

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА EN AW 6082-T6

К. Красновский¹, Ю.А. Хохлова², М.А. Хохлов²

¹Институт сварки. 44-100, Польша, Гливице, ул. Бл. Чеслава, 16–18. E-mail: is@is.gliwice.pl

²ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

В статье представлены результаты исследования формирования макроструктуры и распределения механических свойств в сварных соединениях плоских образцов из алюминиевого сплава EN AW 6082-T6 толщиной 8 мм, полученных методом сварки трением с перемешиванием с применением трех типов специально разработанных пинов с заплечиками: С — цилиндрического резьбового пина и заплечика со спиральной канавкой; Т — цилиндрического резьбового пина с тремя канавками и заплечика со спиральной канавкой; S — гладкого цилиндрического пина без резьбы и плоского заплечика. Сварка трением с перемешиванием проводилась на оборудовании Института сварки в Гливице (Польша), а обработку образцов и механические испытания проводили в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Для механических испытаний индентированием использовали прибор «Микрон-гамма», позволяющий по предельным значениям соотношения твердости к модулю упругости Юнга экспериментально идентифицировать структурное состояние металла после измельчения и определить наличие деформационного упрочнения. Установлено, что для всех трех образцов твердость зоны термического влияния понижается, а в зоне термомеханического влияния твердость повышается. Максимальные значения твердости свойственны центральной части ядра сварных соединений, а также светлым овальным концентричным фрагментам структуры верхней и нижней части ядра. По наличию в ядре наноразмерной упрочненной структуры и равномерности ее распределения, а также хорошей рассеянности оксидных пленок и отсутствию несплошностей, оптимальным можно считать сварку трением с перемешиванием инструментом С-типа. Сделано предположение, что формирование равномерной структуры в сварных швах можно получать при трех-четырех оборотах сварки трением с перемешиванием инструмента на одном месте. Библиогр. 21, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, зона термомеханического влияния, ядро сварного шва, индентирование, индентор Берковича, модуль Юнга, физико-механические свойства

Технология сварки трением с перемешиванием (СТП) применяется для соединения различных сплавов магния, меди, титана, цинка и даже стали, но основное промышленное применение СТП — для стыкового соединения длинномерных деталей из алюминиевых сплавов (около 99 % всех соединений). Характеристики технологии СТП и ее преимущества, связанные с конкретным типом соединений или применением, являются предметом многочисленных публикаций [1–11]. В общем случае, при СТП вращающийся инструмент, оборудованный пином и заплечиком, медленно погружается между краями соединяемых элементов (касаясь друг друга) и перемещается вдоль линии сварки [5]. Тепло, необходимое для пластификации материала, генерируется трением между инструментом и соединяемыми материалами, вращательное и поступательное движение пина обеспечивает интенсивную пластическую деформацию нагретого размягченного материала перемещаться от кончика пина к плечу, создавая

непрерывную структуру соединения с обеих сторон соединяемых материалов.

Основные технологические параметры процесса СТП: скорость вращения инструмента и направление вращения, об/мин; линейная скорость сварки, мм/мин; угол наклона инструмента относительно поверхности свариваемых элементов, град.; тип инструмента и его размеры — диаметр пина и диаметр заплечика, мм [10].

Ключевым параметром, определяющим стандарт качества СТП соединений, является геометрия пина для перемешивания, которая обуславливает различные условия локального нагрева и взаимного массопереноса металла соединяемых элементов. Помимо пина, важным элементом СТП инструмента является заплечик, основной функцией которого является выделение тепла за счет трения между заплечиком и свариваемыми материалами, передача давления и образование деформаций в области поверхности сварного шва.

Считается, что после интенсивной скручивающей пластической деформации в ядре СТП шва

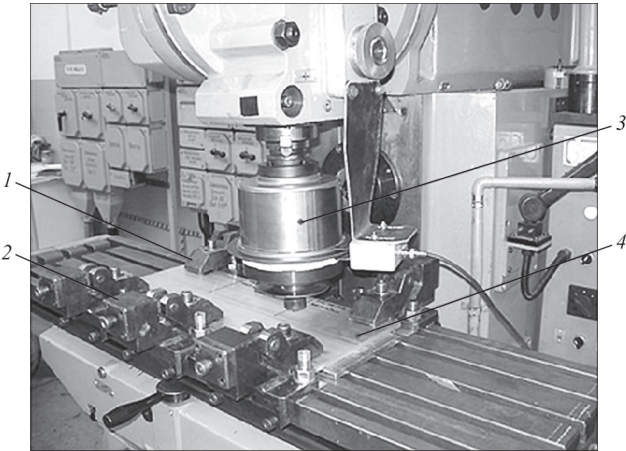


Рис. 1. Вид установки для сварки трением с перемешиванием: 1 — инструмент; 2 — крепеж; 3 — блок крепления инструмента; 4 — свариваемые части

происходит изменение характера межатомных взаимодействий и формирование близкой к наноразмерной структуры. Наряду с формированием наноструктуры, может происходить формирование метастабильных состояний, пересыщенных твердых растворов и метастабильных фаз. Также, за счет больших деформаций материала обеих кромок свариваемых деталей, термомеханическая зона может содержать сильно фрагментированную и разориентированную структуру рекристаллизованного аморфного состояния. Все это неизбежно сказывается на физических и химических свойствах зоны соединения. Поэтому представляет интерес исследование зависимости влияния ключевого параметра СТП — геометрии сварочного инструмента на формирование нанодисперсных зон сварных швов с минимальной дефектностью и равномерной структурой, что должно положительно влиять на прочность сварного соединения в целом.

Целью данной работы является определение оптимальной формы СТП инструмента по результатам локального исследования структуры и физико-механических свойств зоны термомеханического влияния в сварных швах, выполненных

с применением трех типов специально разработанных пинов с заплечиками. Для решения поставленной цели было проведено совместное исследование — СТП проводилась на оборудовании Института сварки в Гливице, а обработку образцов и механические испытания проводили в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. По результатам механических испытаний и соотношению твердости к модулю упругости Юнга, экспериментально идентифицировали структурное состояние зон сварных швов.

Оборудование, материалы и методы исследования. СТП проводилась на модифицированной фрезерной установке FYF32JU, оснащенной системой захвата и измерительной головкой контроля параметров процесса сварки (рис. 1).

Для сварки были выбраны образцы алюминиевого сплава 6082-T6 (аналог АД35) в виде плоских горячекатаных прутков длиной 10 см и толщиной 0,8 см. Термическая обработка сплава проведена при температуре около 540 °С, с последующим искусственным старением при 170 °С. Химический состав представлен в таблице.

Инструменты СТП трех типов (рис. 2) были специально изготовлены из быстрорежущей высокопрочной (на кручение) легированной стали HS6-5-2 повышенной износостойкости до 600 °С. По типу геометрических особенностей они классифицированы следующим образом:

- С — обычный инструмент «conventional» типа, состоящий из корпуса, цилиндрического резьбового пина и заплечика со спиральной канавкой;
- Т — инструмент типа «triflute», состоящий из корпуса, цилиндрического резьбового пина с тремя канавками и заплечика со спиральной канавкой;
- S — простой «simple» инструмент, состоящий из корпуса, гладкого цилиндрического пина без резьбы и плоского заплечика.

Химический состав алюминиевого сплава 6082, мас. % [12]

| Сплав | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|-------|-----------|--------|-----|-----------|-----------|---------|--------|--------|-----------|
| 6082 | 0,7...1,3 | до 0,5 | 0,1 | 0,4...1,0 | 0,6...1,2 | до 0,25 | до 0,2 | до 0,1 | Остальное |

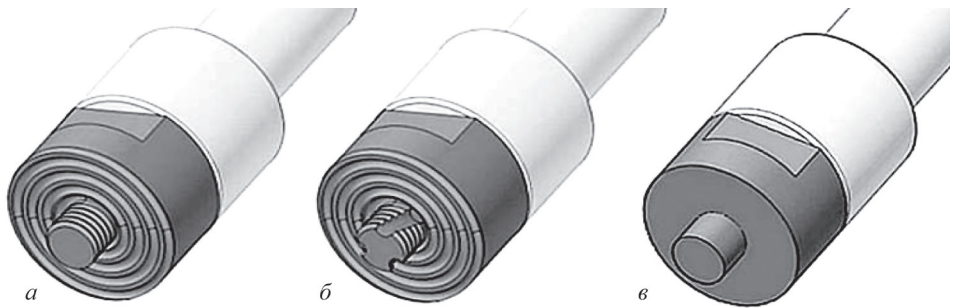


Рис. 2. Инструменты для сварки трением с перемешиванием: а — тип С; б — Т; в — S

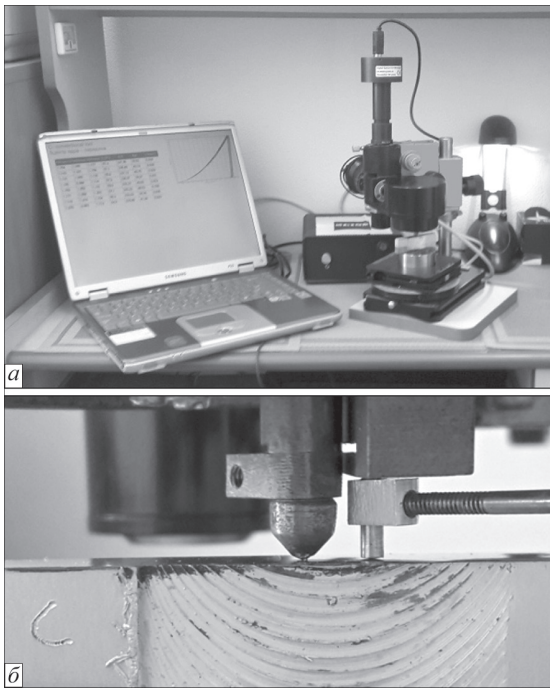


Рис. 3. Прибор «Микрон-гамма» (а) в процессе записи диаграммы непрерывного вдавливания индентора в материал (б)

Процесс СТП проводили в режиме: скорость вращения инструмента — 710 об/мин; линейная скорость сварки — 900 мм/мин; инструменты типа С, Т и S с длиной пина 7,8 мм; угол наклона инструмента по отношению к сварным заготовкам — $1,5^\circ$, направление вращения инструмента — по часовой стрелке. Указанные параметры обеспечили наиболее экономичный процесс с точки зрения скорости сварки. После сварки каждый шов проходил визуальную проверку соответствия стандарту с положительным результатом.

Для оптического исследования макроструктуры СТП соединений были приготовлены шлифы по стандартной для алюминиевых сплавов методике — поверхности образцов шлифовали на станке 3Е88ИМ наждачной бумагой разной зернистости (Р120 — 100...125 мкм, Р240 — 50...63, Р600 — 20...28, Р1200 — 10...14), полировали пастой ГОИ до зеркального блеска, промывали водой и спиртом, просушивали фильтровальной бумагой. Травление структуры проводили реактивом 5 мл HNO_3 , 30 мл CH_3COOH , 300 мл H_2O .

Для механических испытаний индентированием использовали прибор «Микро-гамма» (рис. 3, а), разработанный в лаборатории нанотехнологий аэрокосмического института Национального авиационного университета Украины. Индентирование — тест, основанный на методе Оливера и Фарра [13–16] для определения твердости H и модуля упругости E по диаграммам индентирования, которые фиксируются при непрерывном вдавливании алмазного трехгранного пирамидального индентора Берковича [17, 18] в соответ-

ствии с ISO/FDIS 14577-1: 2015; Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 1: Test method (ISO Central Secretariat, Geneva, Switzerland). Индентирование проводили на шлифованной поверхности образцов без травления при нагружении индентора 100 г (рис. 3, б).

По соотношению H/E экспериментально идентифицировали структурное состояние металла после измельчения и определяли наличие деформационного упрочнения. Известно, что все материалы в различном структурном состоянии, в зависимости от величины отношения твердости к модулю упругости (H/E) можно разместить в ряд, включающий три группы [19–21]. Первая группа — крупнокристаллические ($H/E < 0,04$), вторая — мелкокристаллические и наноматериалы ($H/E \approx 0,05...0,09$) и третья группа — материалы в аморфном и аморфно-кристаллическом состояниях ($H/E \geq 0,1$). Установление предельных значений величины H/E для различных структурных состояний облегчает идентификацию материала с неизвестным структурным состоянием.

Результаты и обсуждение. Наблюдаемые в сварных швах СТП (рис. 4) несимметричные стороны «набегающего» (AS) и «отхода» (RS), обусловлены несимметричностью скручивающей деформации металла и связаны с несимметричностью нахождения начальной точки касания инструмента при растущем давлении, а следовательно, и с различием распределения температурных полей нагрева при интенсивном механическом воздействии.

Типичным для всех трех образцов СТП является образование зоны ядра в центре соединений, которое содержит овальные концентричные фрагменты, различающиеся структурой. Образование овальных колец связано с особенностями перемешивания металла различными наконечниками инструмента. К ядру примыкает сложный профиль, который образует верхнюю часть шва. В результате травления шлифов выделились дефекты соединений в виде локальных несплошностей

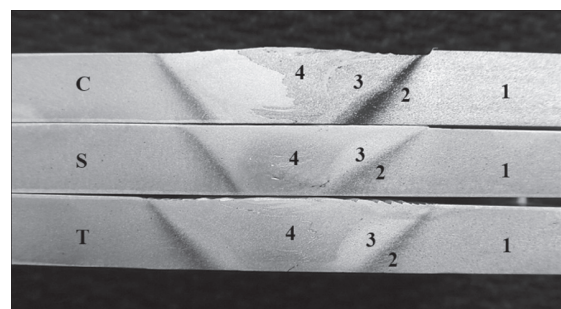


Рис. 4. Макроструктура и зоны СТП соединений алюминиевого сплава EN AW 6082-T6 толщиной 0,8 см (1–4 — описание см. в тексте)

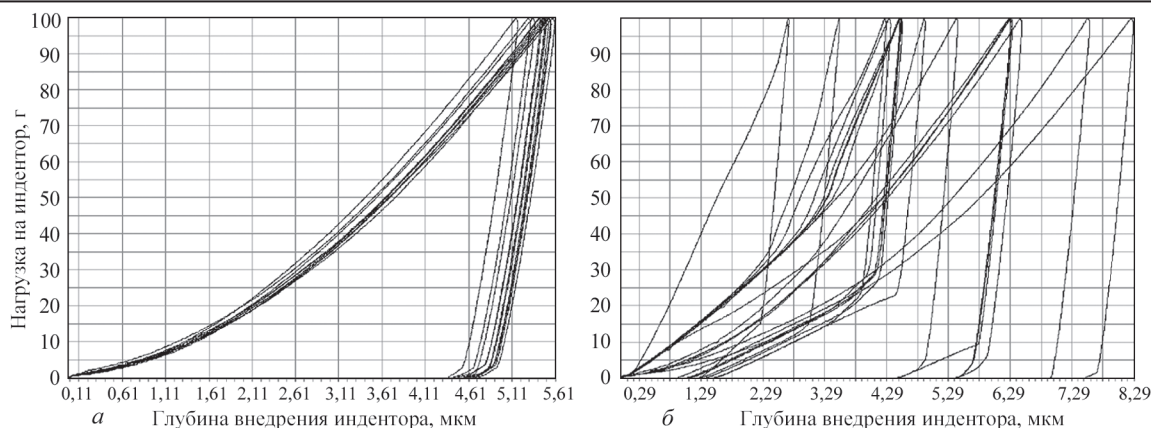


Рис. 5. Различные диаграммы индентирования основного металла (а) и различных зон термического влияния образца S-типа (б)

и полостей по линии, отделяющей центр ядра от окружающей его зоны термомеханического влияния. Эти полосы оксида алюминия присущи поверхностям свариваемых материалов, потому что не были достаточно механически распределены сварочным инструментом. Подобный тип дефекта типичен для швов СТП и зависит от линейной скорости сварки, т. е. при увеличении линейной скорости сварки рассеивание оксидов при механическом массопереносе увеличивается и дефектность снижается.

Еще один типичный горизонтальный дефект, вызванный недостаточным перемешиванием материалов, наблюдается в образце, полученном с применением гладкого инструмента S-типа, без

резьбы на цапфе инструмента. Причиной такого дефекта является то, что плоские поверхности инструмента при трении приводят к локальному перегреву металла до температуры плавления.

Таким образом, в сварном соединении сформированы четыре характерные для СТП зоны: непосредственно к зоне 1 (основной металл — ОМ) примыкает зона 2, где металл заготовок остается недеформированным и изменяет свою структуру только под воздействием нагрева (зона термического влияния — ЗТВ); зона 3, где металл подвергается значительным пластическим деформациям и нагреву (зона термомеханического влияния — ЗТМВ) и зона 4 — это ядро соединения, где происходит динамическая рекристаллизация.

Механический тест показал принципиальное, для швов СТП, отличие диаграмм индентирования основного металла (рис. 5, а) и различных зон (рис. 5, б), что характеризует присутствие измененного структурного состояния.

Для всех трех образцов твердость зоны 2 (ЗТВ) понижается. Максимальные значения твердости свойственны зоне 4 — центральной части ядра (рис. 6), а также светлым овальными концентричными фрагментами структуры верхней и нижней части ядра (рис. 6, а, в). Усредненные значения физико-механических свойств зонам СТП соединений трех типов следующие:

- зона 1 (ОМ) — $H = 1,2$ ГПа, $E = 70$ ГПа;
- зона 2 (ЗТВ) — $H = 0,5 \dots 1,0$ ГПа, $E = 45 \dots 57$ ГПа;
- зона 3 (ЗТМВ) — $H = 1,0 \dots 3,0$ ГПа, $E = 63 \dots 103$ ГПа;
- зона 4 (ядро) — $H = 2,0 \dots 7,0$ ГПа, $E = 80 \dots 161$ ГПа.

На рис. 6, б показано сварное соединение, полученное инструментом С-типа с цилиндрическим резьбовым пином и заплечиком со спиральной канавкой, в котором зафиксировано максимальное, для всех трех исследуемых образцов, значение твердости — 7,3 ГПа (светлый овальный

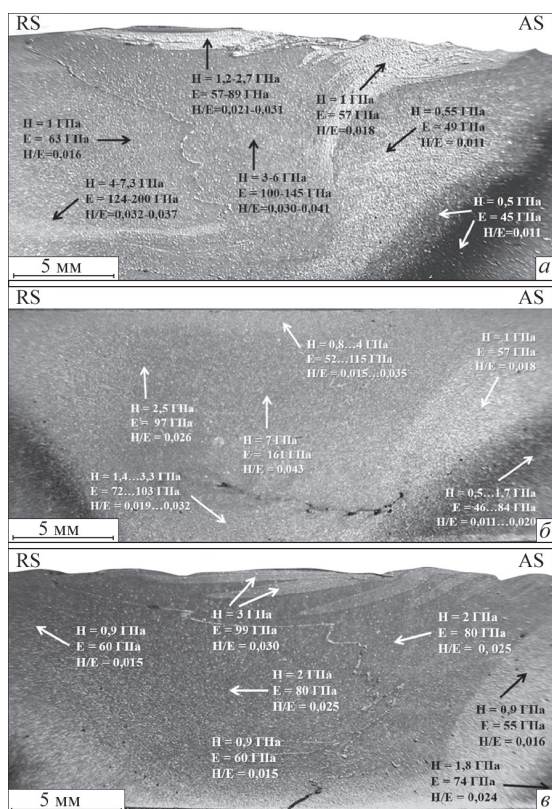


Рис. 6. Распределение твердости H , модуля упругости E и сопротивления деформации H/E в микроструктуре СТП шва С-типа инструмента (а); S-типа (б); T-типа (в)

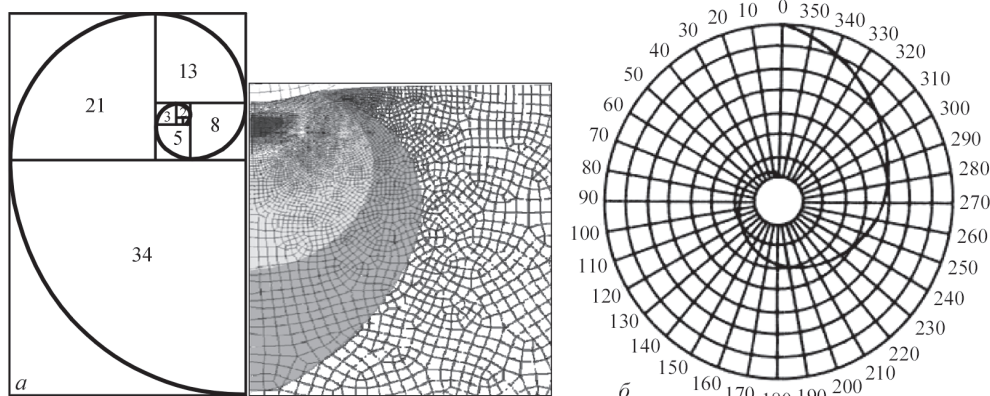


Рис. 7. Спираль Фибоначчи и модель СТП с масштабным изменением фрагментов структуры (а) и радианное изменение сегментов структуры при скручивании (б)

фрагмент нижней части ядра), также максимальные значения E до 200 ГПа и соотношение H/E до 0,041. Такие значения фиксируют присутствие нанодисперсной многофазной структуры, сформировавшейся при максимально высокой степени деформации. Подобная структура свойственна также 4-ой зоне ядра СТП швов: С-типа — H/E до 0,041; S-типа — H/E до 0,043 при исходном поликристаллическом структурном состоянии основного металла $H/E = 0,017$. Подобное упрочнение при измельчении зерен структуры обычно связывают с уменьшением плотности дислокаций и их торможением.

Таким образом, если считать преимуществом наличие в шве, выполненном СТП, наноразмерной упрочненной структуры и равномерность ее распределения, хорошую рассеянность оксидных пленок и отсутствие несплошностей, то оптимальным в данном исследовании является инструмент С-типа.

В процессе работы было сделано предположение, что, по степени измельчения до наноразмерности зерен структуры металла при скручивающей деформации, можно определить количество оборотов инструмента для СТП на одном месте. Если скручивающую деформацию рассматривать в виде спиральной математической пропорции Фибоначчи — 1, 2, 3, 5, 8, 13... (рис. 7, а), где полный оборот (раскручивание) — это последовательность из четырех значений, то в обратном направлении (скручивание) спирали существенное измельчение структуры получится уже после деформации на пол-оборота $0...180^\circ$ (рис. 7, б), а для создания однородной наноструктуры требуется деформация в несколько оборотов.

Приняв усредненным диаметром зерна измельченной структуры — 100 нм, а средним диаметром зерна исходного поликристаллического алюминия — 100 000 нм (0,1 мм), это соотношение составит 1:1000. Тогда, измельчение зерна в такой

обратной пропорции произойдет при трех-четыре оборотах СТП инструмента на одном месте:

1-й оборот — 1597, 987, 610, 377;

2-й оборот — 233, 144, 89, 55;

3-й оборот — 34, 21, 13, 8;

4-й оборот — 5, 3, 2, 1.

Технологически этим можно управлять, меняя скорость оборотов и/или линейную скорость перемещения инструмента при сварке, но обычно сварочное оборудование имеет фиксированную скорость, что ограничивает контроль.

Заключение

Исследованы физико-механические свойства сварных швов соединений из алюминиевого сплава EN AW 6082-T6, полученных сваркой трением с перемешиванием с использованием трех инструментов различной геометрической формы. Для всех трех образцов твердость зоны термического влияния понижается, а в зоне термомеханического влияния твердость повышается. Максимальные значения твердости свойственны центральной части ядра сварных соединений, а также светлым овальным концентричным фрагментам структуры верхней и нижней части ядра. По наличию в ядре сварных швов наноразмерной упрочненной структуры и равномерности ее распределения, а также хорошей рассеянности оксидных пленок и отсутствию несплошностей, оптимальным является СТП инструмент С-типа. Сделано предположение, что формирование равномерной структуры в сварных швах можно получать при трех-четыре оборотах инструмента для СТП на одном месте.

Список литературы/References

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C. et al. (1991) *Friction stir butt welding*. European Patent Specification 06 15 480 B1.
2. Dawes C.J. (1995) An introduction of friction stir welding and its development. *Welding & Metal Fabrication*, **63**, 13–16.
3. Mishra R.S., Ma Z.Y. (2005) Friction Stir Welding and Processing. *Mater. Sci. Eng.*, **50A**, 1–78.

4. Uday M.B., Ahmad Fauzi M.N., Zuhailawati H., Ismail A.B. (2010) Advances in Friction Welding Process: A Review. *Sci. Technol. Weld. Join.*, **15**, 534–558.
5. Krasnowski K., Sedek P., Lomozik M., Pietras A. (2011) Impact of selected FSW parameters on mechanical properties of 6082-T6 aluminium alloy butt joints. *Archives of Metallurgy and Materials*, **56**, **4**, 965–973.
6. Threagill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J. (2009) Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. *Int. Mater. Rev.*, **54**, **2**, 49–93.
7. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H. (2008) Recent Advances in Friction-Stir Welding: Process, Weldment Structure and Properties. *Prog. Mater. Sci.*, **53**, 980–1023.
8. Krasnowski K., Dymek S. (2013) A comparative analysis of the impact of tool design to fatigue behavior of single-sided and double-sided welded butt joints of EN AW 6082-T6 Al-alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **22**, **12**, 3818–3824.
9. Krasnowski K. (2014) Fatigue and static properties of friction stir welded aluminium alloy 6082 lap joints using Tri-flute-type and smooth tool. *Archives of Metallurgy and Materials*, **59**, **1**, 157–162.
10. Kalembe I., Kopyscianski M., Dymek S. (2010) Investigation of Friction Stir Welded Al–Zn–Mg–Cu Aluminum Alloys. *Steel Research International*, **81**, **9**, 1088–1096.
11. Mustafa B., Adem K. (2004) The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process. *Materials and Design*, **25**, 343–347.
12. Standard DIN EN 573-3:2009, *Aluminium and aluminium alloys. Pt 3: Chemical composition and form of wrought products. Chemical composition and form of products*.
13. Oliver W.C., Pharr G.M. (1992) An improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.*, **7**, 1564–1583.
14. Oliver W.C., Pharr G.M. (2004) Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Ibid.*, **19**, **1**, 3–21.
15. Хохлова Ю.А., Клочков И.Н., Гринюк А.А., Хохлов М.А. (2009) Верификация значений модуля упругости Юнга, получаемых микропиновой системой Микрон-гамма. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 30–32.
16. Хохлова Ю.А., Ищенко Д.А., Хохлов М.А. (2017) Индентирование от микро- до нанометрового уровня и примеры исследования свойств материалов с особой структурой. *Там же*, **1**, 30–36.
17. Khokhlova, Yu.A., Klochkov, I.N., Grinyuk, A.A., Khokhlov, M.A. (2009) Verification of Young's modulus determination using «Mikron-gamma» microprobe system. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 30–32 [in Russian].
18. Хохлова Ю.А., Ищенко Д.А., Хохлов М.А. (2017) Indentation from macro- to nanometer level and examples of investigation of properties of materials with a special structure. *Ibid.*, **1**, 30–36 [in Russian].
19. Nano indenters from micro star technologies. Revision 2.3. <http://www.microstartech.com>
20. Kazuhisa Miyoshi (2002) *Surface Characterization Techniques: An Overview* NASA/TM-2002-211497, 12–22.
21. Doener M.F., Nix W.D. (1986) Indentation problems. *J. Mater. Res.*, **1**, 601–614.
22. Горбань В.Ф., Мамека Н.А., Печковский Э.П., Фирстов С.А. (2007) Идентификация структурного состояния материалов методом автоматического индентирования. *Сб. докладов Харьковской нанотехнологической ассамблеи 23–27 апреля 2007 г., Харьков*. Наноструктурные материалы. Неклюдов И.М., Шпак А.П., Шулаев В.М. (ред.), Т. 1. сс. 52–55.
23. Gorban, V.F., Mameka, N.A., Pechkovsky, E.P., Firstov, S.A. (2007) Indentation of structural state of materials by automatic indentation method. In: *Proc. of Kharkov Nanotechnological Assembly (Ukraine, Kharkov, 23-27 April 2007)*. Ed. by I.M. Neklyudov et al. V.1. Nanostructural materials, 52–55 [in Russian].
24. Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Печковский Э.П., Мамека Н.А. (2007) Связь прочностных характеристик материалов с показателями автоматического индентирования. *Материаловедение*, **11**, 26–31.
25. Firstov, S.A., Gorban, V.F., Pechkovsky, E.P., Mameka, N.A. (2007) Relationship of strength characteristic with indexes of automatic indentation. *Materialovedenie*, **11**, 26–31 [in Russian].

ВПЛИВ ФОРМИ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ EN AW 6082-T6

К. Красновський¹, Ю.А. Хохлова², М.А. Хохлов²

¹Інститут зварювання. 44-100, Польща, Глівіце, вул. Бл. Чеслава, 16–18. E-mail: is@is.gliwice.pl

²ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

У статті представлено результати дослідження формування макроструктури та розподілу механічних властивостей в зварних з'єднаннях плоских зразків з алюмінієвого сплаву EN AW 6082-T6 товщиною 8 мм, отриманих методом зварювання тертям з перемішуванням із застосуванням трьох типів спеціально розроблених пинів із заплечиками: С — циліндричного пина і заплечика зі спіральною канавкою; Т — циліндричного пина з трьома канавками і заплечика зі спіральною канавкою; S — гладкого циліндричного пина без різьблення і плоского заплечика. Зварювання тертям з перемішуванням проводилось на обладнанні Інституту зварювання в Глівіце (Польща), а обробку зразків і механічні випробування проводили в ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. Для механічних випробувань індентуванням використовували прилад «Мікрон-гамма», що дозволяє по граничних значеннях співвідношення твердості до модуля пружності Юнга, експериментально ідентифікувати структурний стан металу та визначити наявність деформаційного зміцнення. Встановлено, що для всіх трьох зразків твердість зони термічного впливу знижується, а в зоні термомеханічного впливу твердість підвищується. Максимальні значення твердості властиві центральній частині ядра зварних з'єднань, а також світлим овальним концентричним фрагментам структури верхньої та нижньої частини ядра. За наявності в ядрі нанорозмірної зміцненої структури та рівномірності її розподілу, а також хорошому розсіюванню оксидних плівок і суцільності з'єднання, оптимальним можна вважати зварювання тертям з перемішуванням інструментом С-типу. Зроблено припущення, що формування рівномірної структури в зварних швах можна отримувати за три-чотири оберта зварюванням тертям з перемішуванням інструменту на одному місці. Бібліогр. 21, табл. 1, рис. 7

Ключові слова: зварювання тертям з перемішуванням, зона термомеханічного впливу, ядро зварного шва, індентування, індентор Берковича, модуль Юнга, фізико-механічні властивості

INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE TOOL FOR FRICTION STIR WELDING ON PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF WELDS OF ALUMINIUM ALLOY EN AW 6082-T6

K. Krasnovski¹, Yu.A. Khokholova², M.A. Khokholov²

¹Institute of Welding, 16-18 Bl. Czeslava str., Gliwice, 44-100, Poland

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150 Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents the results of studying the formation of macrostructure and distribution of mechanical properties in welded joints of flat samples from aluminium alloy EN AW 6082-T6 8 mm thick, produced by the method of friction stir welding with application of three types of specially designed pins with shoulders: C — cylindrical threaded pin and shoulder with a spiral groove; T — cylindrical threaded pin with three grooves and shoulder with a spiral groove; S — smooth cylindrical pin without thread and flat shoulder. Friction stir welding was conducted in the equipment of the Institute of Welding in Gliwice (Poland), and treatment and mechanical testing were conducted at PWI. Mechanical testing by indentation was performed in Micron-gamma instrument, which allows experimental identification of the structural state of metal after refinement and determination of the presence of strain ageing by limit values of the ratio of hardness to Young's modulus of elasticity. It is found that for all the three samples HAZ hardness decreases, and in the thermomechanical impact zone hardness increases. Maximum hardness values are inherent to the central part of welded joint nugget, as well as to light-coloured oval concentrated fragments of the structure in the nugget upper and lower part. Judging by the presence of nanosized strengthened structure and uniformity of its distribution in the nugget, as well as good dispersion of oxide films and absence of discontinuities, friction stir welding with C-type tool can be regarded as the optimum variant. An assumption was made that formation of a uniform structure in welds can be achieved at three-four rotations of the tool in friction stir welding in one spot. 21 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: friction stir welding, thermomechanical impact zone, weld nugget, indentation, Berkovich indenter, Young's modulus, physico-mechanical properties

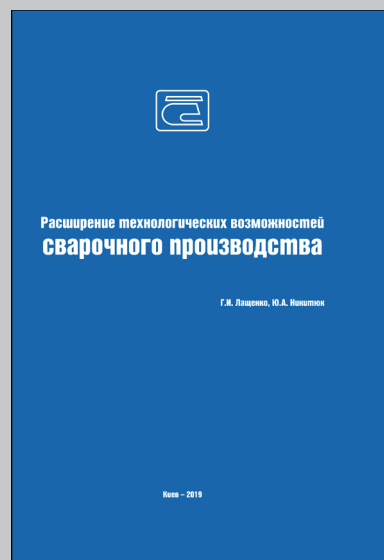
Поступила в редакцию 06.03.2019

Лащенко Г.И., Никитюк Ю.А. Расширение технологических возможностей сварочного производства. Киев, 2019. — 360 стр.

Рассмотрена роль сварочного производства в развитии национальной экономики. Проанализировано состояние и пути трансформации украинской экономики. Освещены тенденции и тренды развития современного сварочного производства. Изложены основы разработки технологии сварки. Дана характеристика способов и приемов сварки плавлением. Проанализировано использование принципа комбинирования для расширения технологических возможностей заготовительных, сборочных и сварочных операций.

Приведены технологические возможности сварки трением с перемешиванием и родственных процессов. Освещены особенности малоэнергоёмких технологий послесварочной обработки металлоконструкций с помощью вибронагружения и поверхностного пластического деформирования.

Для инженерно-технических работников, занятых в сварочном производстве. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам сварочных специальностей вузов.



Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка»
(тел. 200-82-77).