

СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ — ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ*

А.Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А.Я. ИЩЕНКО, А.А. ЧАЙКА, инж.,
Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные преимущества формирования швов в твердой фазе в результате пластической деформации металла при сварке алюминиевых сплавов трением с перемешиванием. Приведены примеры использования этого процесса в развитых странах для изготовления сварных конструкций в различных отраслях машиностроения и достигнутая за счет этого экономия ресурсов. Проанализированы структура, степень разупрочнения, прочность, показатели сопротивления при внецентренном растяжении образцов и уровни остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях высокопрочных алюминиевых сплавов, полученных трением с перемешиванием и аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом.

Ключевые слова: высокопрочные алюминиевые сплавы, сварка трением с перемешиванием, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, микроструктура, твердость, прочность, внецентренное растяжение

Основной характеристикой любой промышленной конструкции является способность обеспечивать необходимую работоспособность при заданных условиях эксплуатации на протяжении определенного срока. Часто для достижения поставленной цели при изготовлении конструкций приходится применять новые материалы, уникальные технологии производства и различные методы соединения отдельных элементов и узлов. Каждая из этих составляющих существенно влияет на стоимость готовых изделий и в значительной степени определяет их эксплуатационные характеристики.

Деформируемые и термически упрочняемые алюминиевые сплавы довольно широко применяются в качестве конструкционных материалов. Благодаря высокой удельной прочности, хорошей коррозионной стойкости, надежному сопротивлению повторным нагрузкам и малой скорости развития трещин усталости эти материалы используют при создании авиационной техники, космических аппаратов, водного и наземного транспорта [1–3]. Для получения неразъемных соединений при изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов применяют различные способы сварки. Однако в большинстве случаев формирование шва происходит за счет расплавления некоторого объема свариваемого металла

и подающейся в зону сварки проволоки с последующей их кристаллизацией в инертной защитной среде. Нагрев металла до температуры плавления приводит к существенным фазовым и структурным превращениям, вызывает значительную пластическую деформацию соединений и способствует возникновению в них больших остаточных напряжений. В зоне сварки основной металл разупрочняется, а шов имеет литую крупнокристаллическую структуру, что приводит к резкому снижению предела прочности сварного соединения. Кроме того, в процессе кристаллизации расплава по местам выделения вторичных легкоплавких фаз может происходить межкристаллитное разрушение швов [4]. Следовательно, если осуществлять процесс сварки без разогрева металла до температуры плавления, можно избежать многих перечисленных выше недостатков.

Одним из перспективных способов получения неразъемных соединений в твердой фазе является сварка трением с перемешиванием (СТП). При этом принцип образования шва основан на нагреве небольшого объема металла до пластического состояния за счет трения, перемешивания его по всей толщине свариваемых кромок и деформирования в замкнутом пространстве [5]. Поэтому процесс СТП имеет ряд существенных преимуществ по сравнению со сваркой плавлением [6, 7]:

- формирование шва в твердой фазе позволяет избежать образования горячих трещин, макровключений оксидной пленки, пор и других дефектов, обусловленных расплавлением и кристаллизацией металла при сварке плавлением;

- нагрев металла в зоне сварки за счет трения исключает ультрафиолетовое излучение дуги, вы-

* Статья подготовлена по результатам выполнения комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2007–2009 гг.).



деление дыма и паров металла и снижает уровень шума;

- формирование неразъемного соединения без расплавления металла можно осуществлять без применения защитного газа и выполнять сварку в любом пространственном положении;

- отсутствие дугового разряда и расплавленного металла исключает потерю легирующих элементов в шве и необходимость повышения их содержания в нем в результате применения присадочных материалов;

- перемешивание пластифицированного металла при избыточном давлении в ограниченном объеме приводит к дроблению макрочастиц оксидных включений, при этом требования к предварительной подготовке поверхностей свариваемых кромок снижаются;

- проникновение наконечника инструмента на всю глубину стыка позволяет сваривать металл различной толщины без специальной разделки кромок;

- протекание процесса сварки при более низких температурах приводит к уменьшению степени разупрочнения материала и уровня остаточных деформаций в конструкциях;

- повышение эффективности использования энергии при СТП и уменьшение температуры нагрева металла в зоне сварки снижают энергоемкость процесса по сравнению со сваркой плавлением;

- возможность легкой автоматизации процесса сварки, что обеспечивает стабильное качество швов без высокой квалификации оператора.

Благодаря таким преимуществам процесс СТП открывает более широкие технологические возможности для изготовления сварных конструкций из сплавов, соединить которые сваркой плавлением невозможно из-за образования горячих трещин в швах; обеспечения более высокого уровня прочности сварных соединений термически упрочняемых и нагартованных алюминиевых сплавов; соединения метастабильных сплавов, полученных быстрой кристаллизацией металла из расплава, композитов и наноматериалов; получения сварных узлов, которые нецелесообразно экономически или невозможно практически прессовать или отливать целиком, из серийно изготавливаемых отдельных профилей; изготовления практически без деформаций крупных легковесных панелей в судостроении, производстве железнодорожных платформ и т. д.

Благодаря своим преимуществам процесс СТП находит все большее применение во многих развитых странах мира. В судостроении и в железнодорожном транспорте изготавливают крупногабаритные интегрированные панели, сваренные трением с перемешиванием из отдельных эк-

струдированных или прессованных профилей [8, 9]. В автомобильной промышленности этот процесс применяют для производства пространственных рам автомобилей, мотоциклов и велосипедов, кузовов грузовиков, корпусов и напольных покрытий автобусов, фургонов и прицепов, элементов шасси, дисков колес и т. п. [10]. Применение сварки СТП компанией «Boeing» позволило сократить время изготовления топливных баков ракет «Delta» и уменьшить на порядок количество дефектов в швах по сравнению со сваркой плавлением. Авиакомпания «Eclipse Aviation» успешно использует этот способ сварки для соединения узлов фюзеляжа и кабины пятиместного самолета бизнес-класса Eclipse 500, а компания «Airbus» исследует возможности процесса с целью применения его при изготовлении фюзеляжа, вертикальных стабилизаторов и крыльев самолетов «A3xx Airbus» [11]. На предприятиях космического агентства США (NASA) СТП выполнено около полумили швов на внешнем баке ракеты-носителя космического челнока «Shuttle» [12].

Об эффективности использования этого ресурсосберегающего процесса свидетельствуют полученные в США результаты статистических исследований. Выполнение около 10 % всего объема сварочных операций трением с перемешиванием в 2005 г. позволило сэкономить $1,35 \cdot 10^{16}$ Дж энергии и 20000 т защитного газа, а общая экономия составила свыше 4,9 млрд дол. США. Хотя главным достоинством процесса СТП в NASA по праву считают улучшение условий труда сварщиков и персонала, непосредственно занятого в производстве сварных конструкций [11, 12].

Целью работы являлась оценка эксплуатационных и ресурсных характеристик сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП.

Для проведения исследований использовали листы толщиной 1,8 мм из высокопрочных алюминиевых сплавов АМг6, 1201, 1420 и 1460. СТП стыковых соединений осуществляли на сконструированной в ИЭС им. Е.О. Патона лабораторной установке, используя специальный инструмент с диаметром бурта 12 мм и коническим наконечником. Скорость вращения инструмента составляла 1420 об/мин, а линейного перемещения его вдоль стыка 8...14 м/ч. Для сравнения такие же образцы сваривали автоматической аргодуговой сваркой неплавящимся электродом (АДСНЭ) в аргоне со скоростью 20 м/ч от установки MW-450 («Fronius», Австрия) на токе 130...145 А с присадочными проволоками диаметром 1,6 мм. Из полученных сварных соединений изготавливали образцы для измерения твердости, исследования структуры, определения их прочности при одноосном растяжении и оценки показателей сопротивления разрушению при внецентренном нагружении. Твердость металла на сварных соедине-

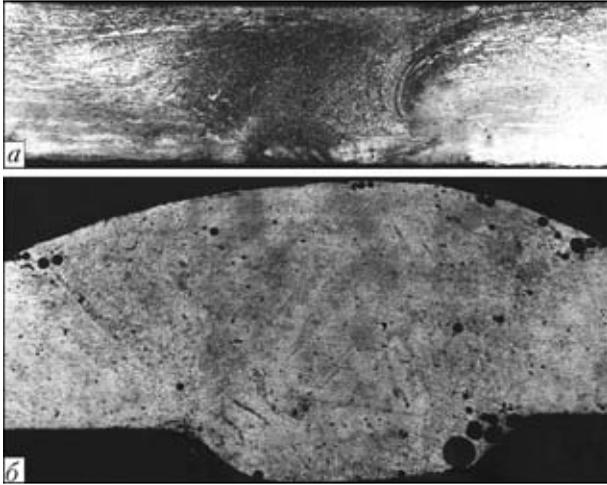


Рис. 1. Поперечные макрошлифы ($\times 12$) сварных соединений алюминиевого сплава 1460, полученных СТП (а) и АДСНЭ с присадкой Св1201 (б)

них измеряли со стороны лицевой поверхности швов, предварительно зачистив усиление и проплав заподлицо с основным металлом. При этом ширина швов, сваренных плавлением, составляла в среднем 6,5 мм, а трением с перемешиванием — 3,5 мм (при ширине зоны термомеханического воздействия (ЗТМВ) 11 мм). Степень разупрочнения металла в зоне сварки оценивали по результатам измерения его твердости на приборе «ROSKWELL» при нагрузке 600 Н и диаметре шарика 1/16". Для исследования микроструктуры полученных соединений использовали оптический микроскоп МИМ-8М. Уровень остаточных напряжений и пластических деформаций, возникающих в продольном направлении стыка, определяли по изменению базового расстояния (25 мм) после сварки и разрезания образцов.

Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить особенности соединений, полученных в твердой фазе и сваркой плавлением. По внешнему виду макрошлифов швов сплава 1460 на рис. 1 видно, что СТП является ресурсосберегающей технологией. Формирование неразъемного соединения при СТП осуществляется

только за счет основного металла, при этом присадочного материала не требуется. Кроме того, следует учитывать, что зону сварки не нужно защищать инертным газом. А поскольку процесс сварки осуществляется в твердой фазе без расплавления металла, то при этом снижаются энергетические затраты.

Термомеханические условия, при которых происходит формирование соединений при СТП, способствуют образованию специфической мелкокристаллической структуры швов и прилегающих к нему участков (рис. 2). В отличие от литой структуры швов, образующихся при сварке плавлением, швы, полученные трением с перемешиванием, имеют деформированную структуру. Центральная часть (ядро) шва формируется вокруг наконечника инструмента при высоком давлении и повышенной температуре, вследствие чего происходит динамическая рекристаллизация зерен и образование мелких равноосных кристаллов. В непосредственно примыкающей к ядру ЗТМВ, где металл подвергался значительным пластическим деформациям и нагреву, формируются достаточно крупные, вытянутые вдоль траектории его перемещения, и мелкие рекристаллизованные зерна. За ней располагается зона термического влияния (ЗТВ), в которой металл не деформировался, а изменения в структуре происходили только под воздействием нагрева.

Благодаря формированию деформированной мелкокристаллической структуры швов и меньшему нагреву металла в зоне сварки степень разупрочнения соединений алюминиевых сплавов ниже, а предел прочности выше, чем при их сварке плавлением. Так, минимальная твердость металла шва сплава 1201, полученного неплавящимся электродом с присадкой Св1201, составляет всего *HRB* 67, а сваренного трением с перемешиванием — *HRB* 82 (рис. 3). Металл шва сплава АМг6, сваренного плавлением с присадкой СвАМг6, имеет минимальную твердость *HRB* 82, а полученный в твердой фазе *HRB* 87. Для сплава 1460 эти показатели составляют *HRB* 71 (с присадкой Св1201)

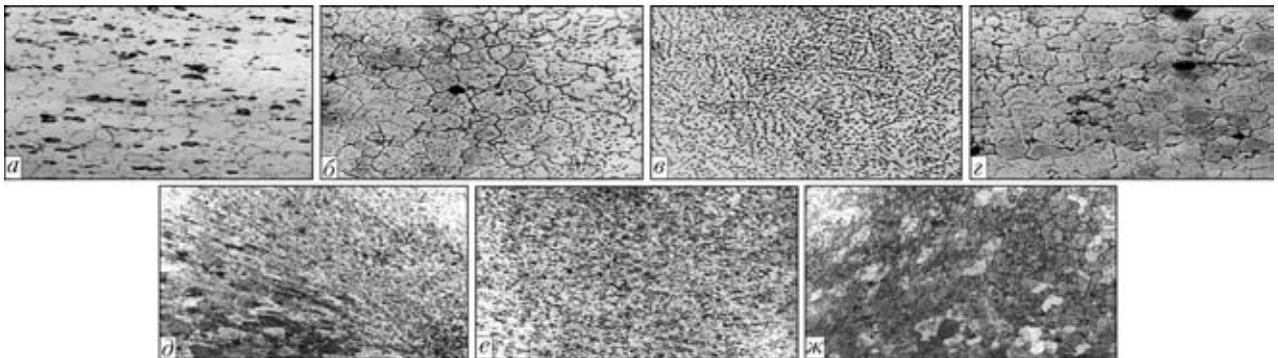


Рис. 2. Микроструктура ($\times 400$) основного металла (а) и сварных соединений сплава 1201, полученных АДСНЭ с присадкой Св1201 (б, в — зоны сплавления шва с основным металлом; в — шов) и СТП (д — ЗТМВ со стороны набегающего инструмента; е — ядро шва; ж — ЗТМВ со стороны отхода инструмента)

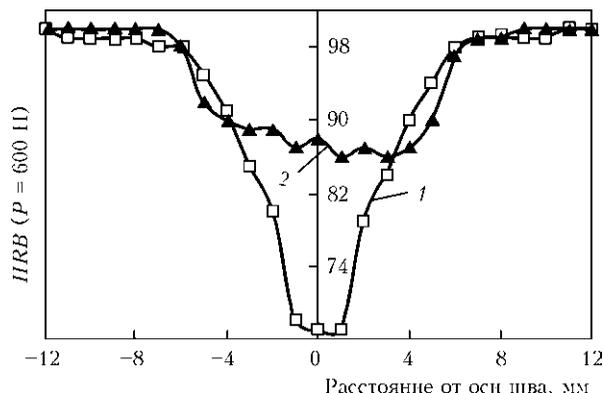


Рис. 3. Твердость металла в сварных соединениях сплава 1201, полученных АДСНЭ с присадкой Св1201 (1) и СТП (2)

и *HRB* 82 соответственно. Твердость металла шва сплава 1420, полученного АДСНЭ с присадкой СвАМг63, находится на уровне *HRB* 82, а сваренного трением с перемешиванием *HRB* 86.

Предел прочности образцов без усиления шва, полученных при АДСНЭ сплава АМг6 с присадкой СвАМг6, составляет 324 МПа, а сваренных трением с перемешиванием 332 МПа (табл. 1). При этом разрушение образцов, полученных сваркой в твердой фазе, происходит по ЗТМВ, а не по металлу шва. Сварные образцы сплава 1420, хотя и разрушаются в обоих случаях по шву, но имеют более высокий предел прочности (342 МПа) при использовании СТП. Еще большая разница в прочности достигается при сварке медьсодержащих термически упрочняемых алюминиевых сплавов. Так, сваренные трением с перемешиванием образцы сплавов 1201 и 1460 имеют предел прочности на уровне 310 МПа, тогда как для образцов без усиления, полученных при АДСНЭ сплавов 1201 и 1460 с присадкой Св1201, этот показатель составляет соответственно всего 239 и 257 МПа.

Снижение теплового воздействия на металл при СТП способствует уменьшению уровня оста-

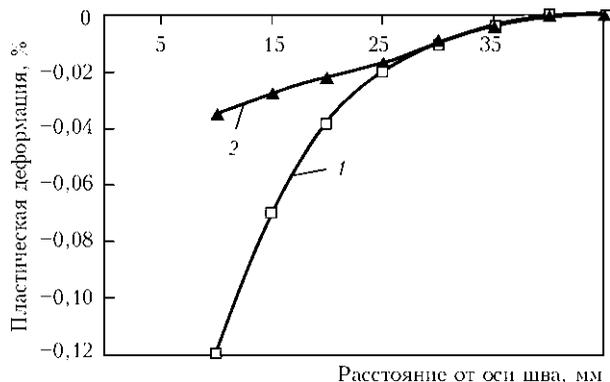


Рис. 4. Пластические деформации усадки в сварных соединениях сплава 1420, полученных АДСНЭ с присадкой СвАМг63 (1) и СТП (2)

точных пластических деформаций, возникающих в околошовной зоне сварных соединений под воздействием напряжений, превышающих условный предел текучести материала. Так, максимальная пластическая деформация при усадке металла на расстоянии 10 мм от оси шва в соединениях сплава 1420, полученных АДСНЭ, составляет 0,12 %, а трением с перемешиванием — менее 0,04 % (рис. 4). Поэтому применение сварки в твердой фазе способствует меньшему короблению сварных конструкций, а следовательно, позволяет снизить затраты, связанные с последующим его устранением.

Наличие остаточных пластических деформаций укорочения на стадии охлаждения шва приводит к возникновению остаточных растягивающих напряжений в средней части сварного соединения. Поэтому применение СТП обеспечивает меньший уровень остаточных напряжений. Например, максимальное значение остаточных растягивающих напряжений в сварных соединениях сплава 1420, полученных АДСНЭ, находится на уровне 99, а СТП — 64 МПа (рис. 5), т. е. такие соединения меньше склонны к распространению в них эксплуатационных трещин и имеют повышенную стойкость к разрушению.

Таблица 1. Прочность сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП и АДСНЭ

№ п/п	Свариваемые сплавы	Способ сварки	Присадка	Предел прочности образцов без усиления шва $\sigma_{св}^M$, МПа	Коэффициент прочности $\sigma_{св}^M / \sigma_{св}^M$	Место разрушения	Предел прочности образцов с усилением шва $\sigma_{св}$, МПа	Место разрушения
1	АМг6	СТП	—	332	0,92	ЗТМВ	—	—
		АДСНЭ	СвАМг6	324	0,90	Шов	345	ЗС
2	1420	СТП	—	342	0,75	ЗС	—	—
		АДСНЭ	СвАМг63	320	0,70	Шов	373	ЗС
3	1201	СТП	—	310	0,73	ЗС	—	—
		АДСНЭ	Св1201	239	0,57	Шов	296	ЗС
4	1460	СТП	—	309	0,55	ЗТМВ	—	—
		АДСНЭ	Св1201	257	0,45	Шов	311	ЗС

Примечание. Приведены средние значения показателей по результатам испытания трех–пяти образцов.

Таблица 2. Показатели сопротивления разрушению при внецентренном нагружении образцов сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП и АДСНЭ

№ п/п	Свариваемые сплавы	Способ сварки	Присадка	Предел прочности при внецентренном растяжении σ_p , МПа	Коэффициент интенсивности напряжений K_{σ} , МПа $\sqrt{м}$	Энергетический показатель зарождения трещины J_{σ} , Дж/см 2	Удельная работа распространения трещины УРРТ, Дж/см 2
1	АМг6	–	–	402	31	7,8	6,3
		СТП	–	436	42	6,9	10,6
		АДСНЭ	СвАМг6	360	24	6,2	4,7
2	1420	–	–	450	15	6,5	2,7
		СТП	–	388	22	4,4	5,2
		АДСНЭ	СвАМг63	399	29	5,2	5,7
3	1201	–	–	486	15	6,1	2,7
		СТП	–	449	20	7,4	3,8
		АДСНЭ	Св1201	333	16	3,7	2,9

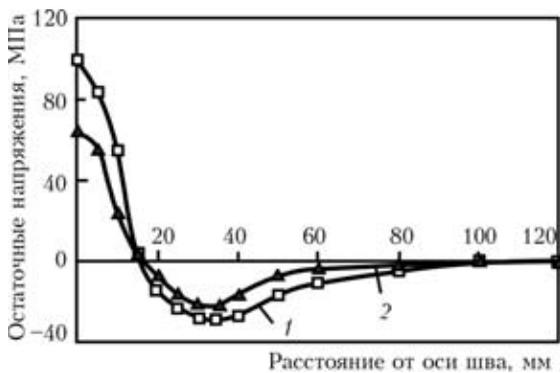


Рис. 5. Остаточные напряжения в сварных соединениях сплава 1420, полученных АДСНЭ с присадкой СвАМг63 (1) и СТП (2)

Более высокий уровень ресурсных характеристик сварных соединений, полученных в твердой фазе, подтверждают результаты испытаний образцов при их внецентренном нагружении. Так, образцы с концентратором в виде острого ($R = 0,1$ мм) надреза, выполненные СТП, в основном имеют более высокие показатели сопротивления разрушению, чем полученные неплавящимся электродом, а иногда и превышающие соответствующие значения для основного металла (табл. 2).

Проведенный комплекс исследований позволил разработать технологические рекомендации по СТП тонколистовых алюминиевых сплавов. Преимущества такого процесса получения неразъемных соединений будут реализованы при изготовлении теплообменной аппаратуры и аэрокосмической техники.

Выводы

1. Поскольку в процессе сварки СТП шов и прилегающие к нему участки нагреваются ниже температуры плавления свариваемого металла, исключается возможность образования кристаллизационных трещин на алюминиевых сплавах.

2. Интенсивное перемешивание пластифицированного металла при избыточном давлении в ограниченном пространстве при СТП способствует формированию в ядре шва ультрадисперсной структуры, а в прилегающих ЗТМВ — длинных, вытянутых вдоль траектории перемещения пластифицированного металла и мелких рекристаллизованных зерен.

3. Деформационное упрочнение металла, измельчение зерен, увеличение объемной доли их границ и дробление интерметаллидных фаз в шве и на граничащих с ним участках при СТП обеспечивают более высокий уровень твердости металла в зоне сварки и предел прочности соединений, чем при сварке плавлением.

4. Снижение теплового воздействия на металл при СТП способствует уменьшению уровня остаточных пластических деформаций укорочения и растягивающих напряжений в соединениях, что вызывает меньшее коробление сварных конструкций и повышает их стойкость к разрушению.

5. Сварные соединения, полученные трением с перемешиванием, имеют более высокие показатели сопротивления разрушению при внецентренном растяжении образцов, чем полученные неплавящимся электродом, а иногда и превышающие соответствующие значения для основного металла.

6. Применение ресурсосберегающей технологии получения неразъемных соединений в твердой фазе трением с перемешиванием при изготовлении сварных конструкций из алюминиевых сплавов позволит повысить их эксплуатационные и ресурсные характеристики.

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. Рязанцев В.И., Федосеев В.А. Сварка конструкций орбитального самолета «Буран» // Свароч. пр-во. — 1997. — № 4. — С. 31–36.
3. Металловедческие концепции создания деформируемых алюминиевых сплавов для быстроходных морских судов

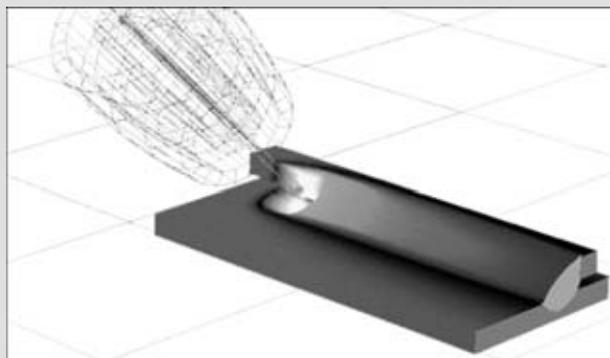
- / И.В. Горынин, Ю.С. Золотаревский, В.В. Рыбин, В.В. Чижиков // Вопр. металловедения. — 1999. — № 3. — С. 197–209.
4. *Иценко А.Я.* Характер горячих трещин, образующихся при сварке плавлением, высокопрочных алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 34–36.
 5. *Dawes C.J.* An introduction to friction stir welding and its development // Weld. and Metal Fabr. — 1995. — N 1. — P. 13–16.
 6. *Dawes C.J., Thomas W.M.* Friction stir process welds aluminium alloys // Welding J. — 1996. — N 3. — P. 41–45.
 7. *Defalco J.* Friction stir welding vs. fusion welding // Ibid. — 2006. — N 3. — P. 42–44.
 8. *Lahti K.* FSW — possibilities in shipbuilding // Svetsaren. — 2003. — N 1. — P. 6–8.
 9. *Kallee S.W., Davenport J., Nicholas E.D.* Railway manufacturers implement friction stir welding // Welding J. — 2002. — N 10. — P. 47–50.
 10. *Challenges of welding aluminium alloys for automotive structures / J.F. Hinrichs, J.S. Norik, W.M. McDonald, R.J. Heideman // Svetsaren. — 2001. — N 12. — P. 281–287.*
 11. *Arbegast W.J.* Friction stir welding after a decade of development // Welding J. — 2006. — N 3. — P. 28–35.
 12. *Friction stir welding flies high at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // Ibid. — 2006. — N 3. — P. 54–59.*

Main advantages of formation of welds in the solid phase as a result of plastic deformation of metal in friction stir welding of aluminium alloys are considered. Examples of using this process in the developed countries to fabricate welded structures in various engineering sectors, and the resulting saving of resources are given. Structures, weakening degree, strength, values of resistance to out-of-centre tension of specimens, and levels of residual stresses and strains in high-strength aluminium alloy welded joints produced by friction stir welding and argon-arc tungsten-electrode welding are analysed.

Поступила в редакцию 20.10.2009

ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!

С 2 по 30 апреля 2010 г. кафедра сварки, литья и технологии конструкционных материалов Тульского государственного университета, Международный научно-образовательный центр «ComHighTech» проводят 3-ю международную электронную научно-техническую конференцию «КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОЕДИНЕНИИ МАТЕРИАЛОВ» — КТСМ-2010 с последующей публикацией избранных Оргкомитетом научных трудов в ВАКовском сборнике «Известия ТулГУ, Серия Технические науки».



Для участия в конференции участникам из России и стран СНГ необходимо перечислить регистрационный взнос в размере 500 руб. за один доклад (объемом не более десяти страниц формата А4). Оплата регистрационного взноса гарантирует получение по почте экземпляра сборника с научными трудами конференции. Для представителей других стран участие бесплатное.

Текст доклада набирается на компьютере в текстовом редакторе Microsoft Word 97/2002 шрифтом «Times New Roman» величиной 14 пт с одинарным интервалом. Для докладов на русском языке после аннотации через строку указываются авторы, название статьи и аннотация на английском языке.

Вице-председатель конференции КТСМ-2010
проф., д-р техн. наук Судник Владислав Александрович

Адрес электронной конференции: <http://comhightech.tsu.tula.ru/weldsim>