

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОЛИСТОВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

**А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, С. И. МОТРУНИЧ, И. Н. КЛОЧКОВ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выполнен комплекс исследований по изучению прочностных характеристик сварных стыковых соединений конструкционного алюминиевого сплава Д16 толщиной 2 мм, полученных сваркой трением с перемешиванием. Показано, что применение сварки трением с перемешиванием обеспечивает формирование неразъемного соединения с минимальным уровнем концентрации напряжений в местах перехода от шва к основному материалу и позволяет избежать образования в швах дефектов в виде пор, макровключений оксидной пленки и горячих трещин, обусловленных расплавлением и кристаллизацией металла при сварке плавлением. В результате интенсивной пластической деформации металла в шве формируется однородная дезориентированная структура с размером зерен 3...4 мкм и дисперсными фазовыми выделениями не более 1 мкм, а на прилегающих к нему участках в зоне термомеханического воздействия происходит удлинение и искривление зерен в направлении перемещения пластифицированного металла. Благодаря этому повышаются твердость металла в зоне соединения, предел прочности при одноосном растяжении и усталостная прочность при циклических нагрузках. Библиогр. 11, рис. 6.

*Ключевые слова:* сварка трением с перемешиванием, алюминиевый сплав Д16, твердость, предел прочности, сопротивление усталости

Алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом авиакосмической техники и широко применяются при изготовлении различных видов транспорта, обеспечивая прочность, долговечность и весовую эффективность конструкций. К наиболее распространенным алюминиевым сплавам можно отнести сплав Д16 системы Al–Cu–Mg, имеющий хорошее сочетание характеристик выносливости, вязкости разрушения и сопротивления росту усталостной трещины. Однако из-за повышенной склонности к образованию кристаллизационных трещин он относится к сплавам, несваривающихся методами плавления [1–3].

Избежать расплавления металла в зоне образования неразъемного соединения удастся при использовании разработанного в 1991 г. в Британском институте нового способа сварки трением с перемешиванием (СТП) [4]. Формирование шва происходит в твердой фазе в результате нагревания за счет трения небольшого объема металла до пластического состояния, перемешивания его по всей толщине свариваемых кромок и деформирования в замкнутом пространстве. Благодаря этому процесс СТП имеет существенные преимущества по сравнению со сваркой плавлением. В первую очередь это отсутствие в сварных соединениях дефектов в виде пор, макровключений оксидной пленки и горячих трещин, формирование мелкокристаллической структуры швов, снижение уровня разупрочнения со-

единяемых материалов и повышение механических свойств соединений [5–9].

Цель данной работы — определить механические свойства и характеристики сопротивления усталости стыковых соединений тонколистового алюминиевого сплава Д16, полученных СТП.

**Методика проведения исследований.** Для исследований использовали листы конструкционного алюминиевого сплава Д16 толщиной 2 мм. СТП стыковых соединений листов толщиной 2 мм осуществляли со скоростью 10 м/ч на разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона лабораторной установке. Скорость вращения специального инструмента [10] с коническим наконечником и буртом диаметром 12 мм составляла 1420 об/мин. Для сравнения такие же соединения получали аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом (АДСНЭ) со скоростью 20 м/ч на токе 165 А с помощью установки MW-450 («Fronius», Австрия). В качестве присадки использовали полосу из основного материала, чтобы не вносить изменений в химический состав металла шва. При этом ширина швов, полученных АДСНЭ, составляла в среднем 6,5 мм, а СТП — 3,5 мм (при ширине зоны термомеханического воздействия с лицевой стороны шва около 12 мм).

Из полученных сварных соединений изготавливали шлифы для исследования структуры и образцы с шириной рабочей части 15 мм для определения предела прочности при одноосном

растяжении в соответствии с ГОСТ 6996–66. Механические испытания образцов осуществляли на универсальном сервогидравлическом комплексе MTS 318.25. Циклические испытания проводили при осевых нагрузках по синусоидальному циклу с коэффициентом асимметрии  $R_\sigma = 0,1$  и частоте 15 Гц до полного разрушения образцов. Экспериментальные данные усталостных испытаний обрабатывались методами линейного регрессионного анализа, общепринятыми для такого рода исследований. По результатам проведенных испытаний для каждой серии образцов на основе установленных ограниченных пределов выносливости строилась соответствующая кривая усталости — линия регрессии в координатах  $2\sigma_a - \lg N$ . Твердость металла измеряли на лицевой поверхности зачищенных соединений. Степень разупрочнения металла в зоне сварки оценивали на приборе «ROCKWELL» при нагрузке  $P = 600$  Н. Оценку структурных особенностей сварных соединений осуществляли с помощью оптического электронного микроскопа МИМ-8.

**Результаты исследований и их обсуждение.**

В результате проведенных исследований установлено, что форма и размеры шва при СТП благоприятно отличаются от полученного сваркой плавлением благодаря формированию шва на подкладке без формирующей канавки и образованию неразъемного соединения без применения присадочной проволоки (рис. 1). Отсутствие на нем усиления и проплава позволяет избежать высоких уровней концентрации напряжений в местах перехода от шва к основному материалу, негативно влияющих на эксплуатационно-ресурсные характеристики сварных соединений.

Кроме того, образование неразъемных соединений в твердой фазе без расплавления основного материала препятствует появлению характерных дефектов, возникающих при сварке алюминиевых сплавов плавлением. Так, отсутствие расплавленного металла, в котором растворимость водорода резко повышается, позволяет избежать дополни-

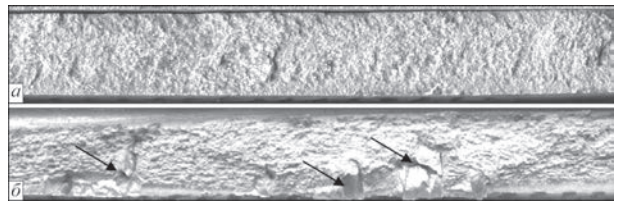


Рис. 2. Продольные изломы швов сплава Д16 толщиной 2 мм, выполненных СТП (а) и АДСНЭ (б) с макровключениями оксидной пленки (указаны стрелками)

тельного насыщения им зоны сварки за счет миграции этого газа из прилегающих слоев металла и образования пор. А деформирование и интенсивное перемешивание пластифицированного металла по всей толщине свариваемых кромок в процессе сварки способствует дроблению находящихся на них оксидных пленок. Отсутствие при этом расплавленного металла в зоне образования неразъемного соединения позволяет избежать его окисления в процессе сварки. Поэтому в швах, полученных СТП, отсутствуют дефекты в виде макровключений оксидной пленки, возникающие по разным причинам [11] при АДСНЭ алюминиевых сплавов (рис. 2).

Наиболее опасными и недопустимыми дефектами для конструкций ответственного назначения являются горячие трещины, образующиеся в процессе кристаллизации расплавленного металла в месте скопления легкоплавких эвтектических включений. Проведенные исследования показали, что при АДСНЭ образцов Хоулдрокфта из сплава Д16 образование горячих трещин происходит в центральной части шва (рис. 3). Поскольку при СТП шов формируется в твердой фазе и процессы плавления и кристаллизации металла отсутствуют, то образования таких дефектов удается полностью избежать.

Особенности формирования швов при СТП благоприятно сказываются и на степени разупрочнения металла в зоне образования неразъемных соединений. Так, измерения твердости металла в зоне формирования неразъемного соединения показали, что при сварке сплава Д16 СТП твердость металла шва

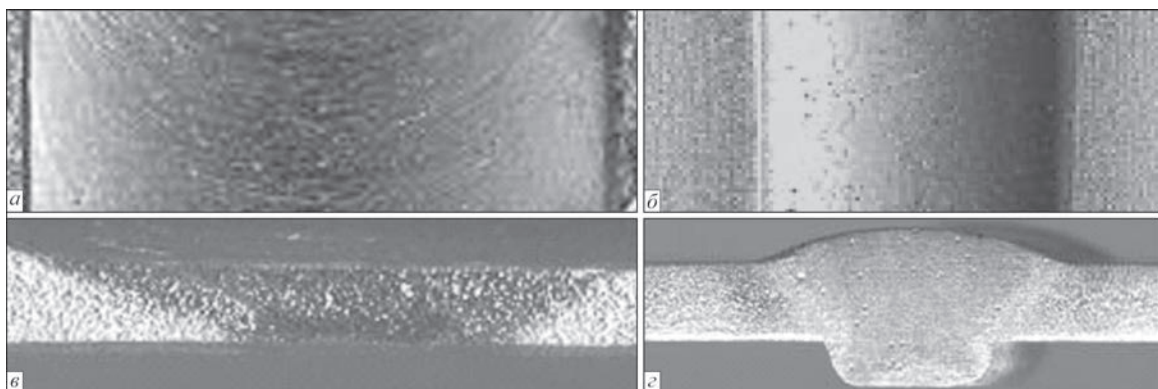


Рис. 1. Внешний вид лицевой поверхности (а, б) и поперечные сечения (в, г) швов сплава Д16 толщиной 2 мм, полученных СТП (а, в) и АДСНЭ (б, г)

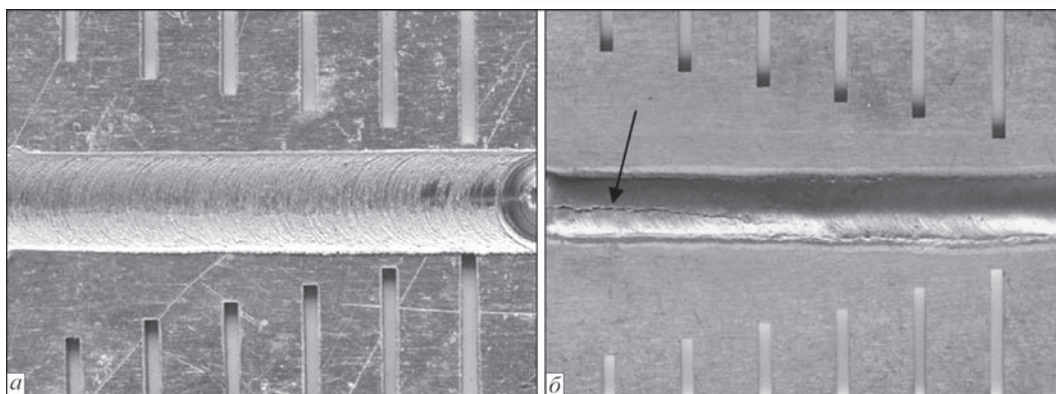


Рис. 3. Образцы Хоплдрокфта из сплава Д16 толщиной 2 мм, полученные СТП (а) и АДСНЭ (б) с кристаллизационной трещиной (указана стрелкой)

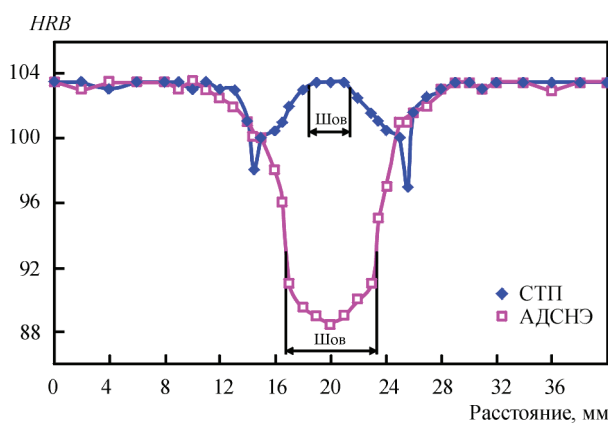


Рис. 4. Распределение твердости в сварных соединениях сплава Д16 толщиной 2,0 мм, полученных СТП и АДСНЭ

находится практически на уровне основного материала (рис. 4). В зоне термомеханического воздействия твердость металла постепенно снижается при удалении от шва, достигая минимального значения ( $HRB$  97...98) у границы зоны термического влияния. Тогда как при АДСНЭ с использованием в качестве присадки полоски основного материала Д16 минимальная твердость металла в центральной части шва составляет всего  $HRB$  89...90. При этом в зоне сплавления шва с основным материалом твердость металла находится на уровне  $HRB$  92...94.

Поэтому при одноосном статическом растяжении образцы сварных соединений, полученные СТП, имеют наиболее высокий (425 МПа) предел

прочности и разрушаются вблизи границы примыкания зоны термомеханического воздействия к зоне термического влияния, где металл имеет минимальную твердость. Минимальный (295 МПа) предел прочности наблюдается у образцов со снятыми усилениями и проплавами швов, выполненных АДСНЭ. Разрушаются они по шву, представляющему собой литой металл, имеющий наименьшую твердость. Образцы с усилением шва имеют предел прочности на уровне 330 МПа и разрушаются в зоне сплавления шва с основным материалом, где возникает максимальный уровень концентрации напряжений (рис. 5, а–в).

При циклических нагрузках в образцах сварных соединений, выполненных АДСНЭ, зарождение усталостных трещин происходит в месте максимальной концентрации напряжений в зоне сплавления шва с основным материалом. Отсутствие усиления шва на образцах, выполненных СТП, позволяет избежать высокой концентрации напряжений в месте сопряжения шва с основным материалом. Однако в них на поверхности наблюдается небольшая геометрическая неоднородность у края зоны термомеханического воздействия, которая образуется вследствие погружения бурта инструмента в свариваемый металл. Поэтому зарождение усталостных трещин в образцах таких сварных соединений происходит именно в этом месте (рис. 5, з, д).

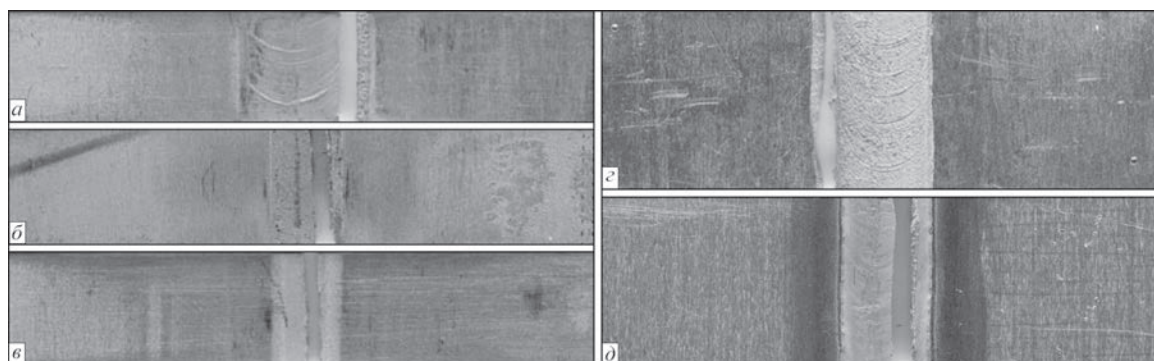


Рис. 5. Фрагменты разрушенных при одноосном статическом растяжении (а–е) и циклическом нагружении (з, д) образцов сварных соединений, полученных СТП (а, з) и АДСНЭ (б, д — с усилением шва; в — без усиления шва)

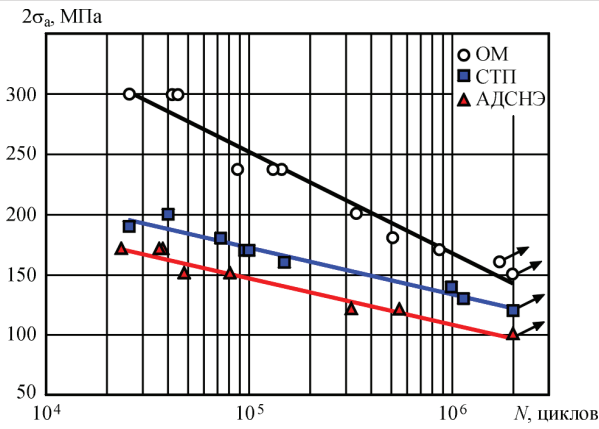


Рис. 6. Кривые усталости основного материала и сварных соединений алюминиевого сплава Д16, толщиной 2 мм при асимметрии цикла нагружения  $R_\sigma = 0,1$  (ОМ — основным металлом)

В результате проведенных усталостных испытаний было установлено, что граница ограниченной выносливости, сварных соединений, полученных в твердой фазе трением с перемешиванием, на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен нагружения составляет 120 МПа, что составляет 85 % соответствующих показателей для основного металла (рис. 6). Характеристики сопротивления усталости находятся выше значений для соединений, выполненных АДСНЭ, во всей области долговечностей  $10^5 \dots 2 \cdot 10^6$  циклов перемен нагружения, а их ограниченный предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов составляет 110 МПа, что на 15 % ниже, чем для соединений, выполненных СТП. К снижению показателей долговечности сварных соединений, выполненных АДСНЭ, главным образом, приводит снижение твердости в металле шва, высокая концентрация действующих напряжений, обусловленная геометрическими параметрами шва, и образование остаточных сварочных напряжений.

**Выводы**

1. Применение СТП обеспечивает формирование неразъемного соединения с минимальным уровнем концентрации напряжений в местах перехода от шва к основному материалу и позволяет избежать образования в швах дефектов в виде пор, макровключений оксидной пленки и горячих трещин.
2. Физико-механические свойства соединений, выполненных СТП, превышают таковые для соединений, выполненных способом АДСНЭ.

**Список литературы**

1. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Технология легких сплавов. – 2002. – № 4. – С. 12–17.
2. Швечков Е. И., Захаров В. В., Ростова Т. Д. К вопросу о выборе марки алюминиевого сплава для обшивочных листов // Там же. – 2003. – № 1. – С. 17–21.

3. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Крызов; под общ. ред. РАН И. Н. Фридляндера – К.: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
4. Friction Stir Butt Welding: Int. Pat. Application № PCT/GB 92/02203; GB Pat. Application № 9125978.8. – Publ. 1991.
5. Pietras A., Zadroga L. Rozwój metody zdrzewania tarcowego z mieszaniami materiału zgrzeiny (FSW) i możliwości jej zastosowania // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. – 2003. – № 5. – P. 148–154.
6. Defalco J. Friction Stir Welding VS. Fusion Welding // Welding Journal. – 2006. – № 3. – P. 42–44.
7. Enomoto M. Friction Stir Welding: research and industrial applications // Welding International. – 2003. – № 5. – P. 341–345.
8. Sato Y. Relationship between Mechanical Properties and Microstructure in Friction Stir Welded Al alloys // Journal of the Japan Welding Society. – 2002. – № 8. – P. 33–36.
9. Shibayanagi T. Microstructural aspects in friction stir welding // Journal of Japan Institute of Light Metals. – 2007. – № 9. – P. 416–423.
10. Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів: пат. 54096 Україна, МПК В23К 20/12; заявник і патентовласник ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. – № 2 у 2010 05315; заяв. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
11. Покляцький А. Г. Особенности образования макровключений оксидной пленки в металле швов алюминиевых сплавов (Обзор) // Автоматическая сварка. – 2001. – № 3. – С. 38–40.

А. Г. Покляцький, С. І. Мотруніч, І. М. Ключков

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ  
СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ТОНКОЛИСТОВОГО  
АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ Д16, ОТРИМАНИХ  
ЗВАРЮВАННЯМ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ**

Виконано комплекс досліджень з вивчення міцності зварних стикових з'єднань конструкційного алюмінієвого сплаву Д16 товщиною 2 мм, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням. Показано, що застосування зварювання тертям з перемішуванням забезпечує формування нероз'ємного з'єднання з мінімальним рівнем концентрації напружень в місцях переходу від шва до основного матеріалу і дозволяє уникнути утворення у швах дефектів у вигляді пор, макровключень оксидної пленки та горячих тріщин, обумовлених розплавленням і кристалізацією металу під час зварювання плавленням. В результаті інтенсивної пластичної деформації металу у шві формується однорідна дезорієнтована структура з розміром зерен 3...4 мкм і дисперсними фазовими виділеннями не більше 1 мкм, а на прилеглих до нього ділянках в зоні термомеханічного впливу відбувається подовження та викривлення зерен у напрямку переміщення пластифікованого металу. Завдяки цьому підвищуються твердість металу в зоні з'єднання, межа міцності при одноісному розтягу та втомна міцність при циклічних навантаженнях. Бібліогр. 11, рис. 6.

*Ключові слова:* зварювання тертям з перемішуванням, алюмінієвий сплав Д16, твердість, межа міцності, опір втомі

Поступила в редакцію 20.02.2017