

Анализ микроструктуры и свойств разнородных СТП-соединений термоупрочняемых алюминиевых сплавов

Зуйко И. С. , Малофеев С. С. , Михайлов М. Г. , Калининко А. А. 
(Статья представлена членом редакционной коллегии А. Н. Беляковым)

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
zuiko_ivan@bsu.edu.ru

Аннотация. Рассматривается дифрагированное переходное излучение (ДПИ), возбуждаемое пучком ультрарелятивистских электронов, проходящих через тонкую монокристаллическую пластину в геометрии рассеяния Лауэ. Получено выражение, описывающее угловую плотность ДПИ для случая, когда путь электронов в мишени значительно меньше, чем длина экстинкции рентгеновских фотонов в кристалле. Проведенные численные расчеты выхода фотонов ДПИ в направлении рассеяния Брэгга для различных значений телесного угла регистрации показывают значительное влияние расходимости электронного пучка на выход фотонов. Делается заключение о возможности использования выхода ДПИ, имитированного в заданный телесный угол, для индикации расходимости электронного пучка. Результаты расчетов показывают, что предлагаемая в настоящей работе формула может быть базой для развития метода измерения расходимости пучка релятивистских электронов ультравысокой энергии на основе углового распределения ДПИ.

Ключевые слова: релятивистские электроны, дифрагированное переходное излучение, индикация расходимости электронного пучка

Благодарности: Работа выполнена при поддержке внутривузовского гранта НИУ «БелГУ» «Молодые лидеры в науке» в рамках проекта «Наука XXI века» программы Приоритет-2030.

Для цитирования: Зуйко И. С., Малофеев С. С., Михайлов М. Г., Калининко А. А. 2024. Анализ микроструктуры и свойств разнородных СТП-соединений термоупрочняемых алюминиевых сплавов. *Прикладная математика & Физика*, 56(2): 146–152. DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-2-146-152

Original Research

Analysis of the Microstructure and Properties of Dissimilar FSW Joints of Heat-treatable Aluminium Alloys

Ivan S. Zuiko , Sergej S. Malopheyev , Mikhail G. Mikhaylov , Alexandr A. Kalinenko 
(Article submitted by a member of the editorial board A. N. Belyakov)

Belgorod National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia
zuiko_ivan@bsu.edu.ru

Abstract. The diffracted transition radiation (DTR) produced by a beam of relativistic electrons traversing a thin single-crystal plate in the Laue scattering geometry is considered. We have obtained the expression describing the angular density of the DTR for the case when the path length of the electron in the target is far less than the extinction length of X-rays in the crystal. It is shown that in this case the considered DTR process has the explicit kinematic character. The numerical calculations of the yield of DTR photons in the direction of Bragg scattering performed for various values of the registration solid angle show a significant influence of the electron beam divergence on the photon yield. We have arrived at a conclusion that the measured photon output of DTR radiation emitted in a given solid angle can be used for indication of the electron beam divergence. The model calculations of the electron beam divergence parameters on the base of “measured” yield of DTR photons traversing through a slit collimator are carried out. The results of the calculation show that the proposed in this work formula can be successfully used as a base for the development of methods for measuring the divergence of beams of relativistic ultrahigh-energy electrons based on DTR angular distribution.

Keywords: Relativistic Electrons, Diffracted Transition Radiation, Indication of Electron Beam Divergence

Acknowledgements: This work was supported by intra-university “BelSU” grant “Young leaders in science” as part of the project “Science of the 21st century” of the program “Priority-2030”.

For citation: Zuiko I. S., Malopheyev S. S., Mikhaylov M. G., Kalinenko A. A. 2024. Analysis of the Microstructure and Properties of Dissimilar FSW Joints of Heat-treatable Aluminium Alloys. *Applied Mathematics & Physics*, 56(2): 146–152. (in Russian) DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-2-146-152

1. Введение. Алюминиевые термически упрочняемые сплавы обладают низкой плотностью при высокой и средней прочности (жесткости), хорошей коррозионной стойкостью. Всё это позволяет использовать их как материалы в транспортной (в частности, авиационной) промышленности. При этом зачастую возникает необходимость создавать неразъемные конструкции из материалов различных систем легирования. Однако их низкая свариваемость традиционными методами (аргонно-дуговым или электронно-лучевым) вызывает ограничения. Поэтому относительно новый метод – сварка трением с перемешиванием (СТП) рассматривается как перспективный [1]–[4].

Избежать деградации механических свойств при СТП удаётся за счёт особенностей самого метода – материал остаётся в твёрдом виде, то есть не переводится в расплав. При этом свариваемые материалы подвергаются большим пластическим деформациям при повышенных (порядка 250-400°C в зависимости от режима) температурах и относительно высоких скоростях [5].

Принимая во внимание важное практическое значение СТП, неудивительно, что всё больше учёных исследуют формирование микроструктуры при разнородном соединении. Например, пар из сплавов Al-Cu-Mg и Al-Mg-Si [6]–[13]. В этих работах были сделаны следующие важные заключения:

1. Несмотря на все условия, сплавы различных серий не перемешиваются на 100 %, даже в зоне перемешивания. Между материалами формируется чёткая граница.
2. Ограниченная диффузия атомов наблюдается на границе.
3. Повышение температуры (путем повышения скорости вращения и снижения скорости подачи) или количество проходов может улучшить смешивание материалов.

Необходимо отметить, что бездефектная микроструктура разнородных термически упрочняемых алюминиевых сплавов возможна только в относительно узком диапазоне обработки, которое как правило лежит в диапазоне высоких тепловложений [8]–[11]. В частности, качественные сварные швы обычно получаются при скорости вращения инструмента ≥ 1000 об/мин и скорости перемещения инструмента ≤ 150 мм/мин [14]–[15]. Учитывая сложнейший характер пластического течения материалов при разнородном СТП, особое значение имеет конструкция сварочного инструмента. Считается, что увеличение контактной площади поверхности пина инструмента должно увеличивать объем захватываемого материала за один оборот инструмента и, таким образом, способствовать лучшему перемешиванию материала. Именно этот принцип лежит в основе пина в форме Трифлют [1, 2]. Таким образом, оптимизация дизайна сварочного инструмента представляет собой комплексную научно-практическую задачу, требующую внимания. В этом контексте перспективной идеей выглядит применение технологии аддитивного производства для изготовления СТП-инструментов. Учитывая практически неограниченную свободу в форме инструмента, которая обычно свойственна аддитивному производству, эта технология позволяет изготавливать инструмент любой геометрии. Таким образом, целью данной работы было оптимизировать СТП-соединение разнородных алюминиевых сплавов за счёт применения современной технологии 3D-печати.

2. Материалы и методика эксперимента. В качестве материалов использовали сплав AA2519 (Al-5,64 Cu-0,33 Mn-0,23 Mg-0,15 Zr-0,11 Ti-0,09 V-0,08 Fe-0,08 Zn-0,04 Sn-0,01 Si, весовых %) и AA6061 (Al-0,88 Mg-0,66 Si-0,72 Fe-0,26 Cu-0,12 Mn-0,12 Cr-0,09 Zn, весовых %). Оба сплава были получены методом полунепрерывного литья в НИУ «БелГУ». Сплав AA6061 гомогенизировали при 380°C – 1 час, а затем подвергали экструзии при этой же температуре с обжатием по сечению 75 %.

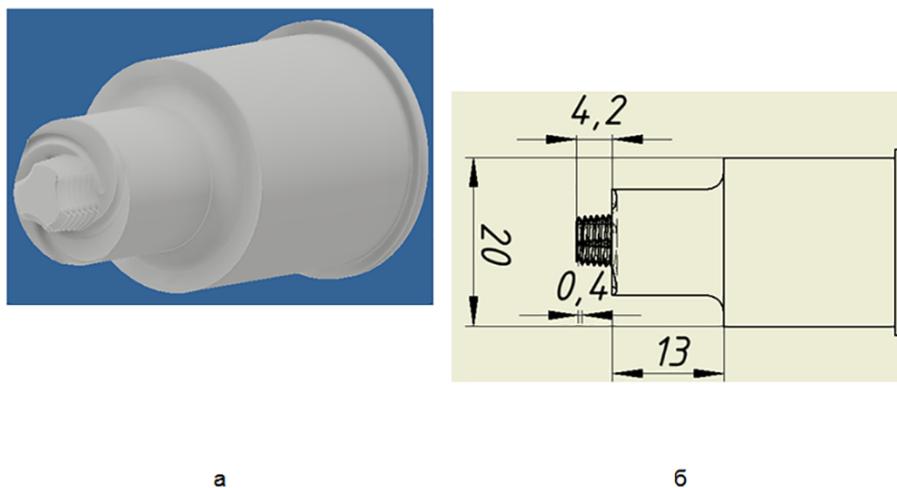


Рис. 1. Трёхмерная модель и принципиальные размеры 3D-инструмента, использованного в работе: а – модель, б – принципиальные размеры
 Fig. 1. Sample Three-dimensional model and principal dimensions of the AM-tool used in the work: a – model, b – principal dimensions size

Сплав AA2519 гомогенизировали при 510° в течении 24 часов и охлаждении с печью, затем ковали и прокатывали в горячую ($T=425^\circ$) до истинной степени деформации 2.0 и 1.4, соответственно. Далее из экструдированных заготовок и плит вырезали пластины толщиной 3 мм, которые закаливали с 525°С в холодную воду.

Листы алюминиевых сплавов были сварены встык вдоль направления прокатки/экструзии на СТП-машине фирмы AccurStir 1004. Для этого использовали два различных инструмента. Первый – стандартный [16], а второй – сложной геометрии, напечатанный на 3D-принтере из порошка мартенситной стали 17-4PH, т. е. произведен по аддитивной технологии спекания порошка лазером [17]–[18]. Модель и чертёж инструмента представлен на Рисунке 1. Конструкция имела плоские плечики с канавками в форме спирали Архимеда, а пин в форме Трифлют. Для сравнения эффективности сварных инструментов принципиальные размеры были сохранены.

Листы двух сплавов были сварены встык вдоль направления прокатки на СТП-машине AccurStir 1004. После тщательного анализа литературы скорость вращения была выбрана максимально доступной для использованной установки СТП – 1100 об/мин. С другой стороны, для снижения тепловыделения и для исследования возможных преимуществ 3D-инструмента, скорость подачи была 380 мм/мин. Угол наклона инструмента относительно нормали к поверхности свариваемых пластин составлял 2,5°. Этот режим не входит в рекомендуемый диапазон сварки сплавов AA6061 и AA2519. Термический цикл СТП измерялся посредством термопар К-типа (хромель-алюмель).

Для исследования микроструктуры, перпендикулярно направлению сварки были вырезаны образцы, содержащие все зоны, которые появляются в результате СТП. Далее образцы были отшлифованы, а затем отполированы в течении 24 часов на виброполировальной машине с применением коллоидной суспензии OP-S с размером частиц 0,04 мкм. Вытравливание границ зёрен в подготовленных сварных соединениях осуществляли реактивом Келлера (0,5HF-1,8HCl-2,7HNO₃-95H₂O (в об. %)). Анализ микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-71. Со всеми остальными деталями эксперимента можно ознакомиться в работах [19]–[21].

3. Результаты и их обсуждение. На Рисунке 2 представлены фотографии полученных сварных соединений после применения обычного и аддитивного инструмента.



Рис. 2. Внешний вид полученных сварных соединений: а – стандартным инструментом, б – аддитивным
Fig. 2. Typical appearance of dissimilar welds (top view) produced using: a – ordinary tool and b – AM tool size

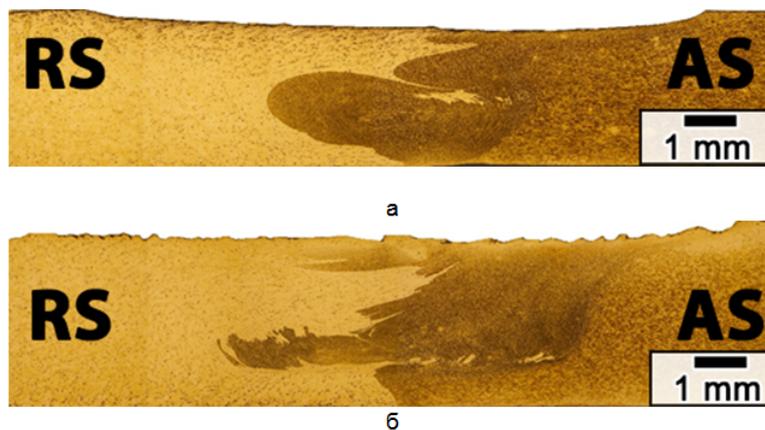


Рис. 3. Микроструктура сварных швов в поперечном направлении: а - полученных стандартным инструментом, б – аддитивным. RS и AS – сторона отвода и сторона набегания, соответственно

Fig. 3. Three-dimensional model and principal dimensions of the 3D-tool used in the work: a – model, b – principal dimensions. RS and AS are retreating side and advancing side, respectively

Тщательный визуальный осмотр не выявил объемных дефектов в обоих случаях. Однако сварные швы, выполненные 3D-инструментом, имели более шероховатую поверхность. Вероятно, это связано с

более развитой поверхностью плечиков, которая не была идеальной для эффективного и плавного отвода материала.

Металлографические снимки сечений сварных швов, полученных традиционным и аддитивным инструментом, представлены на Рисунке 3. Как и ожидалось, использование обычного инструмента приводит к заметному снижению толщины шва. Этот эффект СТП-соединений хорошо известен [7, 9] и обычно связывается с выбросом части свариваемого материала из зоны перемешивания. При этом, как видно из Рисунка 3, аддитивный инструмент позволил существенно уменьшить этот дефект. Так же было отмечено, что свариваемые материалы не были равномерно перемешаны в зоне перемешивания, поскольку между ними видна чёткая граница раздела. Этот факт согласуется с уже ранее проведёнными исследованиями в этой области [9, 15], согласно которым диффузия атомов через разнородную границу раздела затруднена.

В этом контексте важно подчеркнуть, что применение аддитивного инструмента привело к существенному усложнению профиля границы раздела (см. рис. 3а и 3б).

Этот результат, по-видимому, отражает сложный характер течения материалов и качественно согласуется с уменьшением прижимного усилия, наблюдаемого во время сварки. Таким образом, был сделан вывод, что по сравнению со стандартным, аддитивный инструмент улучшил механическое перемешивание свариваемых материалов во время СТП.

Для исследования эффективности дизайна аддитивного инструмента были измерены термические циклы сварки, которые представлены на Рисунке 4.

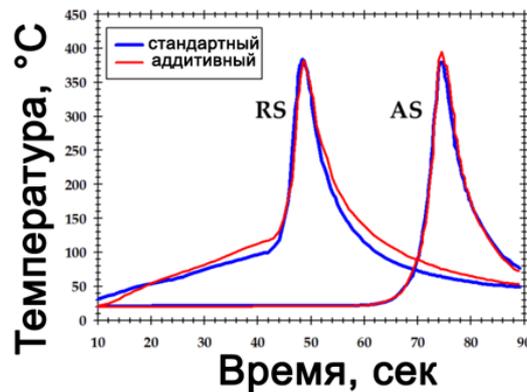


Рис. 4. Измеренный термический цикл СТП. RS и AS – сторона отвода и сторона набегания, соответственно
Fig. 4. The weld thermal cycle. RS and AS are retreating side and advancing side, respectively

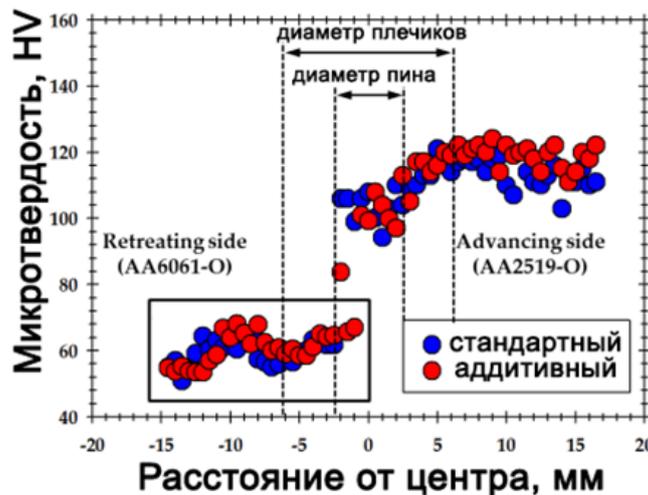


Рис. 5. Профили микротвердости, измеренные по центру шва, полученные двумя различными инструментами
Fig. 5. Typical microhardness profiles measured across mid-thickness of dissimilar welds.

К сожалению, разницы в пиковых температурах процесса и профилях зафиксировать не удалось. Это может свидетельствовать о том, что предложенный дизайн инструмента практически не оказал влияния на тепловыделение в процессе СТП. Особенно учитывая развитую поверхность (Рис. 1) использованного в работе пина. Вероятно, это означает, что тепла, генерируемого пином, было мало, а главным его источником были плечики инструмента. Интересно отметить, что замена сплавов местами (с AS на RS)

не оказывает существенного влияния на максимально достигаемую температуру, но существенно влияет на скорость нагрева. Механизм этого остаётся непонятным.

Для оценки изменения механических свойств разнородных сварных швов по центру толщины измеряли профили микротвёрдости. Полученные результаты показаны на Рисунке 5. Для наглядности на рисунке также указаны основные размеры инструмента.

Отчётливого эффекта от применяемого сварочного инструмента на профили микротвёрдости не обнаружено. Этот факт можно связать со сходством формирующейся микроструктуры (Рис. 3). Так же это подтверждается и практически идентичными термическими циклами (Рис. 4). Во всех случаях обнаруживается резкое изменение микротвёрдости вблизи центра зоны перемешивания, при переходе от более мягкого AA6061 к более твёрдому AA2519. К сожалению, это означает, что свариваемые материалы практически не перемешивались друг с другом в процессе СТП.

В дальнейшем для устранения выявленного недостатка планируется разработать более сложный дизайн инструмента, изменить режим сварки, применить искусственное охлаждение и, возможно, прибегнуть к подкладкам из меди или стали.

4. Заключение. Эта работа была предпринята для оценки возможности создания аддитивно изготовленного СТП-инструмента для соединения разнородных сплавов AA2519 и AA6061. Инструмент был изготовлен из мартенситной стали 17-4 PH с использованием метода селективного лазерного плавления. Конструкция включала в себя плечики в виде спирали Архимеда и пин в форме Трифлют.

Основные выводы по работе могут быть следующие:

1. Применение аддитивного инструмента устранило уменьшение толщины сварного шва.
2. Применение пина с развитой поверхностью улучшило механическое перемешивание, однако эффекта на свойства зарегистрировать не удалось.
3. Термический цикл во время СТП определяется в большей степени дизайном плечиков, а не пина.
4. Для создания высокоэффективных сварных конструкций из разнородных термоупрочняемых алюминиевых сплавов необходимы дальнейшие экспериментальные работы по дизайну СТП-инструментов.

Список литературы

1. Threadgill PL, Leonard AJ, Shercliff HR, Withers PJ. Friction stir welding of aluminum alloys. *International Materials Reviews*. 2009;54:49–93.
2. Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2005;50(1-2):1–78.
3. Meng X, Huang Y, Cao J, Shen J, dos Santos JF. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. *Progress in Materials Science*. 2021;115:100706.
4. Heidarzadeh A, Mironov S, Kaibyshev R, Cam G, Simar A, Gerlich A, Khodabakhshi F, Mostafaei A, Field DP, Robson JD, Deschamps A, Withers PJ. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*. 2020;117:100752.
5. Mishin V, Shishov I, Kalinenko A, Vysotskii I, Zuiko I, Malopheyev S, Mironov S, Kaibyshev R. Numerical Simulation of the Thermo-Mechanical Behavior of 6061 Aluminum Alloy during Friction-Stir Welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022;6:68.
6. Cavaliere P, Nobile R, Panella FW, Squillace A. Mechanical and Microstructural Behavior of 2024-7075 Aluminium Alloy Sheets Joined by Friction Stir Welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006; 46:588-594
7. Li Y, Murr LE, McClure JC. Solid State Flow Visualization in the Friction Stir Welding of 2024 Al to 6061 Al. *Scripta Materialia*. 1999;40:1041-1046.
8. Scialpi A, Giorgi M, Filippis LAC, Nobile R, Panella FW. Mechanical Analysis of Ultra-Thin Friction Stir Welding Joined Sheets with Dissimilar and Similar Materials. *Materials & Design*, 2008. 29:928-936.
9. Moradi MM, Aval HJ, Jamaati R, Amirkhanlou S, Ji S. Microstructure and Texture Evolution of Friction Stir Welded Dissimilar Aluminum Alloys: AA2024 and AA6061, *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;32:1-10
10. Jonckheere V, Meestr B, Denquin A, Simar A. Torque, Temperature and Hardening Precipitation Evolution in Dissimilar Friction Stir Welds between 6061-T6 and 2014-T6 Aluminum Alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013;213:826-837.
11. Moradi MM, Aval HJ, Jamaati R, Amirkhanlou S, Ji S. Effect of SiC Nanoparticles on the Microstructure and Texture of Friction Stir Welded AA2024/AA6061. *Materials Characterization*. 2019;152:169-179.
12. Paidar M, Vignesh RV, Khorram A, Ojo OO, Rasoulpouraghdam A, Pustokhina I. Dissimilar Modified Friction Stir Clinching of AA2024-AA6061 Aluminum Alloys: Effects of Materials Positioning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9:6037-6047.
13. Jandaghi MR, Pouraliakbar H, Saboori A, Hong SI, Pavese M. Comparative Insight into the Interfacial Phase Evolutions during Solution Treatment of Dissimilar Friction Stir Welded AA2198-AA7475 and AA2198-AA6013 Aluminum Sheets. *Materials*. 2021;14:1290.
14. Ramamurthy M, Balasubramanian P, Senthilkumar N, Anbuhezhiyan G. Influence of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welds of AA2014 and AA6063 Aluminium Alloys using Response Surface Methodology. *Materials Research Express*. 2022;9:026528.

15. Varunraj S, Ruban M. Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of AA6063 and AA7075 Dissimilar Aluminium Alloys by Friction Stir Welding Process. *Materials Today: Proceedings*. 2022;68:1654-1657.
16. Газизов МР, Зуйко ИС, Малофеев СС. EBSD-анализ микроструктуры Al-Cu-Mg сплава, подвергнутого сварке трением с перемешиванием. *Прикладная математика & Физика*. 2022;54(4):261-265.
17. Vysotskiy I, Malopheyev S, Zuiko I, Mironov S, Kaibyshev R. Crystallographic aspects of 17–4 PH martensitic steel produced by laser-powder bed fusion. *Materials Characterization*. 2022;192:112405.
18. Vysotskiy I, Malopheyev S, Zuiko I, Mironov S, Kaibyshev R. Microstructure Distribution in 17-4 PH Martensitic Steel Produced by Selective Laser Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2022;53:4143-4147.
19. Zuiko IS, Malopheyev S, Mironov S, Betsofen S, Kaibyshev R. On the Heterogeneous Distribution of Secondary Precipitates in Friction-Stir-Welded 2519 Aluminium Alloy. *Metals*. 2022;12(4):671.
20. Zuiko IS, Mironov S, Betsofen S, Kaibyshev R. Suppression of abnormal grain growth in friction-stir welded Al–Cu–Mg alloy by lowering of welding temperature. *Scripta Materialia*. 2021;196:113765.
21. Zuiko IS, Malopheyev S, Mironov S, Kaibyshev R. Dissimilar friction stir welding of AA2519 and AA5182. *Materials*. 2022; 16(7): 8776.

References

1. Threadgill PL, Leonard AJ, Shercliff HR, Withers PJ. Friction stir welding of aluminum alloys. *International Materials Reviews*. 2009;54:49–93.
2. Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2005;50(1-2):1–78.
3. Meng X, Huang Y, Cao J, Shen J, dos Santos JF. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. *Progress in Materials Science*. 2021;115:100706.
4. Heidarzadeh A, Mironov S, Kaibyshev R, Cam G, Simar A, Gerlich A, Khodabakhshi F, Mostafaei A, Field DP, Robson JD, Deschamps A, Withers PJ. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*. 2020;117:100752.
5. Mishin V, Shishov I, Kalinenko A, Vysotskii I, Zuiko I, Malopheyev S, Mironov S, Kaibyshev R. Numerical Simulation of the Thermo-Mechanical Behavior of 6061 Aluminum Alloy during Friction-Stir Welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022;6:68.
6. Cavaliere P, Nobile R, Panella FW, Squillace A. Mechanical and Microstructural Behavior of 2024-7075 Aluminium Alloy Sheets Joined by Friction Stir Welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006; 46:588-594
7. Li Y, Murr LE, McClure JC. Solid State Flow Visualization in the Friction Stir Welding of 2024 Al to 6061 Al. *Scripta Materialia*. 1999;40:1041-1046.
8. Scialpi A, Giorgi M, Filippis LAC, Nobile R, Panella FW. Mechanical Analysis of Ultra-Thin Friction Stir Welding Joined Sheets with Dissimilar and Similar Materials. *Materials & Design*, 2008. 29:928-936.
9. Moradi MM, Aval HJ, Jamaati R, Amirkhanlou S, Ji S. Microstructure and Texture Evolution of Friction Stir Welded Dissimilar Aluminum Alloys: AA2024 and AA6061, *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;32:1-10
10. Jonckheere V, Meestr B, Denquin A, Simar A. Torque, Temperature and Hardening Precipitation Evolution in Dissimilar Friction Stir Welds between 6061-T6 and 2014-T6 Aluminum Alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013;213:826-837.
11. Moradi MM, Aval HJ, Jamaati R, Amirkhanlou S, Ji S. Effect of SiC Nanoparticles on the Microstructure and Texture of Friction Stir Welded AA2024/AA6061. *Materials Characterization*. 2019;152:169-179.
12. Paidar M, Vignesh RV, Khorram A, Ojo OO, Rasoulpouraghdam A, Pustokhina I. Dissimilar Modified Friction Stir Clinching of AA2024-AA6061 Aluminum Alloys: Effects of Materials Positioning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9:6037-6047.
13. Jandaghi MR, Pouraliakbar H, Saboori A, Hong SI, Pavese M. Comparative Insight into the Interfacial Phase Evolutions during Solution Treatment of Dissimilar Friction Stir Welded AA2198-AA7475 and AA2198-AA6013 Aluminum Sheets. *Materials*. 2021;14:1290.
14. Ramamurthy M, Balasubramanian P, Senthilkumar N, Anbucheziyan G. Influence of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welds of AA2014 and AA6063 Aluminium Alloys using Response Surface Methodology. *Materials Research Express*. 2022;9:026528.
15. Varunraj S, Ruban M. Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of AA6063 and AA7075 Dissimilar Aluminium Alloys by Friction Stir Welding Process. *Materials Today: Proceedings*. 2022;68:1654-1657.
16. Gazizov MR, Zuiko IS, Malopheyev SS. EBSD-investigation of Al-Cu-Mg alloy microstructure subjected to friction-stir welding. *Applied Mathematics & Physics*. 2022;54(4):261-265. (in Russian)
17. Vysotskiy I, Malopheyev S, Zuiko I, Mironov S, Kaibyshev R. Crystallographic aspects of 17–4 PH martensitic steel produced by laser-powder bed fusion. *Materials Characterization*. 2022;192:112405.
18. Vysotskiy I, Malopheyev S, Zuiko I, Mironov S, Kaibyshev R. Microstructure Distribution in 17-4 PH Martensitic Steel Produced by Selective Laser Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2022;53:4143-4147.

19. Zuiko IS, Malopheyev S, Mironov S, Betsofen S, Kaibyshev R. On the Heterogeneous Distribution of Secondary Precipitates in Friction-Stir-Welded 2519 Aluminium Alloy. *Metals*. 2022;12(4):671.
20. Zuiko IS, Mironov S, Betsofen S, Kaibyshev R. Suppression of abnormal grain growth in friction-stir welded Al–Cu–Mg alloy by lowering of welding temperature. *Scripta Materialia*. 2021;196:113765.
21. Zuiko IS, Malopheyev S, Mironov S, Kaibyshev R. Dissimilar friction stir welding of AA2519 and AA5182. *Materials*. 2022; 16(7): 8776.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 20.12.2023

Received December 20, 2023

Поступила после рецензирования 03.02.2024

Revised February 3, 2024

Принята к публикации 06.02.2024

Accepted February 6, 2024

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зуйко Иван Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Малофеев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Михайлов Михаил Георгиевич – лаборант-исследователь Лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Калиненко Александр Андреевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan S. Zuiko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Laboratory of Mechanical Properties of Nanoscale Materials and Superalloys, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Sergey S. Malopheyev – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Laboratory of Mechanical Properties of Nanoscale Materials and Superalloys, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Mikhail G. Mikhailov – Research Assistant of Laboratory of Mechanical Properties of Nanoscale Materials and Superalloys, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Alexandr A. Kalinenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher of Laboratory of Mechanical Properties of Nanoscale Materials and Superalloys, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

[К содержанию](#)