

УДК 621.791.14

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1565ЧМ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦИСТЕРН БЕНЗОВОЗОВ

В.В. Овчинников, А.М. Дриц, Р.Н. Растопчин

Изучены особенности структуры и свойства стыковых соединений листов из алюминиевого сплава 1565ЧМ. Исследовано влияние состава присадочной проволоки на механические свойства и структуру сварных соединений сплава 1565ЧМ. Определены механические свойства соединений сплава 1565ЧМ, выполненных сваркой трением с перемешиванием и плазменной сваркой.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сплавы системы Al–Mg, плазменная сварка, сварка трением с перемешиванием, присадочная проволока.

Введение

В последнее время производители специальной автотехники – бензовозов и цементовозов – большое внимание уделяют применению алюминиевых сплавов в сварных конструкциях цистерн для снижения их массы. Для автомобильных перевозок топлива (бензина, керосина, солянки) и сухого цемента используются специальные автомобили со сварными цистернами обычной (рис. 1, а) и повышенной (рис. 1, б) вместимости.

В Европе наиболее широкое применение для изготовления сварных цистерн бензовозов и цементовозов получил свариваемый алюминиевый сплав 5083О (Н111), а в России – АМг5М. Для изготовления цистерн используют листы сплава АМг5М толщиной 6...10 мм. Указанный сплав высокотехнологичен, хорошо

обрабатывается давлением и сваривается методами дуговой сварки в среде защитных газов.

В то же время остается актуальной задача дальнейшего снижения массы цистерны, что позволит повысить массу перевозимого груза при сохранении на одном и том же уровне величины нагрузки на ось, снизить расход топлива на перевозку груза и выбросы углекислого газа в атмосферу.

Снижения массы цистерны можно достичь за счет применения для ее изготовления алюминиевого сплава с более высокими прочностными свойствами, чем у сплава АМг5М. При этом новый сплав должен обладать такой же высокой технологичностью как в процессе сварки самой цистерны, так и при изготовлении ее отдельных узлов.



а



б

Рис. 1. Сварная цистерна бензовоза из алюминиевого сплава обычной (а) и повышенной (б) грузоподъемности

Компанией «Алкоа Россия» совместно с ЦНИИ «Прометей» и НИИСтали был создан *многофункциональный сплав 1565ч* на основе системы Al–Mg. Основные компоненты сплавов этой группы – магний и марганец. Увеличение содержания магния в сплавах повышает временное сопротивление и особенно предел текучести [1]. Наиболее интенсивное повышение наблюдается при увеличении содержания магния от 1 до 6 %, а марганца – от 0,2 до 1 %. Химический состав сплава 1565ч: магний 5,9 %, марганец 0,86 %, цинк 0,78 %, кремний 0,11 %, железо 0,21 %, хром 0,08 %, алюминий – основа сплава.

При содержании магния до 4,5 % сплавы сохраняют высокую коррозионную стойкость после любых нагревов. При увеличении содержания магния в сплаве свыше 5 % может снизиться сопротивляемость материала коррозионному разрушению под напряжением при неблагоприятных термических условиях.

Склонность к коррозионному разрушению проявляется из-за нитевидных выделений по границам зерен β -фазы (Al_3Mg_2). Такое расположение β -фазы приводит к преимущественному (по границам зерен) ее растравливанию в присутствии электролита, так как данная фаза более электроотрицательна, чем основной твердый α -раствор магния в алюминии. Сплошное выделение β -фазы по границам зерен можно предотвратить, применяя термическую обработку, приводящую к равномерной гетерогенизации структуры [2]. Для этого сплав подвергают отжигу, при котором происходит равномерный распад β -фазы по телу зерна.

Введение в сплавы системы Al–Mg цинка до 1 % способствует упрочнению алюминиевого твердого раствора, так как при этом цинк находится в твердом растворе и не образует фаз. Дальнейшее увеличение содержания цинка приводит к тому, что сплав переходит из

класса нетермоупрочняемых в термоупрочняемые сплавы из-за образования упрочняющих фаз. Поэтому содержание цинка в сплаве 1565ч ограничили пределами 0,45...1 %. Для измельчения структуры сплава в его состав ввели модификаторы – цирконий, титан и др.

В таблице 1 представлены механические свойства листов из сплавов 5083, АМг5 и 1565чМ (сплав 1565ч с учетом состояния поставки – М). Анализ данных таблицы показывает, что минимально гарантированные прочностные свойства листов из сплава 1565чМ на 25 % выше, чем у сплавов АМг5М и 5083О (Н111).

Основными технологическими операциями при изготовлении сварных цистерн из алюминиевых сплавов являются: плазменная сварка полотнища из листовых заготовок; гибка сварного полотнища для получения обечайки; полуавтоматическая сварка плавящимся электродом продольного шва обечайки; изготовление днищ, перегородок и опорного узла цистерны; вварка в обечайку перегородок и других арматурных узлов; приварка к обечайки днищ; общая сборка цистерны с применением полуавтоматической сварки плавящимся электродом; зачистка швов и проверка качества сварки; грунтовка и покраска обечайки.

Целью данной работы явилась оценка свойств сварных соединений листов из сплава 1565чМ в сравнении со сплавом АМг5М, выбор оптимального состава присадочной проволоки и исследование влияния способа сварки на показатели механических свойств полученных соединений.

Материалы и методика проведения исследований

В экспериментах использовались листы сплава 1565чМ толщиной 5 мм. Для подготовки образцов под сварку применялось химиче-

Таблица 1

Механические свойства листов из различных сплавов при растяжении

Сплав (стандарт)	Состояние поставки	Толщина листа, мм	Механические свойства, не менее		
			σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
5083 (EN AW)	О/Н111	3,0...6,3	275	125	15
		6,3...12,5	270	115	16
АМг5 (ГОСТ 21631–76)	М	0,6...4,5	275	145	15
		4,5...10,5	275	130	15
1565ч (по ТУ)	М	3,0...6,0	335	165	15
		6,0...10,5	335	175	15

ское травление в растворе щелочи NaOH с последующим освещением в растворе азотной кислоты. Сварные образцы для испытаний механических свойств выполняли в соответствии с ГОСТ 14806–80 «Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры». Непосредственно перед сваркой стыкуемые кромки образцов подвергали шабрению по торцевой поверхности, а также по лицевой и обратной поверхностям.

Для исследования влияния химического состава присадочной проволоки на механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ были использованы проволоки АМг5, АМг61, АМг63 и МЛ 5183, химический состав которых представлен в табл. 2.

Для сварки протяженных швов листов алюминиевых сплавов толщиной более 5 мм в настоящее время применяют *плазменную сварку* (ПС) на обратной полярности вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки. При этом в протяженных швах сварных полотнищ часто наблюдается образование дефектов в виде включений вольфрама.

Образование включений определяется потерей стойкости материала электрода из-за длительного нагрева при сварке на обратной полярности и эрозией под воздействием паров в зоне горения плазменной дуги.

Для решения этой задачи было решено снизить тепловую нагрузку на вольфрамовый электрод путем перенесения основной сварочной дуги на плазмообразующее сопло, которое в процессе сварки охлаждается водой. Разработан способ ПС протяженных швов алюминиевых сплавов с полым анодом, сущность которого изложена в описании к патенту на изобретение [3].

Сварка стыковых соединений образцов из сплава 1565чМ толщиной 5 мм осуществля-

лась в режиме сквозного проплавления с формированием шва на подкладке из нержавеющей стали. Использовались следующие режимы ПС проникающей дугой:

- ток дежурной дуги – 165...170 А;
- ток сварочной дуги – 70...75 А;
- диаметр сопла – 3 мм;
- расход аргона – 2...2,5 л/мин;
- диаметр проволоки – 1,8...2 мм;
- скорость сварки – 18 м/ч;
- скорость подачи проволоки – 0,8 м/мин.

Кроме того, поскольку в последнее время широкое применение в промышленности для выполнения протяженных швов конструкций из алюминиевых сплавов получила *сварка трением с перемешиванием* (СТП), данный метод был опробован для сварки листов сплава 1565чМ в целях получения сравнительных данных с ПС.

Образцы сваривались с помощью СТП на фрезерном станке с ЧПУ марки AgileC5 1000, оснащенный инструментом из инструментальной стали Р18. Для формирования шва использовалась подкладка из нержавеющей стали.

Сварку трением с перемешиванием осуществляли на следующих режимах:

- усилие прижатия инструмента к поверхности деталей – 24 000...27 000 Н;
- частота вращения инструмента – 300...600 об/мин;
- скорость сварки – 300...500 мм/мин.

Для механических испытаний на определение предела прочности при растяжении, угла изгиба и ударной вязкости (по шву и зоне сплавления) были изготовлены образцы в соответствии с ГОСТ 6996–66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств».

Для оценки склонности исследуемых образцов к образованию горячих трещин использовалась проба «рыбий скелет» [4]. Сварку пробы «рыбий скелет» осуществляли автоматической ПС без присадочной проволоки (рис. 2).

Таблица 2

Химический состав присадочных проволок для плазменной сварки листов из сплава 1565чМ

Марка присадочной проволоки	Содержание легирующих элементов, % по массе								
	Cu	Mn	Ti	Zr	Be	Fe	Si	Zn	Mg
АМг5	0,03	0,62	0,12	–	0,003	0,22	0,20	–	5,1
АМг61	–	0,98	–	0,08	0,0001	0,22	0,27	–	5,92
АМг63	–	0,72	–	0,22	0,003	0,10	0,08	–	6,41
МЛ 5183	0,05	0,76 (0,60...1,0)	0,15	–	–	0,40	0,25	0,25	4,79

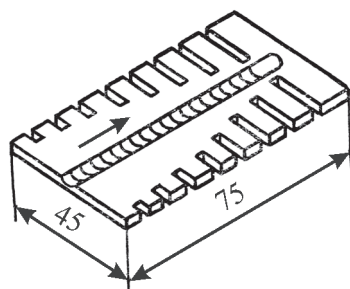


Рис. 2. Проба «рыбий скелет»

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты испытаний сплава 1565чМ на склонность к образованию трещин при сварке приведены на рис. 3. Коэффициент трещинообразования листов из сплава 1565чМ находится на уровне значений, характерных для промышленных сплавов системы Al–Mg (АМг5М и АМг6М). Применение присадочной проволоки Св-АМг61 полностью исключает образование трещин.

Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных с различными присадочными проволоками, представлены в табл. 3. Анализ данных этой таблицы показывает, что прочностные свойства сварных соединений сплава 1565чМ имеют наиболее высокие значения при использовании присадочной проволоки марок Св-АМг61 и Св-АМг63. Учитывая, что присадочная проволока Св-АМг61 имеет более низкую стоимость, в дальнейших исследованиях для сварки сплава 1565чМ применялась именно эта марка.

При испытаниях на растяжение сварных образцов толщиной 5 мм после ПС разрушение происходило по основному металлу, а при испытаниях на угол изгиба соединения не разрушались даже при угле изгиба 180°.

Макроструктура сварных соединений сплава 1565чМ, выполненных исследуемыми методами сварки, показана на рис. 4. При ПС с лицевой стороны наблюдалась характерная чешуйчатость на поверхности шва (рис. 4, а). Со стороны проплава происходило формирование усиления высотой, определяемой глубиной формирующей канавки, с плавными переходами к основному металлу (рис. 4, б).

В ходе механических испытаний сварных листов из сплава 1565чМ толщиной 5 мм, выполненных ПС, были получены следующие результаты:

- Прочность сварного соединения $\sigma_{\text{св}} = 355$ МПа;

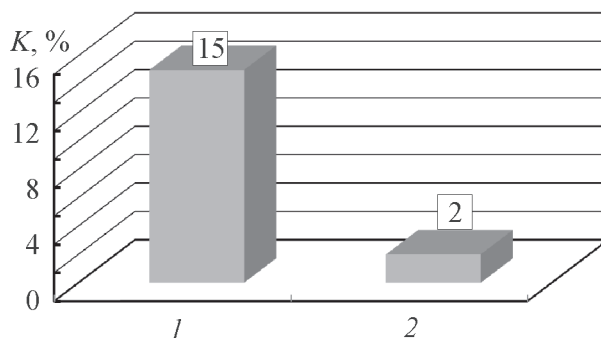
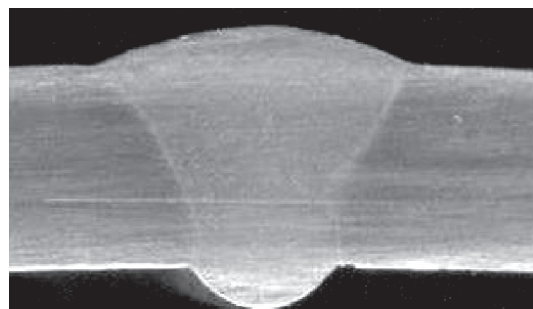
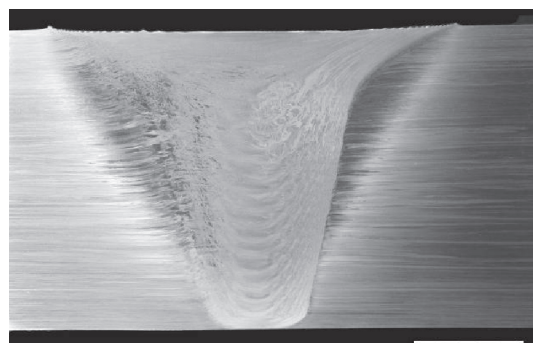


Рис. 3. Коэффициент трещинообразования сплава 1565чМ при сварке проб без присадки (1) и с присадочной проволокой (2)



а



б

Рис. 4. Макроструктура соединений листов из сплава 1565чМ: а – плазменная сварка (х6); б – сварка трением с перемешиванием (х8)

- прочность металла шва $\sigma_{\text{вн}} = 325$ МПа;
- предел текучести $\sigma_{0,2} = 164$ МПа;
- относительное удлинение $\delta = 16,2$ %;
- угол изгиба $\alpha = 180^\circ$;
- ударная вязкость
 - по шву КСУ = 206,2 кДж/м²,
 - по зоне сплавления КСУ = 208,4 кДж/м².

Эти результаты свидетельствуют, что при сварке листов сплава 1565чМ плазменной струей обеспечивается коэффициент прочности сварных соединений на уровне 0,96...0,98. Коэффициент прочности показывает отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла. Разрушение всех образцов

(с усилением и проплавом) при испытаниях на прочность происходило по зоне сплавления.

Микроструктура сварных соединений при ПС сплава 1565чМ представлена на рис. 5. Микроструктура металла шва (рис. 5, а) данных образцов состоит из α -твердого раствора, на фоне которого закристаллизовалась дендритная сетка. Микроструктура шва неоднородная, так как степень распада пересыщенного твердого раствора неодинакова. Микроструктура переходной зоны характеризуется оплавлением эвтектики вдоль деформированного волокна металла (рис. 5, б). Микроструктура переходной зоны состоит из оплавленных зерен α -раствора (рис. 5, в), в зоне термического влияния эта микроструктура рекристаллизованная, с включениями по границам и в теле зерен.

При СТП наблюдается формирование несколько асимметричной структуры шва, которая связана с однонаправленным перемещением пластифицированного металла в процессе вращения инструмента. Со стороны воздействия инструмента отмечается занижение поверхности шва относительно уровня поверхности основного металла на 0,15...0,22 мм. С корневой стороны соединения формируется

равномерный валик, размеры которого определяются шириной и глубиной формирующей канавки.

Для определения протяженности зоны термического влияния были проведены измерения микротвердости на приборе ПМТ-3 при нагрузке 20 г. Измерение микротвердости проводилось на уровне середины толщины образца.

На образцах сплава 1565чМ, выполненных автоматической ПС (поперечное сечение), значения микротвердости в сварном шве (рис. 6) варьируются в пределах 700...880 Н/мм². Микротвердость основного металла составляет в среднем 950...1050 Н/мм². В околошовной зоне наблюдается снижение твердости до 850...880 Н/мм².

Микротвердость околошовной зоны и металла шва, полученного СТП, замеряли с лицевой и обратной сторон шва. Максимумы микротвердости наблюдались в шве как с лицевой стороны, так и с обратной, с постепенным снижением к околошовной зоне и повышением к основному металлу. Максимальное снижение микротвердости в околошовной зоне по сравнению с основным металлом составило 15,4...18 %. Такой характер изменения твердости сварного соеди-

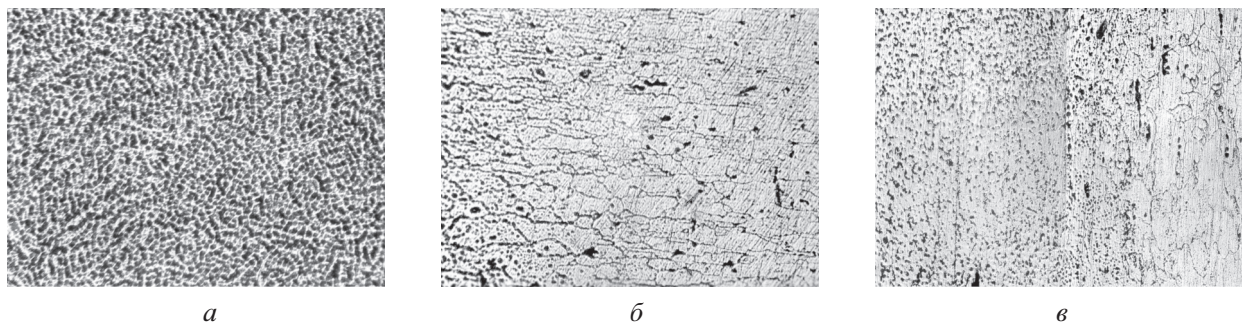


Рис. 5. Микроструктура металла шва (а), зоны сплавления (б) и переходной зоны (в) (зона сплавления и зона термического влияния) сварного соединения при плазменной сварке (x150)

Таблица 3

Влияние присадочной проволоки на свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ

Марка присадочной проволоки	Предел прочности σ_b , МПа		Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Угол изгиба α , град	Ударная вязкость КСЧ, кДж/м ²	
	сварного соединения	металла шва				по металлу шва	по зоне сплавления
AMr5	340	295	125	17,8	180	167	181
AMr61	352	316	158	17,3	180	192	205
AMr63	355	322	171	16,5	180	192	197
ML 5183	318	258	115	16,9	180	137	162

Примечание: Приведены средние данные по результатам испытаний пяти образцов. Угол изгиба определялся по ГОСТ 6696–66 на оправке диаметром, равным трем толщинам листа.

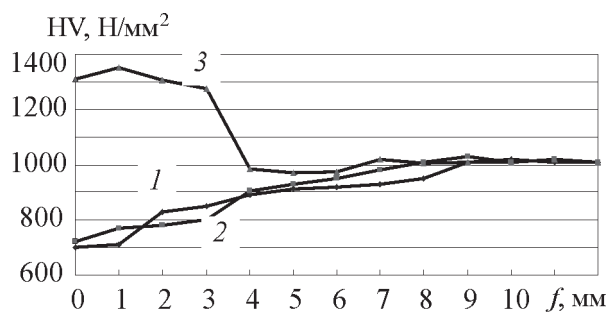


Рис. 6. Распределение микротвердости в сварных соединениях листов из сплава 1565чМ толщиной 5 мм при плазменной сварке (1, 2) и сварке трением с перемешиванием (3): f – расстояние от оси шва до точки измерения микротвердости HV

нения объясняется тепловыделением в процессе СТП и местным отжигом металла.

В таблице 4 представлены результаты сравнительных механических испытаний сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных сварками ПС и СТП. Исследования проводились на трех типах образцов: двух стандартных – для испытаний на статическое растяжение со сварным швом и швом, зачищенным с обеих сторон заподлицо с основным металлом, а также на образце с уменьшенным сечением в зоне шва.

При определении механических свойств сварного соединения разрушение после всех видов сварки происходило по основному металлу (рис. 7, а). На образцах со снятым усилением и проплавом (прочность металла шва) после ПС разрушение наблюдалось по шву, а при СТП – снова по основному металлу.

Разрушение по металлу шва для СТП (рис. 7, в, г) возникало только в случае испытаний образцов с уменьшенным сечением по сравнению с сечением образца в зоне основного металла.

Исследование микроструктуры соединения СТП выявило наличие четырех структурных зон: ядро шва 1 (перенесенный инструментом термопластический деформированный материал); зона термопластической деформации 2; зона термического влияния 3 и основной металл 4 (рис. 8, а).

Наблюдалась мелкодисперсная структура металла шва, близкая к равноосной. В ядре шва присутствовали равноосные зерна размером 3,94...5,46 мкм. При этом в зоне ядра чередовались зоны со светлой и темной травимостью (рис. 8, б). При такой структуре сварной шов должен обладать прочностными свойствами не ниже свойств основного металла в исходном состоянии.

Таблица 4

Механические свойства сварных соединений листов из сплава 1565чМ толщиной 5 мм

Способ сварки	Прочность соединения σ_b , МПа	Прочность металла шва $\sigma_{шв}$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость металла шва КСУ, кДж/м²	Угол изгиба α , град
Плазменная сварка	355	325	164	16,2	206	180
	Характеристика разрушения образца - разрушение по основному металлу при испытании соединений с усилением и проплавом; - при испытании образцов со швом, зачищенным заподлицо с основным металлом, разрушение по металлу шва					
Сварка трением с перемешиванием	355	370	165	15,4	221	180
	Характеристика разрушения образца - разрушение по основному металлу при испытании соединений с незачищенным швом; - при испытании образцов со швом, зачищенным заподлицо с основным металлом, разрушение по основному металлу; - разрушение по металлу шва при испытании образцов с уменьшенным рабочим сечением в зоне сварного шва					

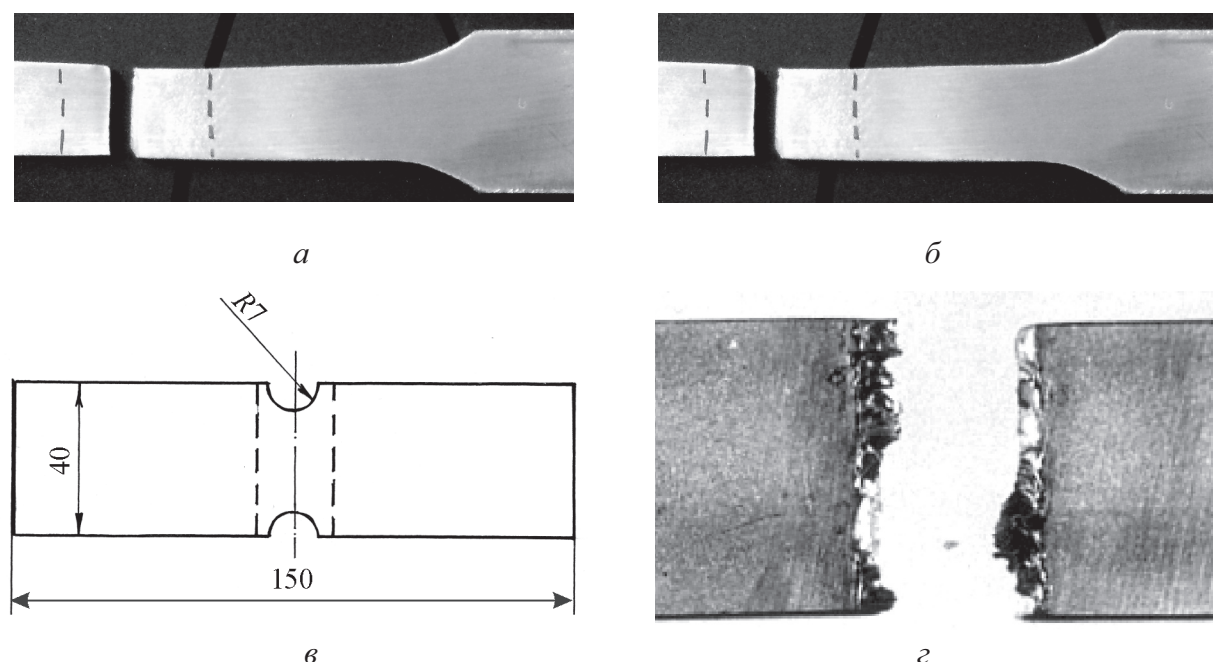


Рис. 7. Разрушение образцов соединений сплава 1565чМ, полученных СТП:

а – сварное соединение не зачищено; *б* – сварное соединение зачищено заподлицо с основным металлом; *в* – образец с уменьшенным рабочим сечением в зоне шва и характер его разрушения (*г*)

В зоне термопластической деформации проявлялась направленная деформация зерен исходного металла (рис. 8, *в*). В сплаве 1565чМ существенных изменений в зоне термического влияния не наблюдалось по сравнению с основным металлом (рис. 8, *г*). В основном металле обнаруживались зерна вытянутой формы с продольным размером 30...50 мкм и толщиной около 12...20 мкм (рис. 8, *д*).

В процессе сварки образцов СТП выявлен эффект схождения кромок перед рабочим инструментом из-за усадки сформировавшегося за ним сварного шва.

В рамках данной работы были проведены исследования содержания легирующих эле-

ментов в сварных швах, выполненных применяемыми методами сварки. При ПС исследовались образцы, полученные с присадочной проволокой и без нее. Результаты измерений, полученные спектральным методом, приведены в табл. 5.

Из данных табл. 5 видно, что состав металла шва при СТП практически идентичен химическому составу сплава 1565чМ. В случае применения ПС имеет место изменение концентрации в шве магния, марганца и цинка.

Таким образом, при СТП листов из сплава 1565чМ достигается не только наименьшая протяженность зоны термического влияния, но и отсутствие изменения химического состава

Таблица 5

**Содержание легирующих элементов в шве сплава 1565чМ
при различных способах сварки (по оси шва)**

Шов, полученный сваркой	Присадка	Содержание легирующих элементов в шве, % по массе					Ширина зоны термического влияния, мм
		Mg	Mn	Zn	Fe	Si	
ПС	Нет	5,30	0,54	0,61	0,20	0,11	3,7...4,3
	Св-АМг61	5,77	0,78	0,70	0,20	0,10	4,5...5,8
СТП	Нет	5,85	0,83	0,75	0,21	0,11	1,9...2,7
Основной металл (сплав 1565чМ)*	—	5,88	0,83	0,76	0,21	0,10	—

* Содержание легирующих элементов в основном металле (сплав 1565чМ) приведено для справки.

ва шва по сравнению с основным металлом (за счет невысоких температур нагрева металла), а также существенное измельчение зерна. Измельчение зерна в металле шва, по-видимому, можно объяснить на основе модели прессования нагретого металла с интенсивной деформацией, при которой действуют высокие сдвиговые напряжения, приводящие к дроблению зерен. В случае СТП подобные условия деформации формируются между нагретым инструментом и недостаточно разогретой областью свариваемого металла в направлении движения инструмента. Толщина пленки пластичного металла, заключенного в таком микроканале, на которую действуют сдвиговые напряжения, составляет 0,2...0,35 мм.

Заключение

Сплав 1565чМ в листовом полуфабрикате характеризуется хорошей свариваемостью, находящейся на уровне свариваемости сплавов

АМг5 и АМг6. Прочность основного металла и сварного соединения сплава 1565чМ выше прочности как основного металла, так и сварного соединения сплава АМг5М на 20...25 % при таком же значении пластичности и ударной вязкости.

При ПС листов из сплава 1565чМ коэффициент прочности сварных соединений составляет 0,96...0,98.

Значительное повышение прочности соединений листов из сплава 1565чМ возможно в случае применения СТП. В случае использования этого метода сварки разрушение образцов при испытании на прочность происходит по основному металлу. В металле шва уменьшается размер зерен по сравнению с основным металлом, сохраняется неизменным химический состав сплава и снижается протяженность зоны термического влияния, в результате чего прочность сварного шва превышает прочность основного металла.

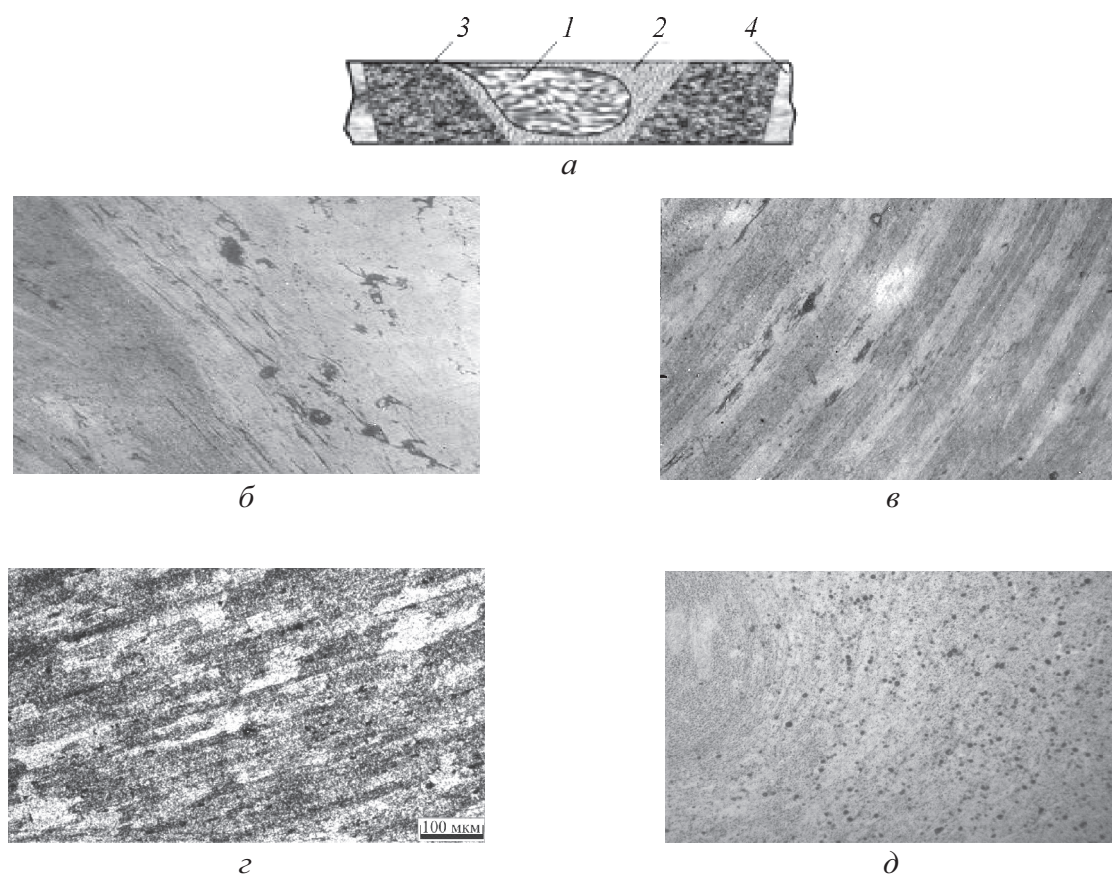


Рис. 8. Зоны сварного соединения листов из сплава 1565чМ, полученного СТП, и их микроструктура:
а – схема расположения структурных зон 1–4 в макроструктуре соединения; б – ядро шва (зона 1);
в – зона термопластической деформации (зона 2); z – зона термического влияния (зона 3);
д – основной металл (зона 4) (x200)

Листы сплава 1565чМ могут быть рекомендованы для использования в сварных конструкциях для транспортного машиностроения взамен листов сплава АМг5М.

Список литературы

1. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
2. Металловедение алюминия и его сплавов: справочник / Отв. ред. Н.Н. Фридляндер. – М.: Металлургия, 1983. – 280 с.
3. Пат. 2336981 Российская Федерация, МПК В 23 К 9/16. Способ плазменной сварки алюминиевых сплавов / В.В. Овчинников, В.В. Алексеев; опубл. 12.05.08. Бюл. № 24.
4. Сварка в машиностроении: справочник в 4-х т. / Ред. коллегия Г.А. Николаев (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1978. Т. 2. – 462 с.

Материал поступил в редакцию 13.08.13

ОВЧИННИКОВ Виктор Васильевич

E-mail: vikov1956@mail.ru
Тел.: (916) 512-43-82

Доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технологии конструкционных материалов» ФГБОУ ВПО МГИУ. Сфера научных интересов – разработка новых алюминиевых сплавов и технологий получения из них сварных соединений с высоким уровнем свойств. Автор двух монографий, более 240 научных статей, 110 изобретений.

ДРИЦ Александр Михайлович

E-mail: Drits@alcoa.com
Тел.: (916) 642-82-73

Кандидат технических наук, исполнительный директор «Алкоа Россия». Сфера научных интересов – разработка новых алюминиевых сплавов. Автор трех монографий, более 90 научных статей, 35 изобретений.

РАСТОПЧИН Руслан Николаевич

E-mail: rastopchin@mail.ru
Тел.: (962) 970-67-77

Соискатель кафедры «Материаловедение и технологии конструкционных материалов» ФГБОУ ВПО МГИУ, заместитель главного технолога машиностроительного завода «БЕЦЕМА». Сфера научных интересов – разработка технологий сварки плавлением алюминиевых сплавов. Автор 5 научных статей, 2 изобретений.