

Р. А. Рзаев¹, Л. М. Гуревич², З. Р. Датская¹

**ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ
С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
И ОБРАЗОВАНИЕ ЗОН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
АЛЮМИНИЕВОГО И МЕДНОГО СПЛАВОВ**

¹ Астраханский государственный университет

² Волгоградский государственный технический университет

e-mail: radmir.82@mail.ru

В статье рассматривается влияние смещения сварочного инструмента на медь и алюминий при сварке трением с перемешиванием на формирование микроструктуры и механические свойства разнородного шва. Исследованы режимы сварки: частота вращения сварочного инструмента 900 об/мин, скорость сварки 25 мм/мин, смещение варьировалось от 0 до 3 мм на медь или алюминий. Наиболее оптимальным смещением при сварке трением с перемешиванием являлось расположение пина 0,5 и 1 мм на медь, что позволяет образовывать композитное строение ядра и зоны термометформационного воздействия. Если толщина интерметаллидных слоев не превышает 4–5 мкм, то наблюдаются повышенные значения механической прочности сварного разнородного соединения.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, разнородные соединения, интерметаллиды, алюминиевый сплав, медный сплав

R. A. Rzaev¹, L. M. Gurevich², Z. R. Datskaya¹

**INFLUENCE OF TOOL DISPLACEMENT DURING FRICTION STIR WELDING
ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND FORMATION OF ZONES
OF WELDED JOINTS OF ALUMINUM AND COPPER ALLOYS**

¹ Astrakhan State University

² Volgograd State Technical University

The article examines the effect of welding tool displacement on copper and aluminum during friction stir welding on the formation of microstructure and mechanical properties of a dissimilar weld. The corresponding welding modes were considered in the work: welding tool rotation speed 900 rpm, welding speed 25 mm/min, mixing varied from 0 to 3 mm for copper or aluminum. The most optimal displacement during friction stir welding was the location of the pin of 0.5 and 1 mm on copper, which allows the formation of a composite structure of the core and the thermal deformation zone. At these positions of the tool pin relative to the line of contact of the metals, the mechanical properties of the weld are closer to those of the most ductile material (aluminum). The welding mode parameter (displacement) affects the formation and volumetric content of intermetallic layers. If the thickness of the intermetallic layers does not exceed 4–5 μm , then increased values of the mechanical strength of the welded dissimilar joint are observed.

Keywords: friction stir welding, dissimilar joints, intermetallic compounds, aluminum alloy, copper alloy

Существует множество применений разнородных соединений Al-Cu в силовой энергетике, авиакосмической, нефтегазовой и автомобильной промышленности. Использование процессов сварки плавлением для соединения разнородных металлов обычно нежелательно из-за ряда проблем, связанных с плавлением и затвердеванием, таких как различия в температурах плавления и величинах теплопроводности, в коэффициентах теплового расширения, более высокие остаточные напряжения, образование хрупких интерметаллидов и т. д. Процесс СТП является самым лучшим способом сварки для получения бездефектных сварных швов. Из-за большой разницы в величине пластической текучести алюминия и меди для стыковых соединений возникает проблема получения сварного соединения без дефектов и малого содержания интерметаллидов [1–5].

Смещение инструмента в сторону одного из свариваемых разнородных материалов влияет на механические свойства шва [6–10]. Смещение инструмента в сторону медного сплава приводит к большему нагреву меди, чем алюминия. В отсутствие смещения ось инструмента СТП располагается в центре линии сварного соединения. При нулевом смещении из-за различий в теплопроводности и температуре плавления свариваемых материалов происходит неравномерная и неполная пластическая деформация. В работе Т.К. Bhattacharya и соавторов [0] сообщается о получении методом СТП соединения меди и алюминия без смещения инструмента с прочностью шва 86,5 % от алюминиевого сплава. Смещение инструмента позволяет добиться большей прочности шва (вплоть до 100 %). Смещения пина положительно влияет на движение потока материала и на возникновение ИМФ. Это способствует снижению дефектности шва и обеспечению высокой прочности СС [0].

В ряде работ [13–16] предлагается сместить СИ в сторону алюминиевого сплава, так как медь имеет более высокий коэффициент теплопроводности, поэтому может отвести большое количество теплоты. Этот технологический прием позволяет оптимально распределять термические напряжения на оба материала и генерировать больше тепла в алюминии.

Смещение на медный сплав рассматривалось в работах [13–17], где описываются соединения меди и алюминия, в которых прочность сварных швов составляла 85–100 % от прочности на разрыв алюминиевого сплава. При СТП разнородных соединений фрагменты более твердого материала представляют собой барьер для потока менее твердого материала в зоне перемешивания. Для размягчения и перехода в сверхпластическое состояние (СПС) медного сплава необходимо вводить большую тепловую мощность.

Оптимальное значение смещения инструмента зависит от состава и толщины основного материала, конструкции инструмента и параметров процесса [0; 0]. При большем смещении пина происходит диспергирование медного сплава, который легко реагирует с алюминием, что ускоряет процесс диффузии и смешивания в зоне ЯСШ [0; 0].

Однако результаты этих работ не полностью согласуются в рекомендуемых величинах и направлениях смещения СИ. Это может быть связано с различиями в составе используемых сплавов и размеров свариваемых образцов. Поэтому необходимы дополнительные исследования влияния смещения СИ на качество сварного соединения.

Методика исследования

В исследованиях использовали преимущественно листовые (толщиной 3 мм) образцы из алюминия АД1 и меди М1.

Параметры режимов СТП алюминия и меди

Номер режима	Скорость вращения СИ (ω , об/мин)	Скорость сварки (v , мм/мин)	Угол наклона СИ (α , °)	Смещение СИ, мм
1	900	25	3	-3
2	900	25	3	-2
3	900	25	3	-1
4	900	25	3	0
5	900	25	3	0,5
6	900	25	3	1
7	900	25	3	2
8	900	25	3	3

Сварку образцов выполняли на вертикально-фрезерном станке модели 6Т80Ш, оснащенном набором сварочных инструментов для сварки конкретного металла заданной толщины, специализированной оснасткой и возможностью регулирования режимов, в том числе и угла отклонения инструмента от вертикали (таблица).

Исследования микроструктуры производили при помощи оптического микроскопа Zeiss Axiovert 40 MAT и электронного микроскопа FEI Versa 3D LowVac DualBeam, с помощью которого изучали химический состав отдельных структурных компонентов и распределение химических элементов в переходных зонах методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Вырезку поперечных шлифов осуществляли методом электроэрозионной обработки на электроискровом проволоочно-вырезном станке «АРТА-120» и на отрезном абразивном станке для влажной резки «ATM BRILLANT 220». Для горячего прессования образцов в полимерную композицию перед

полировкой использовали пресс «ATM OPAL 460». Окончательно образцы шлифовали на машине «ATM SAPHIR 560» с вращающимися кругами с абразивными шкурками. Для травления рабочей поверхности подготовленных микрошлифов использовали:

– для меди водный раствор соляной кислоты и хлорида железа (III): (100 мл H_2O +25 мл HCl +8 гр. $FeCl_3$);

– для алюминия водный 5 % раствор плавиковой кислоты.

Оценку механических свойств сварных соединений проводили по результатам испытаний на одноосное статическое растяжение и статический изгиб по ГОСТ 1497–84.

Обсуждение полученных результатов

Изменения положения инструмента относительно линии соприкосновения свариваемых образцов позволяет управлять распределением температуры и объемов перемешанных металлов. На рис. 1 представлены макрошлифы сварных швов, выполненных по режимам 1–3 (таблица).

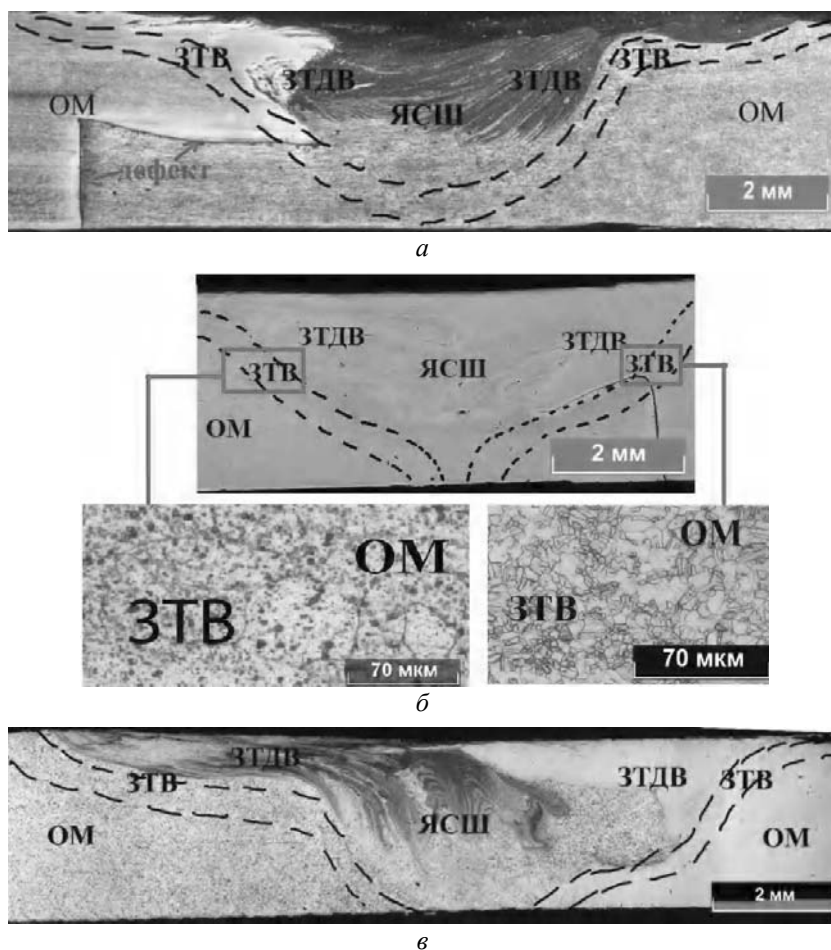


Рис. 1. Макрошлифы сварных швов алюминия и меди с участками ЗТВ:
а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3

В отличие от СТП однородных материалов, на поперечном сечении разнородного стыкового соединения (рис. 1) сложнее выделить различные зоны, такие как зона термодиффузионного влияния (ЗТДВ), зона термического влияния (ЗТВ) и ядро (ЯСШ). Черными пунктирными линиями обозначены границы характерных зон сварного соединения (СС).

Мы можем наблюдать «луковичное строение» с нечеткими зонами ЯСШ и ЗТДВ. Прослойки твердых растворов и основных металлов вытянуты вдоль направления алюминия, что позволяет сказать центральная часть ядра представляет собой композит. В ЗТДВ, непосредственно сопряженной с зоной перемешивания, изгиб металла представлен в виде полосчатой

структуры. Она обусловлен пластическим течением материала в процессе СТП (рис. 1, а). Ширина сварного шва уменьшается с 18 до 16,5 мм с уменьшением смещения на алюминии.

С учетом диапазона рабочих температур (420–480 °С) образования соединений при СТП, на формирование структуры ЗТВ алюминия и меди оказывает влияние первичная (простая) и непрерывная постдинамическая рекристаллизации, реализуемой по механизму собирательной рекристаллизации. Материал в ЗТВ алюминия и меди практически не отличается по структуре от основного металла (рис. 1, б). При уменьшения смещения инструмента на алюминий (режим 3) можно наблюдать бездефектное сварное соединение (рис. 1, в).

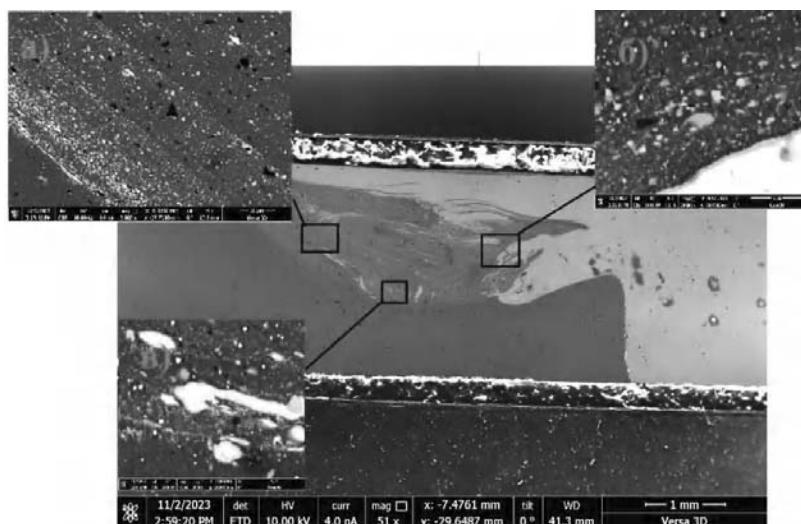


Рис. 2. EBSD карта микрошлифа соединения Al-Cu (режим 2):
а–в – увеличенные микроструктуры фрагментов ядра

Результат исследования на рис. 2 зон ЯСШ и ЗТДВ показывает, что как алюминии, так и медь не равномерно распределяются вдоль сечения сварного соединения. Видно, что инструмент захватывает медь с поверхности и средней части ЯСШ и перемешивает в верхнюю часть

алюминиевого сплава. В ЗТДВ со стороны меди и донной части ЯСШ наблюдаются крупные фрагменты меди, а со стороны алюминия в ЗТДВ можно видеть более мелкие фрагменты М1, которые сонаправлены со слоями АД1.

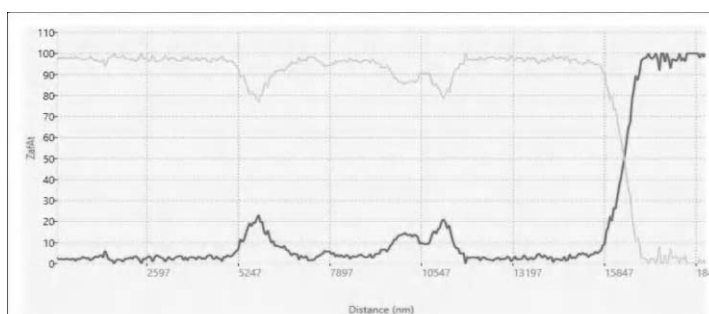
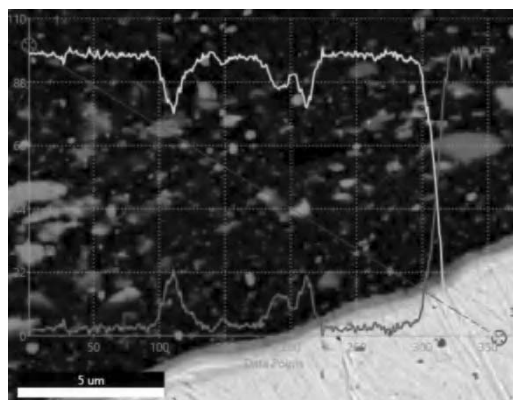


Рис. 3. Участок ЯСШ со стороны меди с интерметаллидными слоями (режим 2)

Электронно-микроскопическое исследование участка ЯСШ со стороны М1 (режим 2) показало (рис. 3), что интерметаллидных слоев (ИМС) отсутствуют.

В макроструктурах полученных без смещения швов дефекты отсутствовали (рис. 4). Наблюдается перемещение металла АД1 из ЯСШ в сторону алюминия под заплечик. По сравнению

с верхней частью сварного шва, низкое тепловложение привело к слабому размягчению тугоплавкого металла (меди) и отрицательно сказалось на перемещаемом потоке материала. В результате перемешанное пространство не может быть заполнено полностью медью. Заполнение происходило только в верхней и нижней частях ЗТДВ, где было соприкосновение со СИ.

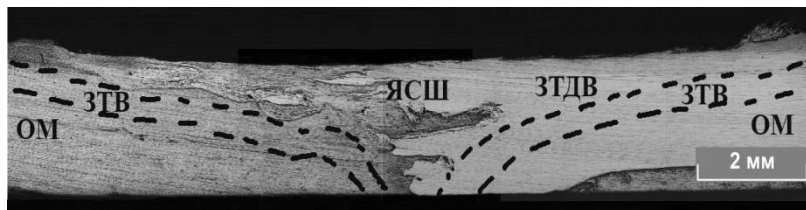


Рис. 4. Макрошлиф сварного шва алюминия и меди (режим 4)

При смещении СИ на медь на 0,5 мм (режим 5) ЯСШ состоит из почти равновеликих объемов свариваемых металлов (рис. 5, в), структура ядра

имеет вид множества вихреподобных образований (рис. 5, з, д), сформировавшихся в результате сдвигово-поворотных воздействий СИ.

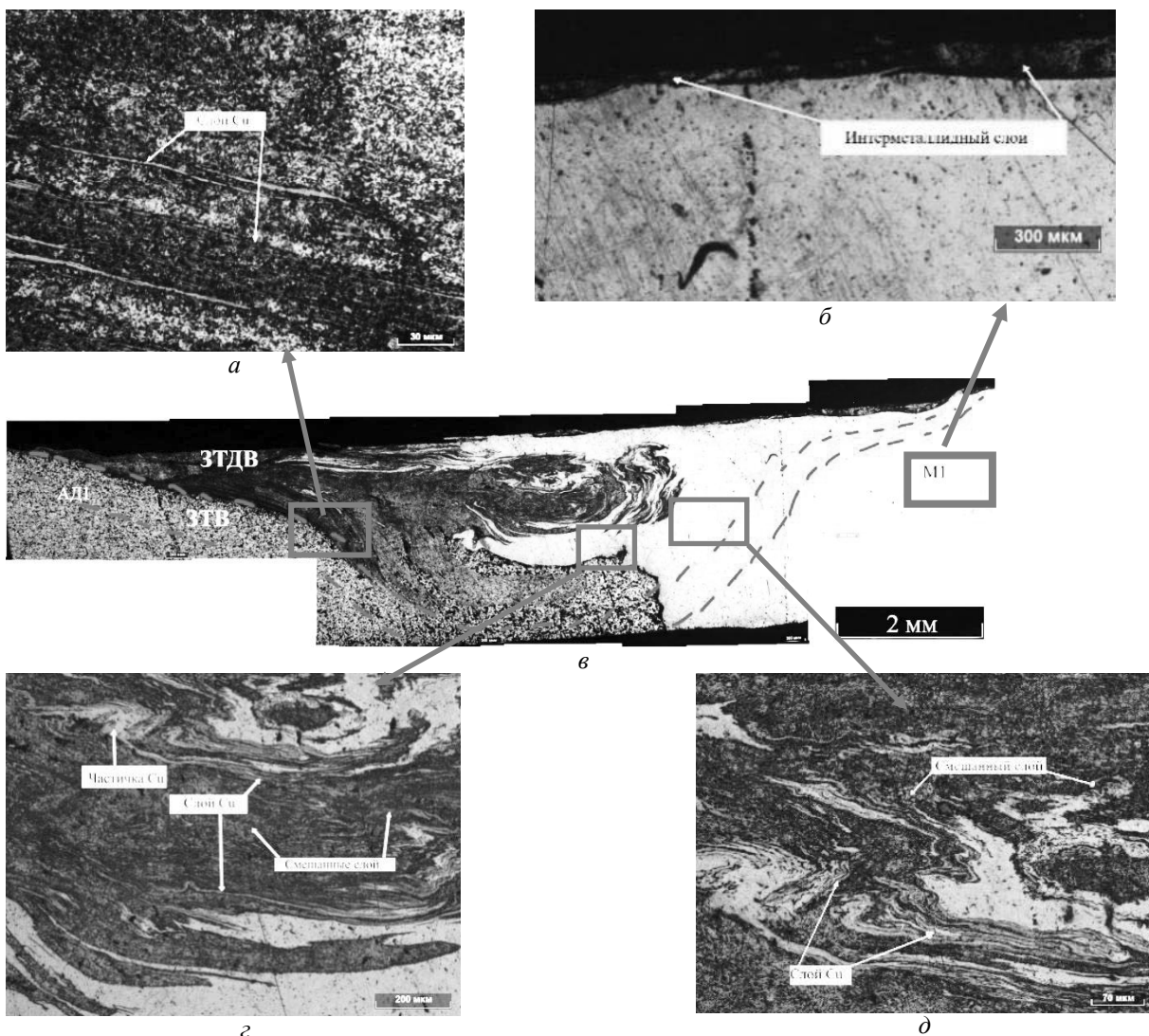


Рис. 5. Макрошлиф сварного шва алюминиевого и медного сплава (режим 5)

Четкую межзонную границу можно наблюдать в области перехода от ЯСШ к меди, так как СИ, изначально был смещен на 1 мм в сторону меди и большую часть времени контактирует именно с медью (рис. 5, д). Ламельный слой, состоящий из алюминия, меди и ИМС отчетливо видим в ЯСШ. Таким образом, центральную зону сварного шва можно рассматривать как алюмомедный композит, состоящий из кусочков и полосок меди хорошее смешавшиеся с алюминием. Кроме этого размеры и конфигурация, слоистость интерметаллидных фаз (ИМФ) не всегда являются показателями ухудшения механических свойств разнородных СС. В случае дисперсности как металлических,

так и интерметаллидных образований, они выступают в качестве упрочнителей швов, если размеры не превышают 1–3 мкм (рис. 5, а). В случае «поверхностного» (под заплечиком СИ) формирования ИМФ возникает опасная ситуация, так как в этом случае ИМФ выступают концентраторами напряжений, способствующих образованию трещин и инициирующих начало разрушений при механическом нагружении (рис. 5, б).

При увеличении смещения на М1 (режим 6,7) происходит больший захват меди и перераспределения ее по всему сварному шву по сравнению с образцами (режим 1–3), что можно наблюдать на рис. 6.

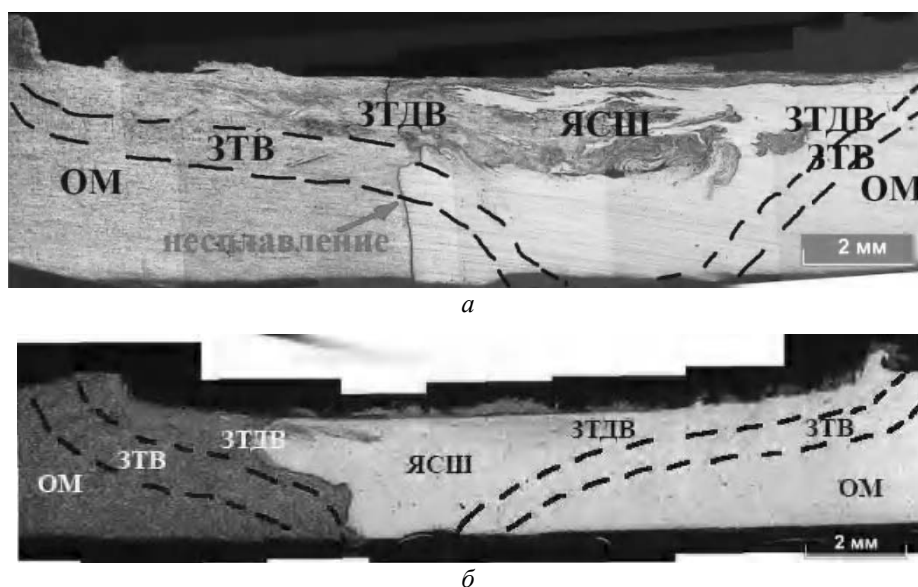


Рис. 6. Макрошлиф сварного шва алюминия и меди:
а – режим 6; б – режим 7

На рис. 6, а и 6, б наблюдается уменьшение объемной доли алюминия и увеличение ширины сварного шва от 16 до 17,5 мм. Это вызвано тем, что инструмент прогревает медь более интенсивнее и достигается температура перехода в СПС. При смещении $\delta_1 = 2$ мм наблюдается поток разнородных материалов на алюминиевой стороне. На макрошлифе (рис. 6, а) обнаруживаем ламинарное течение, а в ЯСШ турбулентные завихрения. С большим смещением на медную сторону (рис. 6, б) мы наблюдаем перенос свариваемых разнородных металлов лишь верхней части шва за счет захватом заплечиком. Толщина области интенсивного перемешивания алюминия и меди составила 0,4 мм. При увеличении смещения на медь $\delta_1 = 2$ мм и $\delta_2 = 3$ мм возрастает размер дефекта

в виде несплавления. Только заплечик и верхняя часть пина соприкасается с алюминиями (рис. 6, а и 6, б).

Электронномикроскопические и рентгеноструктурные исследования показали, что при длительном термомеханическом воздействии СИ на кромках и в местах статического застоя микротоков разнородных металлов, возникают прослойки интерметаллидов. Средняя толщина интерметаллидных прослоек составляла 2–6 мкм. Преимущественно прослойки интерметаллидов наблюдались на алюминиевой стороне.

Построенные гистограммы временного сопротивления (рис. 7) показывают что максимальные прочностные характеристики наблюдаются при смещении СИ смещение на медь в диапазоне от 0,5 до 1 мм.

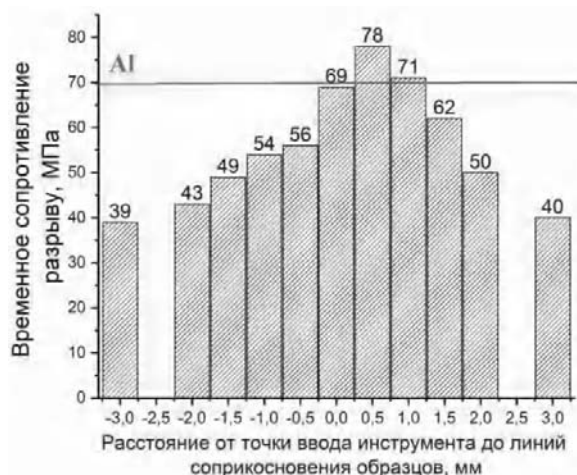


Рис. 7. Зависимость временного сопротивления на разрыв от смещения СИ

При данных смещениях ввода сварочного инструмента от 0 до 1 мм на медь происходит увеличение механические свойства сварного шва приближенных к наиболее пластичному материалу (алюминий).

Выводы

1. При СТП разнородных соединений фрагменты более твердого материала представляют собой барьер для потока менее твердого материала в зоне перемешивания. Для размягчения и перехода в СПС меди необходимо вводить большую тепловую мощность.

2. Для стыковых соединений меди и алюминия оптимальным является смещение СИ в сторону медной детали на 0,5–1 мм, при которых достигаются наибольшие механические свойства СС.

3. Ламельный слой, состоящий из алюминия, меди и ИМС отчетливо видим в ЯСШ и ЗТДВ. Таким образом, зону сварного шва можно рассматривать как алюмо-медный композит, состоящий из фрагментов меди компактной или пластичной формы, хорошее перемешанных с алюминием. Композитная структура сварного шва с толщинами ИМС от 2 до 6 мкм не снижает механические свойства сварного соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mehta, K. P., Badheka, V. J. A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants, Mater. -2016. -pp. 233-254.
2. Kai, C., Xun, L., Jun, N. A review of friction stir based processes for joining dissimilar materials// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2019, -pp. 1709-1731.
3. Chung-Wei, Y., Shiau-Jiun, J. Weibull Statistical Analysis of Strength Fluctuation for Failure Prediction and Structural Durability of Friction Stir Welded Al-Cu Dissimilar Joints Correlated to Metallurgical Bonded Characteristics// Department of Materials Science and Engineering. -2019. -pp. 205.

4. Sun, Y. A Review of the Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminum Alloys and Copper/ Y. Sun, W. Gong, J. Feng, G. Lu// Metals. – 2022. -№12 (675). – pp. 1- 26.
5. Wei, Y. N. Research Progress of Friction Stir Welding Technology and Microstructure of Copper/Aluminum Joint/ Y.N. Wei, H. Li, P. Xiao, Y.G. Luo, H.T. Qu, S.H. Liang// Hot Work. Technol.- 2020.- №49.- pp. 1–5.
6. Lienert, T. Friction stir welding and processing/ T. Lienert, R. Mishra, M. Mahoney// Materials Park, OH: ASM International.- 2007.- pp. 123-154.
7. Xue, P. Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints/ P. Xue, D. Ni, D. Wang, B. Xiao, Z. Ma// Materials Science and Engineering A.- 2011.- №528(13).- pp. 4683-4689.
8. Firouzdor, V. Al-to-Cu friction stir lap welding/ V. Firouzdor, S. Kou// Metallurgical and Materials Transactions A.- 2012.- №43(1).- pp. 303-315.
9. Akinlabi, E. T. Effect of tool displacement on defect formation in friction stir welding of aluminium and copper/ E.T. Akinlabi, A. Els-Botes, H. Lombard//Proceedings of the 8-th International Friction Stir Welding Symposium. Hamburg, Germany, TWI Ltd.- 2010.- pp. 216-224.
10. Anbukkarasi, R. Role of Third Material (Interlayer) on Mechanical Properties of the AA2024–Copper Joints Carried out by FSW/ R. Anbukkarasi, V. Satish, M. Kailas// Trans Indian Inst Met.- 2019.-№72(6).- pp. 1603–1606
11. Bhattacharya, T. K. Numerical and experimental investigation of thermal history, material flow and mechanical properties of friction stir welded aluminium alloy to DHP copper dissimilar joint/ T.K. Bhattacharya, H. Das, S.S. Jana and T.K. Pal//The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.– 2017.– vol. 88. -№. 1. -pp. 847-861.
12. Avettand-Fenoel, M. Multiscale study of interfacial intermetallic compounds in a dissimilar al 6082-T6/Cu friction-stir weld/ M. Avettand-Fenoel, R. Taillard, G. Ji and D. Goran// Metallurgical and Materials Transactions A. -2012. -vol. 43. -№. 12. -pp. 4655-4666.
13. Singh, S. H. Effect of tool pin offset on the mechanical properties of dissimilar materials based on FSW/ S.H. Singh, M. Mahmeen// International Journal of Modern Trends in Engineering and Research.- 2016.- №3.- pp. 75-80.
14. Seyed, V. S. Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of AA 6061 to Copper/ V.S. Seyed, A. Hossein, B. Mohammad, K. Givi// Influence of Preheat. Mechanics, Materials Science & Engineering.- 2016.- pp. 25-37.
15. Shailesh, N. Optimum heat source position offset in welding of dissimilar Al-Cu metals using a theoretical approach/ N. Shailesh, M. Jyoti// Materials Today: Proceedings 5.- 2018.- pp. 26974–26980.
16. Fei, X. Special welding parameters study on Cu/Al joint in laser-heated friction stir welding/ X. Fei, Y. Ye, L. Jin, H. Wang, S. Lv// Journal of Materials Processing Tech.-2018.- №256.- pp. 160–171.
17. Shukla, R. K. Investigation of Joint Properties of Friction Stir Welding of Aluminum 6061 Alloy to Copper/ R.K. Shukla, P.K. Shah// International Journal of Engineering Research and Technology.- 2010.- vol. 3.- №3.- pp. 613–620.
18. Agarwal, S. P. Development of friction stir welded butt joints of AA 6063 aluminium alloy and pure copper/ S.P. Agarwal, P. Nageswaran, N. Arivazhagan, K.D. Ramkumar // International Conference on Advanced Research in Mechanical Engineering. Uttarakhand, India: IPM rt. Ltd Naintal.- 2012.- pp. 46-50.
19. Hou, W. The role of tool offset on the microstructure and mechanical properties of Al/Cu friction stir welded joints/ W. Hou, L.H. Shah, G. Huang, Y. Shen, A. Gerlich// Journal of Alloys and Compounds.- 2020.- №825.- pp.154045.