

РАЗРУШЕНИЕ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБОМ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ*

*О.В. СИЗОВА^{1,2}, доктор тех. наук, профессор,
 А.В. КОЛУБАЕВ^{1,2}, доктор физ.-мат. наук, профессор,
 Е.А. КОЛУБАЕВ^{1,2}, кандидат физ.-мат. наук,
 А.А. ЗАЙКИНА¹, аспирант,
 В.Е. РУБЦОВ¹, кандидат физ.-мат. наук,
 (¹ИФПМ СО РАН, ²НИ ТПУ, г.Томск)*

Поступила 23 июня 2014
 Рецензирование 23 июля 2014
 Принята к печати 25 июля 2014

Сизова О.В. – 634021, г. Томск, пр. Академический 2/4,
 Институт физики прочности и материаловедения
 Сибирского отделения Российской академии наук;
 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
 e-mail: ovs@ispms.ru

Приведены результаты исследований разрушения сварных соединений алюминий-магниевого сплава, полученных способом сварки трением с перемешиванием после испытаний на статическое растяжение. На примере сварных соединений листов сплава различной толщины показано, что макро- и микроструктура швов имеют как общие признаки, так и особенности, обусловленные влиянием температурно-временных условий процесса. Показано, что важным отличием микроструктуры сварного шва от исходной структуры сплава является формирование слоистой ультрамелкозернистой структуры без признаков текстуры проката. Обнаружено, что при сварке толстых листов сплава наряду с динамической полигонизацией, ответственной за образование равноосной мелкозернистой структуры, имеет место и частичная рекристаллизация деформированной структуры. Проведен сравнительный анализ топографии излома образцов сплава различной толщины после растяжения, позволяющий провести аналогию между двумя картинками разрушения. Обсуждается природа механизма структурообразования сплава в области сварного соединения, стимулируемого нагревом и интенсивной пластической деформацией.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминий-магний сплав, микроструктура, рекристаллизация, статическое растяжение, разрушение.

Введение

Внедрение в отечественную промышленность одного из новейших способов сварки – сварки трением с перемешиванием (СТП) при-

влекает внимание исследователей к изучению особенностей протекания этого процесса главным образом вследствие специфики строения сварного соединения, как не имеющего аналогов среди других видов сварки [1–3]. Пластифици-

* Работа выполнена по проекту № III.23.2.4 Программы III.23.2 фундаментальных исследований СО РАН на 2013–2016 гг., при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 и гранта РФФИ № 14-08-31662.

рованный тепловыделением металл за счет сил трения перемещивается в результате вращения инструмента. В процессе поступательного перемещения инструмента по стыку свариваемых поверхностей происходит массоперенос металла с формированием сварного шва. Микроструктура сварного соединения имеет свои особенности, обусловленные спецификой протекания процесса пластического течения материала [4]. Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению структуры и свойств сварных соединений различных металлов и сплавов, полученных способом сварки трением с перемешиванием, однозначного мнения о механизмах формирования структуры сварного шва не существует. Из многочисленных зарубежных и отечественных публикаций известно только то, что в центре сварного шва (ядре) формируются ультрамелкодисперсные зерна, образование которых, по мнению некоторых исследователей, является результатом динамической рекристаллизации [5–7] или собирательной динамической полигонизации [8]. Слоистая структура этой части сварного шва получила название «onion ring», или «луковичная структура», из-за характерного кольцеобразного строения [9, 10]. Зона термомеханического влияния является промежуточной между зоной термического влияния и ядром и представляет собой переход от одного типа структуры к другому – от зеренной текстурированной структуры основного металла к слоистой структуре центральной части сварного шва. Здесь, как показано в работе [11], возникает неустойчивость, подобная неустойчивости Гельмгольца в вязких жидкостях, которая может сопровождаться вихреобразным (турбулентным) течением металла. Поэтому на границе зон, где имеет место разрыв скорости пластического течения, наиболее вероятно появление дефектов сварного соединения вследствие несовместности деформации двух объемов материала [12]. На особенности формирования микроструктуры сварного шва непосредственное влияние должны оказывать и комбинации температурно-деформационных условий процесса, реализующихся при сварке листов материала различной толщины, так как именно они влияют на ве-

личину тепловложения, а значит, и на реализацию того или иного механизма структурообразования. Изучение этого влияния, как справедливо подчеркивается во многих публикациях, является в настоящее время важнейшей задачей, от решения которой зависит успех широкого внедрения в промышленность этой перспективной технологии.

Целью работы является сравнительное исследование структуры сварных соединений листов алюминий-магниевого сплава различной толщины, полученных способом сварки трением с перемешиванием, и изучение особенностей их разрушения при статическом растяжении.

Материал и методы исследований

Исследования проводили на пластинах алюминий-магниевого сплава АМг5М толщиной 5,0 и 35,0 мм. В задачи данного исследования не входило рассмотрение влияния параметров процесса сварки и определение численных показателей прочности материала сварного соединения, поэтому полученные результаты представляют собой анализ качественного сравнения микроструктуры с целью установления области наибольших концентраций напряжений, приводящих к разрушению образца. Образцы для испытаний на растяжение были изготовлены согласно требованиям ГОСТ 6996. Шлифы для металлографических исследований представляли собой образцы в виде параллелепипеда длиной 20...22 мм (на 2...4 мм больше ширины сварного шва), шириной 5...7 мм и высотой, равной толщине свариваемых пластин (рис. 1). Вырезка образцов производилась электрической дисковой пилой, что позволило обеспечить минимальный нагрев образца в процессе резки. Металлографический анализ зоны реза показал, что толщина пластически деформированной зоны

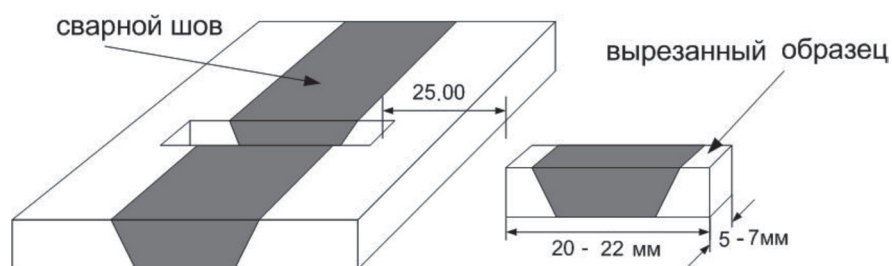


Рис. 1. Схема вырезки образцов для металлографических исследований

в этой области составляла менее 100 мкм, она удалялась при приготовлении шлифа на первой стадии шлифования. Металлографические исследования выполняли с помощью оптического микроскопа Neophot-32, лазерно-конфокального микроскопа LEXT-OLS4000, растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO-50 и атомно-силового микроскопа Solver P47-H.

Результаты исследований и их обсуждение

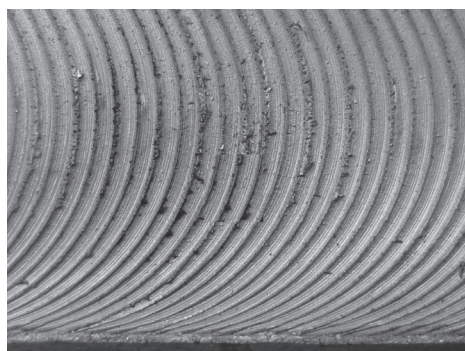
Изложенный в статье материал посвящен изучению особенностей топографии поверхностей разрушения сварных соединений листов алюминиево-магниевого сплава различной толщины после испытаний на статическое растяжение. Интерес к данному исследованию вызван отличиями в поведении образцов материалов, полученных сваркой трением с перемешиванием и сваренных другими способами, при различных видах нагружения. Например, разрушение сварных швов тонких пластин ($\leq 4,0$ мм) алюминиево-магниевого сплава, полученных методом СТП, при испытании на растяжение начиналось именно в зоне термомеханического влияния [13], тогда как сварной шов сплава В1461, полученный аргонодуговой сваркой, разрушался в зоне термического влияния [14].

В данной работе были рассмотрены два варианта исходного материала – тонких и толстых листов алюминиево-магниевого сплава, сваренных встык методом СТП. Предполагалось, что различие термического режима, обусловленного масштабным фактором, окажет определенное влияние на структуру сварного шва и особен-

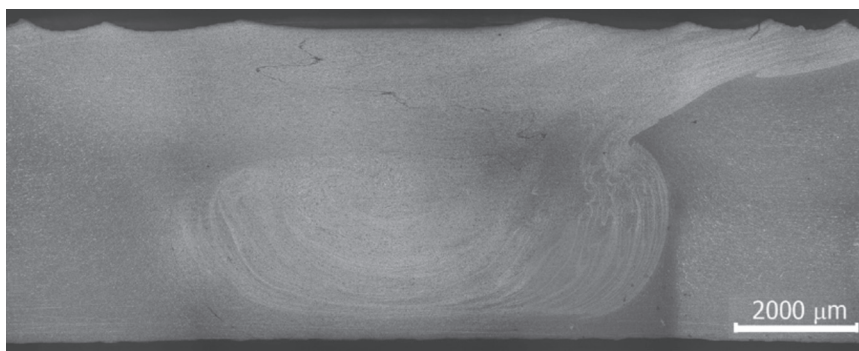
ности его разрушения. На рис. 2 показан общий вид и поперечное сечение исследуемого сварного шва листов алюминиево-магниевого сплава толщиной 5,0 мм.

Металлографический анализ структуры сварного шва пластин толщиной 5,0 и 35,0 мм позволил обнаружить как внешнее сходство макроструктуры, так и определенное различие в микроструктуре сваренных образцов. Общим для обоих сварных соединений явилось характерное несимметричное строение сварного шва относительно плоскости стыка двух листов сплава, что хорошо видно на рис. 2, б. Кроме того, отчетливо видно разделение его на верхнюю и нижнюю части, образовавшиеся вследствие вращения инструмента специальной конструкции, состоящего из штифта, погруженного в металл, и плечиков, трущихся по поверхности листов.

Следует отметить, что при схожести механизмов формирования верхней части сварного шва и нижней, обусловленных трением скольжения, существуют и отличия. При трении скольжения плечиков о поверхность свариваемых листов происходит течение пластифицированного металла в поверхностном слое параллельно поверхности с постепенным снижением величины деформации вглубь. При этом осуществляется массоперенос, как и при трении скольжения [15]. В свою очередь, вращение штифта обуславливает массоперенос вокруг цилиндрической поверхности штифта с образованием слоистой структуры. К тому же из-за особой геометрии инструмента течение материала происходило не только по окружности, но и в вертикальном направлении, формируя при этом характерный грибообразный вид сварного шва.



а



б

Рис. 2. Общий вид сварного соединения, полученного способом СТП:

а – вид сверху; б – структура шва в поперечном сечении

На микроструктуру сварных швов толстых и тонких листов влияет масштабный фактор, который определяет различия их структур. Так, ширина слоев в «луковичной структуре» листов толщиной 5,0 мм составила 50...100 мкм, структура внутри слоев отличалась однородностью и состояла из зерен размером 1...3 мкм (рис. 3). Анализ «луковичной» структуры сварного соединения пластин толщиной 35 мм (рис. 4) показал, что строение материала в каждой полосе было неоднородно и состояло из чередующихся участков протяженностью порядка 150...200 мкм с мелким и более крупным зерном.

На рис. 4 показана наблюдаемая картина перехода одного типа структуры к другому, обусловленная, на наш взгляд, процессами дина-

мической полигонизации и рекристаллизации, имевшими место при пластической деформации и фрикционном нагреве сплава в процессе сварки трением вследствие неоднородного распределения температуры внутри шва. В прилегающих к основному металлу участках из-за быстрого отвода тепла и интенсивной пластической деформации исходное вытянутое зерно трансформировалось в равноосную субструктуру с размытыми границами. На некотором удалении от границы с основным материалом температурные условия оказались благоприятными для реализации процесса рекристаллизации, сопровождавшегося некоторым ростом зерна.

При испытании на статическое растяжение образцов сплава, изготовленных из листов выбранной толщины, было отмечено, что разрушение в обоих случаях происходило однотипно в три этапа, что хорошо видно на рис. 5. При разрушении сварного шва тонких листов первичная трещина образовывалась от корня шва (зона I на рис. 5, а), далее разрушение происходило вдоль границы между слоями «луковичной структуры» (зона II) и заканчивалось разрывом в верхней части шва (зона III). Такой механизм разрушения сварного шва непосредственно связан с механизмом его формирования. В нижней части шов менее прочен из-за недостаточного перемешивания металла, обусловленного повышенным теплоотводом в опорную станину, что уменьшает пластичность. В центральной зоне шва на характер разрушения оказывает влияние слоистая структура, у которой менее прочной оказывается граница между слоями. В верхней части шва направление разрыва образца было перпендикулярным к слоям, образованным в результате трения плечиков по поверхности, поэтому поверхность разрушения в этой зоне отличается от описанных выше.

В случае толстых пластин, как видно из рис. 5, б, разрушение происходило таким же образом. Поверхность излома визуально делится на три части – зону I с признаками хрупкого разрушения, зону II с шероховатым рельефом, характерным для статического разрушения ультрадисперсных материалов, и верхнюю зону III с ямочным рельефом, похожим на долом.

Таким образом, поведение материала при приложении максимальных растягивающих напряжений качественно отражало структурное

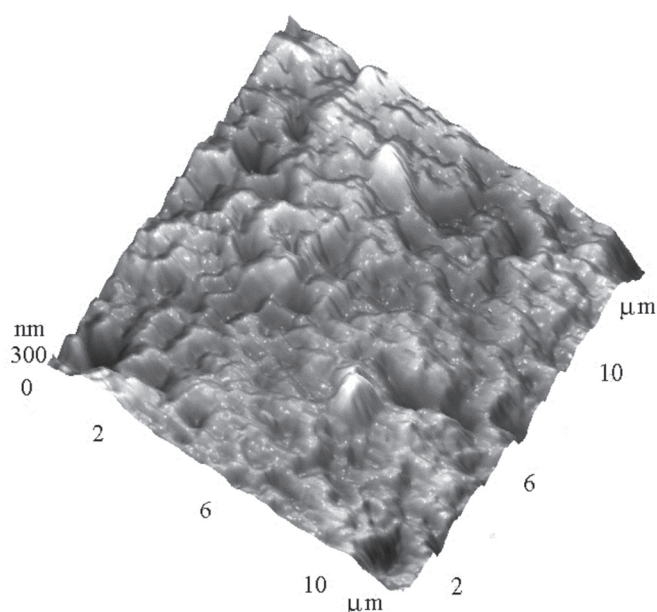


Рис. 3. Микроструктура участка шва в области «луковичной структуры», полученная с помощью атомно-силового микроскопа



Рис. 4. Микроструктура полос сварного шва алюминиевых листов толщиной 35,0 мм

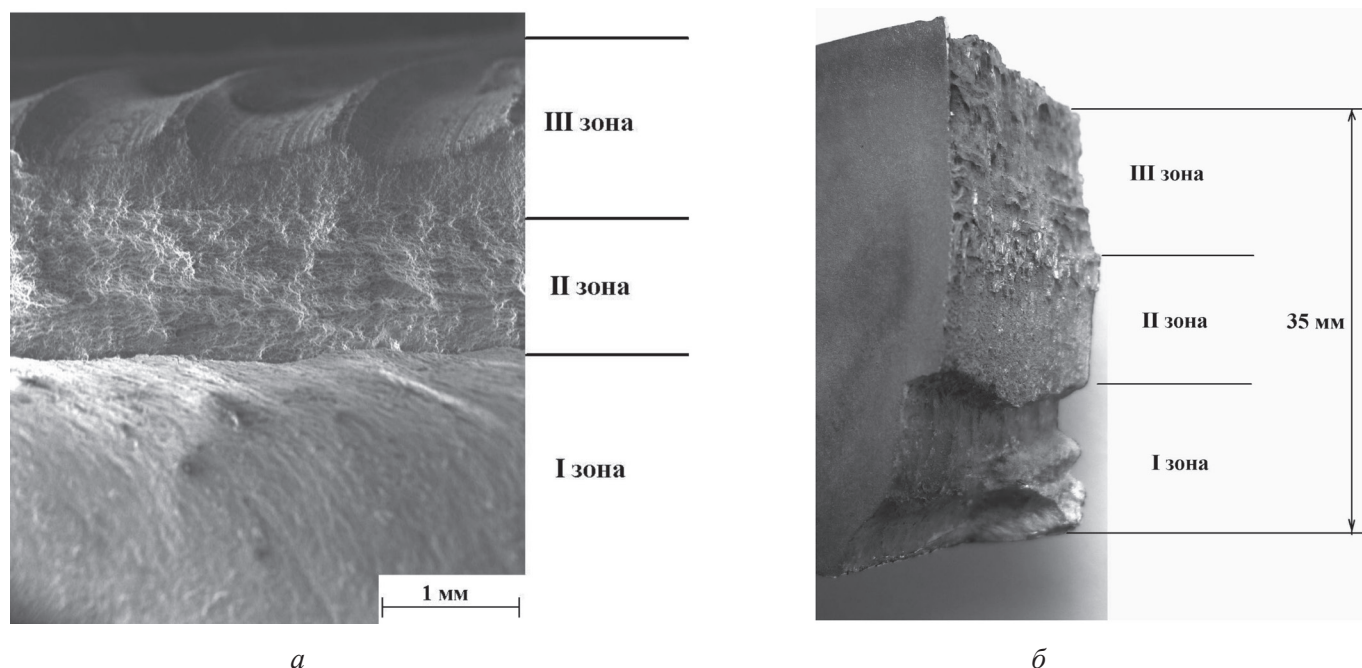


Рис. 5. Топография поверхности разрушения сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием:

а – листов, толщиной 5 мм; *б* – листов, толщиной 35 мм

состояние сварного соединения. В обоих рассматриваемых вариантах разрушение происходило по границе слоев «луковичной структуры», за исключением верхней зоны, где плоскость разрушения была перпендикулярна слоям трения, образованным скольжением плечика по поверхности.

Заключение

Методом металлографии было показано, что при сварке трением с перемешиванием алюминиево-магниевого сплава большое значение имеет толщина свариваемых пластин. При воздействии интенсивной пластической деформации и разогреве металла за счет трения структура сварного шва тонких пластин формируется путем последовательного чередования узких полос материала («луковых колец»), имеющих ультрадисперсную зеренную структуру. При увеличении толщины пластин свариваемого металла, изменяется температурно-временной режим процесса сварки, способствующий частичной рекристаллизации деформированных зерен в центре шва. При приложении максимальных растягивающих напряжений разрушение сварного соединения происходит по границе раздела сред с различной структурой вследствие несовместности их деформации.

Список литературы

1. Friction Stir Butt Welding: International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8 UK / W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith and C.J. Dawes; UK Patent Office, London. – December 6, 1991.
2. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2005. – Vol. 50, № 1-2. – P. 1–78.
3. Shtrikman M. Current state and development of friction stir welding. Pt. 3. Industrial application of friction stir welding // Welding International. – 2008. – Vol. 22, iss. 11. – P. 806–815.
4. On the Conditions of Strain Localization and Microstructure Fragmentation under High-Rate Loading / M.P. Bondar, S.G. Psakhie, A.I. Dmitriev, A.Yu. Nikonov // Physical Mesomechanics. – 2013. – Vol. 16, iss. 3. – P. 191–199.
5. Stephen Leon J., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding // American Journal of Mechanical Engineering and Automation. – 2014. – Vol. 1, № 1. – P. 6–9.
6. Nandan R., DebRoy R. Bhadeshia Recent Advances in Friction-Stir Welding Process, Weldment Structure and Properties // Progress in Material Science. – 2008. – Vol. 53, iss. 6. – P. 980–1023.
7. Murr L.E., Liu G., McClure J.C. Dynamic recrystallization in friction-stir welding of aluminium alloy 1100 // Journal of Materials Science Letters. – 1997. – Vol. 16, iss. 22. – P. 1801–1803.

8. Сварка трением с перемешиванием термически упрочняемого сплава В95 системы Al-Zn-Mg-Cu / В.А. Фролов, В.Ю. Конкевич, П.Ю. Предко, В.В. Белоцерковец // Сварочное производство. – 2013. – № 3. – С. 21–26.

9. *Schneider J.A., Nunes A.C.* Characterization of Plastic Flow and Resulting Microtextures in a Friction Stir Weld // *Metallurgical and Materials Transactions: B.* – 2004. – Vol. 35, № 4. – P. 777–783.

10. Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum / M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling and W.H. Bingel // *Metallurgical and Materials Transactions: A.* – 1998. – Vol. 29, iss. 7. – P. 1955–1964.

11. *Rubtsov V.E., Tarasov S.Yu., Kolubaev A.V.* One-dimensional model of inhomogeneous shear in sliding // *Physical Mesomechanics.* – 2012. – Vol. 15, № 5-6. – P. 337–341.

12. The Evolution of the Surface Layers on Metals in Sliding Friction / A.V. Kolubaev, S.Yu. Tarasov,

O.V. Sizova, E.A. Kolubaev, and Yu.F. Ivanov // *Journal of Friction and Wear.* – 2007. – Vol. 28, № 6. – P. 514–520.

13. *Павлова В.И., Алифференко Е.А., Осокин Е.П.* Исследование температурно-временных условий сварочного нагрева, структуры и свойств металла стыковых соединений из алюминиево-магниевого сплава, выполненных сваркой трением с перемешиванием // *Вопросы материаловедения.* – 2009. – Т. 60, № 4. – С. 74–88.

14. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминиево-литиевого сплава В-1461 / В.И. Лукин, Е.Н. Иода, А.В. Базескин, В.П. Лавренчук, Л.В. Котельникова, М.С. Оглодков // *Сварочное производство.* – 2010. – № 11. – С. 14–17.

15. Исследование массопереноса при трибологическом взаимодействии легированных сталей / Н.Б. Пугачева, С.В. Павлышко, Е.Б. Трушина, А.Н. Замятин // *Трение и износ.* – 2012. – Т. 33, № 3. – С. 265–274.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(64), July – September 2014, Pages 14–20

Fracture of friction stir welded butt joints structure of aluminum-magnesium alloy

Sizova O.V.^{1,2}, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: ovs@ispms.ru

Kolubaev A.V.^{1,2}, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: kav@ispms.ru

Kolubaev E.A.^{1,2}, Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: eak@ispms.ru

Zaikina A.A.¹, Post-graduate Student, e-mail: aaz@ispms.ru

Rubtsov V.E.¹, Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: rvy@ispms.ru

Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4 Akademicheskoy ave., Tomsk, 634021, Russian Federation

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

The results of aluminum-magnesium alloy friction stir welded joints fracture investigations are put forward in the article. Through the example of welded joints of plates with different thickness it is illustrated that macro- and microstructure of the welds have both common features of strained metal and peculiarities caused by the impact of welding temperature-time criteria. It is demonstrated that the significant difference between weld microstructure and original metal was formation of the gradient fine-grained microstructure without signs of texture. It is revealed that as a result of heating and cooling temperature-time terms variation during welding of thick alloyed plates in the weld zone along with dynamic cell formation partial strained structure recrystallization can occur. It is illustrated that in case of recrystallization the joint fracture was along the boundary of the areas with different structures. A comparative analysis of the fracture topography of the broken specimen joints that were obtained from the alloy plates with different thickness is carried out. This analysis revealed that both cases showed similar fracture pattern. A crack originated in the root and run to a distance that is approximately equal to middle of the specimen gauge along to transition boundary of the base metal structure to gradient one. "Pest" degradation goes further. Nature of the alloy structuring mechanism in the weld zone stimulated with heating and intensive plastic deformation is discussed.

Keywords:

friction stir welding, aluminum alloy, microstructure, recrystallization, static tension, fracture.

References

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. Friction Stir Butt Welding. International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
2. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78. doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001
3. Shtrikman M.M. Current state and development of friction stir welding. Pt. 3. Industrial application of friction stir welding. *Welding International*, 2008, vol. 22, iss. 11, pp. 806-815. doi: 10.1080/09507110802593620
4. Bondar M.P., Psakhie S.G., Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu. On the Conditions of Strain Localization and Microstructure Fragmentation under High-Rate Loading, *Physical Mesomechanics*, 2013, vol. 16, iss. 3, pp. 191-199. doi: 10.1134/S1029959913030028
5. Stephen Leon J., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding. *American Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 6-9.
6. Nandan R., DebRoy T. Bhadeshia H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding Process, weldment structure and properties. *Progress in Material Science*, 2008, vol. 53, iss. 6, pp. 980-1023. doi: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001
7. Murr L.E., Liu G., McClure J.C. Dynamic recrystallization in friction-stir welding of aluminium alloy 1100. *Journal of Materials Science Letters*, 1997, vol. 16, iss. 22, pp. 1801-1803. doi: 10.1023/A:1018556332357
8. Frolov V.A., Konkevich V.Yu., Predko P.Yu., Belotserkovets V.V. Svarka treniem s peremeshivaniem termicheski uprochnyaemogo splava V95 sistemy Al-Zn-Mg-Cu [Friction stir welding of the heat-treatable alloy B95 of the Al-Zn-Mg-Cu system]. *Svarochnoe Proizvodstvo – Welding International*, 2013, no. 3, pp. 21-26 (in Russian).
9. Schneider J.A., Nunes A.C. Characterization of Plastic Flow and Resulting Microtextures in a Friction Stir Weld. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 2004, vol. 35, pp. 777-783. doi: 10.1007/s11663-004-0018-4
10. Mahoney M.W., Rhodes C.G., Flintoff J.G., Bingel W.H., Spurling R.A. Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 1998, vol. 29, iss. 7, pp. 1955-1964. doi: 10.1007/s11661-998-0021-5
11. Rubtsov V.E., Tarasov S.Yu., Kolubaev A.V. One-dimensional model of inhomogeneous shear in sliding. *Physical Mesomechanics*, 2012, vol. 15, iss. 5-6, pp. 337-341. doi: 10.1134/S1029959912030174
12. Kolubaev A.V., Tarasov S.Yu., Sizova O.V., Kolubaev E.A., Ivanov Yu.F. The evolution of the surface layers on metals in sliding friction. *Journal of Friction and Wear*, 2007, vol. 28, iss. 6, pp. 514-520. doi: 10.3103/S1068366607060050
13. Pavlova V.I., Alifrenko E.A., Osokin E.P. Issledovanie temperaturno-vremennykh uslovii svarochnogo nagreva, struktury i svoystv metalla stykovykh soedinenii iz alyuminievo-magnievogo splava, vypolnennykh svarkoi treniem s peremeshivaniem [Research of temperature-time conditions of welding heating, structure and properties of metal for edges joints of aluminium-magnesian alloy fulfilled with welding by friction with hashing]. *Voprosy Materialovedeniya (Problems of Materials Science) – Inorganic Materials: Applied Research*, 2009, no. 4 (60), pp. 74-88 (in Russian).
14. Lookin V.I., Ioda Ye.N., Bazeskin A.V., Lavrenchuk V.P., Kotelnikova L.V., Ogolodkov M. S. Povyshenie nadezhnosti svarnykh soedinenii iz vysokoprochnogo alyuminievo-litievogo splava V-1461 [Reliability improvement of the welded joints from the high-strength aluminium-lithium alloy V-1461 (B-1461)]. *Svarochnoe Proizvodstvo – Welding International*, 2010, no. 11, pp. 14-17 (in Russian).
15. Pugacheva N.B., Pavlyshko S.V., Trushina E.B., Zamyatin A.N. Issledovanie massoperenosa pri tribologicheskoy vzaimodeystvii legirovannykh stalei [Investigation of mass transfer during tribological interaction of alloyed steels]. *Trenie i Iznos – Journal of Friction and Wear*, 2012, vol. 33, no. 3, pp. 265-274 (in Russian).

Funding

This work was supported by project No. III.23.2.4 Basic Research Program III.23.2 SB RAS for 2013-2016., with the financial support of the Ministry of Education and Science (contract No. 02.G25.31.0063) as part of the RF Government Decree No. 218 and RFBR grant No. 14-08-31662.

Received 23 June 2014

Revised 23 July 2014

Accepted 25 July 2014