41 (8), pp. 809–815.
7. Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P.L., Eyvazian A. Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, vol. 34 (24), pp. 2613–2637. DOI: 10.1080/01694243.2020.1780716.
8. Acerra F., Buffa G., Fratini L., Troiano G. On the FSW of AA2024-T4 and AA7075-T6 T-joints: an industrial case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 48, pp. 1149–1157. DOI: 10.1007/s00170-009-2344-9.
9. Cavaliere P., Cerri E., Squillace A. Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by friction stir welding. *Journal of Materials Science*, 2005, vol. 40, pp. 3669–3676. DOI: 10.1007/s10853-005-0474-5.
10. Rajpoot Y.S., Narayanan R.G., Das S. Predicting the effect of tool configuration during friction stir welding by cellular automata finite element analyses. *International Journal of Manufacturing Research*, 2018, vol. 13 (4), pp. 359–381. DOI: 10.1504/IJMR.2018.095377.
11. Song Z., Nakata K., Wu A., Liao J., Zhou L. Influence of probe offset distance on interfacial microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded joint of Ti6Al4V and A6061 dissimilar alloys. *Materials & Design*, 2014, vol. 57, pp. 269–278. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.040.
12. Shah L.H., Guo S., Walbridge S., Gerlich A. Effect of tool eccentricity on the properties of friction stir welded AA6061 aluminium alloys. *Manufacturing Letters*, 2018, vol. 15, pt. A, pp. 14–17. DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.019.
13. Hussain A.K., Quadri S.A.P. Evaluation of parameters of friction stir welding for aluminium AA6351 alloy. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2 (10), pp. 5977–5984.
14. Rajpoot Y.S., Saxena K., Deepak D. A review on the influence of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints. *Advances in Manufacturing Engineering: Select Proceedings of ICFAMMT 2022*. Singapore, Springer, 2022, pp. 119–149. DOI: 10.1007/978-981-19-4208-2_10.
15. Cam G., Mistikoglu S. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, pp. 1936–1953. DOI: 10.1007/s11665-014-0968-x.
16. Mikhail J., Ibrahim R., Lathabai S. Effect of tool design on the microstructure and microhardness of friction stir processed 5005-H34 aluminium alloy. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8793, pp. 334–340. DOI: 10.1117/12.2026587.
17. Venkata Rao Ch., Madhusudhan Reddy G., Srinivasa Rao K. Influence of tool pin profile on microstructure and corrosion behaviour of AA2219 Al–Cu alloy friction stir weld nuggets. *Defence Technology*, 2015, vol. 11 (3), pp. 197–208. DOI: 10.1016/j.dt.2015.04.004.
18. Leitao C., Emilio B., Chaparro B.M., Rodrigues D.M. Formability of similar and dissimilar friction stir welded AA 5182-H111 and AA 6016-T4 tailored blanks. *Materials & Design*, 2009, vol. 30 (8), pp. 3235–3242. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.12.005.
19. Cole E.G., Fehrenbacher A., Duffie N.A., Zinn M.R., Pfefferkorn F.E., Ferrier N.J. Weld temperature effects during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 6061-t6 and 7075-t6. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 71, pp. 643–652. DOI: 10.1007/s00170-013-5485-9.
20. Sharma N., Khan Z.A., Siddiquee A.N. Friction stir welding of aluminum to copper – an overview. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, vol. 27 (10), pp. 2113–2136. DOI: 10.1016/S1003-6326(17)60238-3.
21. Moreira P.M.G.P., Santos T., Tavares S.M.O., Richter-Trummer V., Vilaça P., de Castro P.M.S.T. Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6. *Materials & Design*, 2009, vol. 30 (1), pp. 180–187. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.04.042.
22. Ge Z., Gao S., Ji S., Yan D. Effect of pin length and welding speed on lap joint quality of friction stir welded dissimilar aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 98, pp. 1461–1469. DOI: 10.1007/s00170-018-2329-7.
23. Buffa G., Campanile G., Fratini L., Prisco A. Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, vol. 519 (1–2), pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.msea.2009.04.046.
24. Davidson B.S., Neelakrishnan S. Influence of friction stir welding parameters on tensile properties of AA8011 aluminium alloy plate. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2018, vol. 15 (1), pp. 93–98. DOI: 10.1166/jctn.2018.7060.

25. Palani K., Elanchezhian C., Vijaya Ramnath B., Bhaskar G.B., Naveen E. Effect of pin profile and rotational speed on microstructure and tensile strength of dissimilar AA8011, AA01-T6 friction stir welded aluminum alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (11), pp. 24515–24524. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.248.
26. Elangovan K., Balasubramanian V. Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 459 (1–2), pp. 7–18. DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.124.
27. Elangovan K., Balasubramanian V. Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 200 (1–3), pp. 163–175. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.019.
28. Elangovan K., Balasubramanian V. Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, 2008, vol. 29 (2), pp. 362–373. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.01.030.
29. Chandana R., Saraswathamma K. Impact of tool pin profiles in friction stir welding process – A review. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 76, pt. 3, pp. 602–606. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.097.
30. Shimpi R., Kumar C.S., Katarane R., Shukla A.K. Investigation on effects of variation of tool pin profile in a Friction stir welding process by finite element approach for joining dissimilar materials. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 66, pt. 3, pp. 1361–1364. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.154.
31. Di Bella C., Alderucci T., Favalaro F., Borsellino C. Effect of tool tilt angle on mechanical resistance of AA6082/AA5083 friction stir welded joints for marine applications. *Procedia CIRP*, 2023, vol. 118, pp. 879–884. DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.151.
32. Balamurugan S., Jayakumar K., Anbarasan B., Rajesh M. Effect of tool pin shapes on microstructure and mechanical behaviour of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 72, pt. 4, pp. 2181–2185. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.459.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 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>).