

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №1 (151). С. 7-15.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №1 (151). P. 7-15.

Научная статья
УДК 621.791.75
doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-15

Горячее деформирование сварных заготовок листов алюминиевого сплава 1565чМ

Виктор Васильевич Овчинников¹, д.т.н.
Денис Алексеевич Поляков², аспирант

^{1,2} Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ vikov1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2948-2202>

² da_polyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрены особенности деформирования в холодном и нагретом состояниях сварных заготовок сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм, выполненных сваркой трением с перемешиванием. Установлено, что сварные соединения сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм, полученные сваркой трением с перемешиванием обладают высокими прочностными свойствами в сочетании с достаточной пластичностью. Так угол изгиба соединений составляет соединений составляет 165...170°. Коэффициент прочности сварного соединения составляет 0,96 от прочности основного металла. При этом временное сопротивление металла шва по своему значению превосходит временное сопротивление как основного металла, так и сварного соединения. Соединения сплава 1565чМ, выполненные сваркой трением с перемешиванием, обладают хорошей деформируемостью при холодной деформации. Эта особенность сварных заготовок из листов сплава 1565чМ объясняется наличием в структуре зоны перемешивания мелкозернистой рекристаллизованной структуры, которая формируется в результате теплового и силового воздействия рабочего инструмента на свариваемый материал в процессе осуществления сварки. Режимы сварки, обеспечивающие указанные механические свойства соединений, были использованы для сварки обечайки (заготовок) газовых баллонов (лейнеров). Технология изготовления таких баллонов включает в себя следующие операции: сварка обечайки, калибровка обечайки, контроль качества шва на обечайке, осадка обечайки в горячую форму для формовки днища, вварка штуцеров и общий контроль на герметичность. Эксперименты по формовке днища лейнеров за счет осадки обечайки в нагретую до 450...500 °С показали, что наблюдается интенсивное вытекание металла шва за счет различий в деформационной способности металла шва и основного металла. Такое поведение металла шва при горячем деформировании можно объяснить проявлением эффекта сверхпластичности металла шва в виду наличия рекристаллизованной ультра мелкозернистой структуры. Установлено, что начиная с температуры 400 °С относительное удлинение металла шва существенно превосходит значение удлинения основного металла. При температуре 450 °С указанное различие достигло уже 72%. Для сварного шва сплава 1565чМ начиная с температуры нагрева 540 °С происходит аномальный рост зерна, который захватывает весь шов.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; алюминиевый сплав; горячее деформирование; металла шва; микроструктура; сверхпластичность, аномальный рост зерна

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту Российского научного фонда №22-19-00121 «Закономерности структурно-фазовых превращений в алюминий-кальциевых сплавах, легированных цинком и магнием, в условиях сварки».

Для цитирования: Овчинников В.В., Поляков Д.А. Горячее деформирование сварных заготовок листов алюминиевого сплава 1565чМ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 7-15. doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-15

Hot forming of welded blanks of aluminum alloy sheets 1565 chM

Viktor V. Ovchinnikov¹, D. Eng.
Denis A. Polyakov², PhD student

^{1, 2} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹ vikov1956@mail.ru

² da_polyakov@mail.ru

Abstract. The details of forming in cold or heated position for welded blanks of alloy 1565chM with a thickness of 8,0 mm, performed by friction stir welding, are viewed. It is found that welded joints of alloy 1565chM with a thickness of 8,0 mm, obtained by friction stir welding have high strength properties together with sufficient toughness. Thus, bending angle of the joints is 165...170°. The strength factor of the welded joint is 0.96 of the strength of the base metal. At the same time, the temporary resistance of the weld metal exceeds temporary resistance of both: base metal and the welded joint in its value. The 1565chM alloy joints, made by friction stir welding have good formability under cold deformation. This special feature of welded blanks made of 1565chM alloy sheets is explained by the presence of a fine-grained recrystallized structure in a stir zone, which is formed as a result of heat impact and force action of the working tool on the material to be welded. Welding modes providing specified mechanical properties of the joints were used for welding shells (blanks) of gas cylinders (liners). Manufacturing technique for such cylinders includes the following operations: welding of the shell, calibration of the shell, quality control of the weld on the shell, jumping into a hot mold for forming bottoms, welding of fittings and general tightness control. Experiments on forming liners bottoms due to the shell jumping into a heated to 450...500 °C mold have shown that there is an intensive weld metal runout due to differences in the strain capacity of the weld metal and the base metal. This behavior of the weld metal during hot forming can be explained by superductility of the weld metal owing to the presence of a recrystallized ultrafine-grained structure. It was found that starting from a temperature of 400 °C, the relative elongation of the weld metal significantly exceeds the elongation value of the base metal. In case of 450 °C, this difference reaches 72 %. For the weld of the 1565chM alloy, starting from the heating temperature of 540 °C, an abnormal grain growth occurs along the entire weld.

Keywords: friction stir welding; aluminum alloy; hot forming; weld metal; microstructure; superductility, abnormal grain growth

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under the project of the Russian Scientific Foundation No.22-19-00121 «Patterns of structural phase transformations in aluminum-calcium alloys alloyed with zinc and magnesium under welding conditions».

For citation: Ovchinnikov V.V., Polyakov D.A. Hot forming of welded blanks of aluminum alloy sheets 1565 chM / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 7–15. doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-15

Введение

При соединении холоднокатанных листов сплавов системы Al–Mg, таких как AMг5, AMг6 и 1565чМ, с использованием сварки плавлением в сварном шве формируется литая дендритная структура, что приводит к существенному увеличению размера зерен, а также имеет место укрупнение наночастиц вторых фаз. В зоне термического влияния под действием сварочного тепла наблюдается снятие упрочнения за счет пластической деформации листового полуфабриката.

При холодной деформации сварных заготовок из сплавов системы Al–Mg, выполненных сваркой плавлением, даже в соединениях без внутренних дефектов зачастую наблюдается образование трещин по зоне сплавления и по металлу шва в процессе деформирования [1].

Кроме того, как при холодном, так и при горячем деформировании сварных

заготовок, полученных сваркой плавлением, требуется удаление механическим путем выпуклости шва с лицевой и корневой сторон соединения.

Для повышения деформационной способности сварных заготовок сплавов системы Al–Mg стремятся измельчить структуру металла шва. С этой целью в присадочный металл вводят скандий в количествах до 0,5 %. Введение скандия позволяет уменьшить средний размер зерна в шве и частично решить проблему с холодным деформированием сварных заготовок из алюминиевых сплавов [2, 3].

Использование сварки трением с перемешиванием (СТП), в основе которой лежат процессы интенсивной пластической деформации (ИПД) при повышенной температуре, позволяет решить эту проблему. Максимальная температура нагрева заготовок в процессе СТП не превышает 500...520 °С, а время воздействия исчисляется минутами. При

определенных режимах влияние СТП на частицы вторых фаз может быть минимизировано, что позволяет сохранить высокие прочностные свойства в сварных соединениях [4 – 8].

В сварном шве формируется мелкозернистая или ультра мелкозернистая структура (УМЗ), которая обеспечивает высокие механические свойства [9, 10]. В зависимости от режима СТП прочность шва в термически неупрочняемых сплавах может не только достигать прочности основного материала в отожженном состоянии, но и превосходить его [11]. Как правило, сварные заготовки, полученные сваркой трением с перемешиванием из термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, хорошо деформируются в холодном состоянии. Такие заготовки применяются при изготовлении днищ котлов железнодорожных цистерн, а также цистерн автомобильных цементовозов и бензовозов.

При изготовлении сварных воздушных баллонов сварная заготовка для претерпевает горячее деформирование. Сведения по горячему деформированию сварных заготовок, выполненных сваркой трением с перемешиванием из термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, в технической литературе на данное время практически отсутствуют.

Поэтому целью настоящей работы являлось исследование механических свойств и структуры сварных соединений сплавов системы Al–Mg, полученных сваркой трением с перемешиванием, а также рассмотрение особенностей горячего деформирования сварных заготовок из алюминиевого сплава 1565чМ.

Материалы и методы

В исследовании использовались отожженные листы из сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм, химический состав которого приведен в табл. 1 (по основным элементам).

1. Химический состав листов сплава 1565чМ

1. Chemical composition of 1565chM alloy sheets

Марка сплава	Массовая доля элемента								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Zn	Ti
1565ч	0,20	0,30	0,05...0,10	0,40...1,20	5,10...6,20	0,02...0,25	0,05...0,20	0,45...1,0	0,02...0,10

Механические свойства листов сплава 1565чМ в отожженном состоянии приведены в табл. 2.

2. Механические свойства листов сплава 1565чМ

2. Mechanical properties of 1565hM alloy sheets

Полуфабрикат, толщина	Направление вырезки образцов	Механические свойства				
		Временное сопротивление σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Угол изгиба α , °	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
Лист толщиной 8,0 мм	Поперечное	$\frac{345...365}{350}$	$\frac{188...205}{190}$	$\frac{16,0...17,8}{17,2}$	70	20,0
	Продольное	$\frac{360...385}{370}$	$\frac{210...235}{220}$	$\frac{17,5...18,8}{18,0}$	–	–

Примечания: в числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние по результатам испытаний пяти образцов.

Сварку трением с перемешиванием осуществляли на лабораторной установке, изготовленной на базе вертикального фрезерного

станка с ЧПУ и дополнительно оснащенного индикатором вертикального перемещения фрезерной головки. Для сварки использовался

инструмент, выполненный из быстрорежущей стали, со штифтом конусообразной формы и винтовой линией [12].

В общем случае ширина сварного шва зависела от размера заплечика используемого рабочего инструмента. Все сварные соединения, исследованные в данной работе, были выполнены инструментами, которые формировали для плит шов шириной с лицевой стороны – 30 мм. Режимы сварки образцов приведены в табл. 3. Сварка осуществлялась в одностороннем варианте.

Длину наконечника инструмента выбирали таким образом, чтобы она была на 0,10...0,15 мм меньше толщины свариваемого металла. Сварку выполняли углом вперед при наклоне инструмента относительно вертикальной оси на 2,0...3,0 °. С помощью суппорта закрепленный на валу электродвигателя инструмент перемещался в вертикальной плоскости, благодаря чему обеспечивалось необходимое заглубление его рабочих частей в свариваемый материал, и поддерживалась постоянная величина осевого усилия его прижатия к соединяемым деталям в процессе сварки.

3. Параметры режима сварки трением с перемешиванием листов сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм

3. Parameters of friction stir welding mode for 1565chM alloy sheets with a thickness of 8,0 mm

Параметры режима СТП	Значения параметров
Скорость сварки, м/ч	12,5...28,2
Частота вращения инструмента, об/мин	500...1000
Нормальное усилие прижатия инструмента к заготовкам, Н	9000...9500
Угол наклона инструмента в вертикальной плоскости, °	2,0...3,0
Длина штифта, мм	7,8
Диаметр штифта, мм	6,2
Диаметр заплечика, мм	16

При рентгеновском контроле сварных соединений в качестве источника ионизирующего излучения применяли рентгеновский аппарат РУМ 7 с диапазоном регулировки напряжения от 10 до 60 кВ и током анода до 30 мА. В качестве детектора рентгеновского излучения применяли радиографическую пленку AGFA D5 класса С4 по ISO 11699.

Из полученных сварных соединений в соответствии с ГОСТ 6996-66 изготавливали образцы с шириной рабочей части 15 мм для определения их предела прочности при одноосном растяжении. Ширина рабочей части образцов для определения характеристик сопротивления усталости составляла 25 мм. Предел кратковременной прочности при растяжении и угол статического изгиба определяли на установке Zwick/Roell Z030. Для определения ударной вязкости использовался одностоечный маятниковый копер МИК.

Для определения временного сопротивления металла шва (зона перемешивания) испытывались специальные образцы с зачищенной заподлицо с поверхность основного

металла швом и с уменьшенной шириной образца до 6,0 мм за счет полукруглых выборок радиусом 5,0 мм [13].

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Leica DM IRM с программно-аппаратным комплексом обработки изображения «Image Expert Pro3x».

Химическое травление образцов для выявления микроструктуры алюминиевых сплавов проводили раствором Келлера (HF – 1,0 мл; HCl – 1,5 мл; HNO₃ – 2,5 мл; H₂O – 95,0 мл) и раствором, состоящего из реактива Пултона (HF – 2,0 мл; HCl – 3,0 мл; HNO₃ – 20 мл; H₂O – 175 мл), HNO₃ – 50 мл; H₂O – 40 мл; CrO₃ – 12 г.

Для исследования влияния температуры нагрева образцов на микроструктуру металла зоны перемешивания использовалась лабораторная муфельная печь SNOL 4/900.

Результаты и их обсуждение

Механические свойства соединений листов сплава 1565чМ приведены в табл. 4.

4. Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм

4. Mechanical properties of welded joints of 1565chM alloy sheets with a thickness of 8,0 mm

Образец	Временное сопротивление σ_B , МПа		Коэффициент прочности сварного соединения	Угол изгиба α , °	Ударная вязкость КСУ по металлу шва, кДж/м ²
	соединение	шов			
Основной металл	370	–	1,0	68	203
Соединение СТП	354	380	0,96	175	220

Коэффициент прочности сварного соединения составляет 0,96 от прочности основного металла что следует из табл. 4. При этом временное сопротивление металла шва по своему значению превосходит временное сопротивление как основного металла, так и сварного соединения.

Разрушение сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных сваркой трением с перемешиванием, происходило по зоне термомеханического воздействия со стороны отхода рабочего инструмента.

Сварные соединения листов сплава 1565чМ отличаются высокими пластическими свойствами (угол изгиба 175 °) при ударной вязкости 220 кДж/м².

Режимы сварки, представленные в табл. 3, были использованы для сварки обечаяек (заготовок) газовых баллонов (лейнеров). Технология изготовления таких баллонов включает в себя следующие операции: сварка обечайки, калибровка обечайки, контроль качества шва на обечайке, осадка обечайки в горячую форму для формовки днищ, вварка штуцеров и общий контроль на герметичность.

Сварная заготовка (обечайка), выполненная на приведенных выше режимах после калибрования, представлена на рис. 1. После калибрования обечайка приобрела форму окружности в поперечном сечении. Проведенные после калибрования исследования с помощью компьютерной томографии и испытаний обечайки на герметичность не выявили появления каких-либо дефектов сварного шва, которые могли бы привести к потере герметичности.

Эксперименты по формовке днищ лейнеров за счет осадки обечайки в нагретую до 450...500 °С показали, что наблюдается интенсивное вытекание металла шва за счет

различий в деформационной способности металла шва и основного металла (рис. 2). По-видимому, это явление напрямую связано с различием в деформационной способности основного металла и металла зоны перемешивания, которые обусловлены различиями в среднем размере зерна в структуре.



a)



b)

Рис. 1. Стенд для сварки обечаяек лейнеров (a) сварная обечайка (b) после калибровки

Fig. 1. Stand for welding liner shells (a) welded shell (b) after calibration



Рис. 2. Вытекание шва СТП при осадке обечайки в горячую форму

Fig. 2. FSW weld rout when shell jumping in a hot mold

Такое поведение металла шва при горячем деформировании можно объяснить

проявлением эффекта сверхпластичности металла шва в виду наличия рекристаллизованной ультра мелкозернистой структуры. Поэтому были проведены сравнительные испытания на растяжение при повышенной температуре образцов, вырезанных из основного металла и сварного шва (рис. 3).

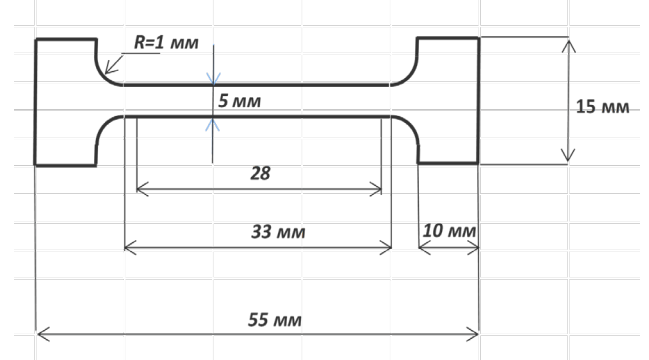


Рис. 3. Образец для испытаний на статическое растяжение основного металла 1565чМ и сварного шва при повышенных температурах

Fig. 3. Test pattern for static tensile strength of the base metal 1565chM and the weld under elevated temperatures

Результаты проведенных испытаний представлена в табл. 5.

5. Механические свойства основного металла из сплава 1565чМ и металла шва при повышенной температуре

5. Mechanical properties of the base metal of the 1565chM alloy and the weld metal under elevated temperature

Температура испытания, °С	Основной металл			Металл шва		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
20	350	165	25	370	209	28
350	42	32	77	70	67	90
400	20	14	91	39	37	139
450	10	8,0	160	22	20	275

Из приведенных в табл. 5 данных следует, что начиная с температуры 400 °С относительное удлинение металла шва существенно превосходит значение удлинения основного металла. При температуре 450 °С указанное различие достигло уже 72 %.

К сожалению, при температуре 500 °С определить искомые значения механических

свойств не удалось по причине выхода образца из металла шва при растяжении за пределы нагревательной камеры.

Внешний вид образцов основного металла и металла шва после статического растяжения при повышенной температуре приведен на рис. 4 (лист толщиной 8,0 мм).

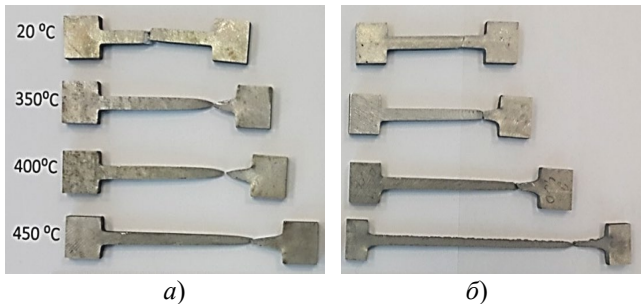


Рис. 4. Образцы сплава 1565чМ после испытаний на растяжение при различных температурах нагрева основного металла (а) и сварного шва (б)

Fig. 4. Samples of the 1565chM alloy after tensile tests at different reheat temperatures of the base metal (a) and the weld (b)

Так как при горячей деформации металла сварного шва нагревается до температуры 450...500 °С, то были проведены

эксперименты по влиянию нагрева на структуру металла шва сплава 1565чМ, полученного СТП. Для этого образцы сварных соединений подвергали нагреву с выдержкой 30 мин с последующим исследованием микроструктуры шва на оптическом микроскопе.

Фотографии макроструктур сварных соединений листов сплава 1565чМ после нагрева образцов до температуры 450...550 °С приведены на рис. 5. Проведенные эксперименты позволили установить, что при выдержке в течение 30 мин при температуре 450 °С роста зерна не происходит (см. рис. 5, б).

Дальнейшее увеличение температуры нагрева до 500 °С сопровождается начинается аномальный взрывной рост размера зерна в металле шва (рис. 5, в).

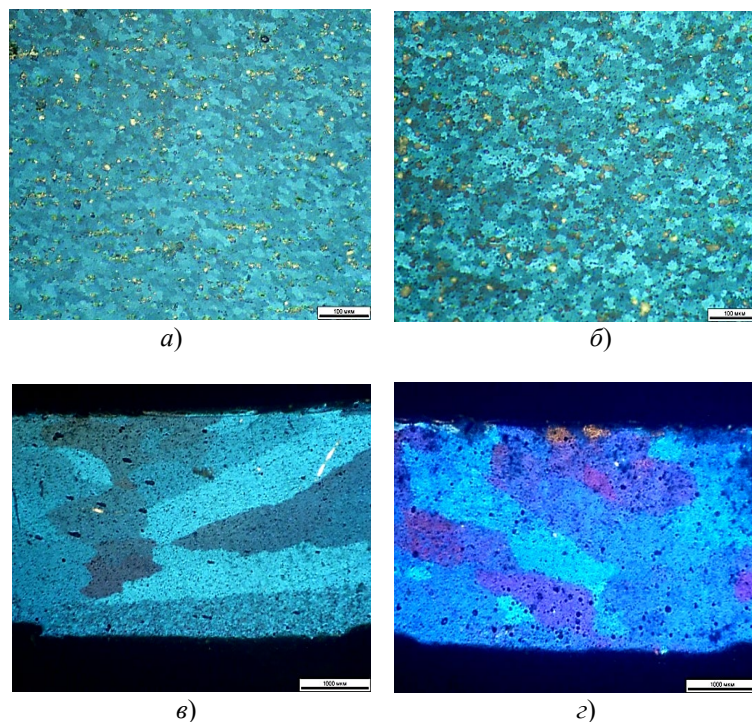


Рис. 5. Влияние отжига с выдержкой в печи в течение 30 мин на структуру металла шва листа сплава 1565чМ: а – исходное состояние (×500); б – температура нагрева 450 °С (×500); в – температура нагрева 500 °С (×25); г – температура нагрева 540 °С (×25);

Fig. 5. The annealing effect when soaking in the furnace for 30 minutes on the weld metal structure of 1565chM alloy sheet: а – initial state (×500); б – heating temperature 450 °С (× 500); в – heating temperature 500 °С (×25); г – heating temperature 540 °С (×25);

Начиная с температуры нагрева 540 °С происходит аномальный рост зерна, который захватывает весь металл шва (рис. 5, г).

В дальнейшем следует провести более детальные исследования времени выдержки и

температуры нагрева на определение температурного порога начала аномального роста зерна в металле шва сплава 1565чМ.

Полученные результаты в тоже время находятся в противоречии с результатами

испытаний образцов металла сварного шва на статическое растяжение при повышенных температурах. Если бы наблюдался аномальный рост зерна у металла шва в процессе испытаний, то металла шва не проявлял бы в такой ярко выраженной степени склонность к сверхпластичности. Поэтому были проведены металлографические исследования образцов из металла шва после испытаний при температуре 500 °С. Микроструктура швов сплава 1565чМ при комнатной температуре и после испытаний при нагреве до 500 °С показана на рис. 6.

Из приведенных на рис. 6 микроструктур металла шва можно сделать вывод, что размер зерна после СТП в металле шва сплава 1565чМ составил 5,2...6,3 мкм. После испытаний при нагреве до температуры 500 °С наблюдался незначительный рост среднего размера зерна до 8,8...10,2 мкм. Но аномального роста зерна не наблюдалось.

Из полученных данных можно заключить, что спонтанному росту зерна в металле шва в процессе осадки обечаек из сплава 1565чМ в нагретую форму препятствует пластическая деформация.

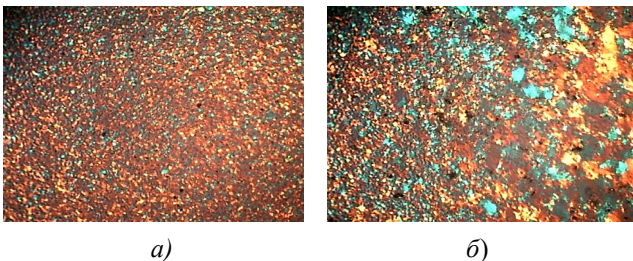


Рис. 6. Микроструктура металла шва сплава 1565чМ без нагрева (а) и после нагрева (б) до температуры 500 °С в процессе испытаний на статическое растяжение

Fig. 6. Microstructure of the weld metal of the 1565chM alloy without heating (a) and after heating (b) to a temperature of 500 °С during static tensile tests

Для обеспечения равномерной деформации сварной заготовки при ее осадке в горячую форму в дальнейшем необходимо определить соотношение между размером зерна в шве и основном металле, при котором этот процесс реализуется. Достичь необходимого соотношения между размерами зерна в шве и основном металле можно путем регулируемого повышения размера зерна в металле шва или за счет уменьшения его размера в основном металле.

Для достижения поставленной цели могут быть применены следующие методы:

- варьирование режима СТП;
- сопутствующий подогрев заготовок при СТП;
- выполнение швов двухсторонней сваркой и с использованием Бобинного инструмента;
- проведение отжига сварных соединений после сварки;
- фрикционная обработка основного металла на участке осадки сварной обечайки в горячую форму;
- использованием для изготовления сварных обечаек ультра мелкозернистого основного металла.

Заключение

1. Основной причиной возникновения эффекта вытекания металла шва при осадке сварной обечайки в горячую форму является резкие различия в размере зерна металла шва при СТП и основного металла. При этом металл шва проявляет четко выраженную склонность к сверхпластичности.

2. Установлено, что при нагреве соединений СТП сплава 1565чМ начиная с температуры 500 °С проявляется спонтанный рост зерна. Также показано, что пластическая деформация образцов в процессе статического растяжения при повышенной температуре способствует подавлению спонтанного роста зерна в металле шва.

3. Намечены основные направления исследований для обеспечения равномерной деформационной способности основного металла и металла шва при осадке сварной обечайки из сплава 1565чМ в горячую форму.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. М.: Руда и металла, 2020. 476 с.
2. Колобнев Н.И. Алюминиево-литиевые сплавы со скандием // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 12–16.
3. Федорчук В.Е., Кушнарера О.С., Алексеенко Т.А., Фальченко Ю.В. Особенности легирования скандием металла швов сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 2014. № 5. С. 30–34.
4. Поляцкий А.Г. Особенности распределения температур в тонколистовом алюминиевом сплаве АМг5М при сварке трением с перемешиванием // Автоматическая сварка. 2011. № 8. С. 48–51.
5. Овчинников В.В. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием алюминиевых и

магниевых сплавов (обзор) // Машиностроение и инженерное образование. 2016. № 4. С. 22–45.

6. **Mishra R.S., Ma Z.Y.** Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2005. Vol. 50. P. 1–78.

7. **Elangovan K., Balasubramanian V.** Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy // Materials & Design. 2008. Vol. 29. P. 362–373.

8. **Gratecap F., Racineux G., Marya S.** A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding // International Journal of Material Forming. 2008. Vol. 1. P. 143–158.

9. **Kumar K., Kailas SV., Srivatsan T.S.** The Role of Tool Design in Influencing the Mechanism for the Formation of Friction Stir Welds in Aluminum Alloy 7020 // Materials and Manufacturing Processes. 2011. Vol. 26. P. 915–921.

10. **Sato Y.S., Urata M., Kokawa H.** Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063 // Metallurgical and Materials Transactions A. 2002. Vol. 33. P. 625–635.

11. **Cavaliere P., Squillace A., Panella F.** Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 200. P. 364–372.

12. **Дриц А.М., Овчинников В.В., Бакшаев В.А. и др.** Влияние подачи на один оборот инструмента при сварке трением с перемешиванием на формирование и свойства швов алюминиевого сплава 1565чМ // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 10. С. 442–451.

13. **Дриц А.М., Овчинников В.В., Бакшаев В.А.** Критерии выбора параметров режима сварки трением с перемешиванием тонких листов из алюминиевого сплава 1565ч // Цветные металлы. 2018. № 1. С. 85–93.

REFERENCES

1. **Drits A.M., Ovchinnikov V.V.** Welding of aluminum alloys. Moscow: Ruda i metally, 2020, 476 p.

2. **Kolobnev N.I.** Aluminum-lithium alloys with scandium // Metal science and heat treatment, 2002, No. 7, pp. 12–16.

3. **Fedorchuk V.E., Kushnareva O.S., Alekseenko T.A., Falchenko Yu.V.** Features of scandium alloying of metal welds of welded joints of extrahigh tensile aluminum alloys // Automatic welding, 2014, No. 5, pp. 30–34.

4. **Poklyatsky A.G.** Features of the temperature distribution in thin-sheet aluminum alloy AMg5M during friction stir welding/ Automatic welding, 2011, No. 8, pp. 48–51.

5. **Ovchinnikov V.V.** Technological features of friction stir welding of aluminum and magnesium alloys (review) // Machine building and engineering education, 2016, No. 4, pp. 22–45.

6. **Mishra R.S., Ma Z.Y.** Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2005. Vol. 50. P. 1–78.

7. **Elangovan K., Balasubramanian V.** Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy // Materials & Design. 2008. Vol. 29. P. 362–373.

8. **Gratecap F., Racineux G., Marya S.** A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding // International Journal of Material Forming. 2008. Vol. 1. P. 143–158.

9. **Kumar K., Kailas SV., Srivatsan T.S.** The Role of Tool Design in Influencing the Mechanism for the Formation of Friction Stir Welds in Aluminum Alloy 7020 // Materials and Manufacturing Processes. 2011. Vol. 26. P. 915–921.

10. **Sato Y.S., Urata M., Kokawa H.** Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063 // Metallurgical and Materials Transactions A. 2002. Vol. 33. P. 625–635.

11. **Cavaliere P., Squillace A., Panella F.** Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 200. P. 364–372.

12. **Drits A.M., Ovchinnikov V.V., Bakshaev V.A. et al** Feeding movement effect on turn of the tool during friction stir welding for the formation and properties of aluminum alloy 1565chM joints// Blank production in mechanical engineering, 2017, No. 10, pp.442–451.

13. **Drits A.M., Ovchinnikov V.V., Baksheev V.A.** Criteria for selecting parameters of the friction stir welding mode of aluminum alloy 1565h thin sheets // Tsvetnye metally, 2018, No. 1, pp. 85–93.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.10.2023; одобрена после рецензирования 03.11.2023; принята к публикации 20.11.2023.

The article was submitted 14.10.2023; approved after reviewing 03.11.2023; assepted for publication 20.11.2023.