

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВОВ 1420 И 01570

Л.П. Андреева, В.В. Овчинников, Г.Р. Латыпова

В статье приведены результаты исследования характеристик развития трещин и остаточной прочности в сварных соединениях из алюминиевых сплавов 1420 и 01570 при различных технологических вариантах процесса сварки. Показано, что характеристики вязкости разрушения и остаточной прочности сварных соединений материала 1420, полученные на ширине 750 мм находятся в тех же пределах, что и для ширины 300 мм и существенно не отличаются от характеристик тонких катанных листов этого же сплава. На сварных соединениях, подвергшихся правке с термофиксацией без снятия валика выпуклости шва, развитие трещины носило многоочаговый характер.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварные соединения, вязкость разрушения, остаточная прочность, скорость развития трещины.

Введение

Применение свариваемых алюминиевых сплавов в качестве конструкционного материала для герметичных топливных отсеков фюзеляжа при высокой степени автоматизации процесса сварки позволяет решать очень важные вопросы создания серийной технологии их изготовления.

Совершенствованию технологии сварки посвящен ряд работ [1–7], в результате которых была заменена присадочная проволока для аргонодуговой сварки сплава 1420.

Однако, повышенная окисляемость при сварке сплава 1420 создает определенные технологические трудности при выполнении замыкающих швов там, где затруднительно или практически невозможно осуществить защиту обратной стороны шва инертным газом.

Другим высокопрочным свариваемым алюминиевым сплавом является опытный сплав 01570 [8–12]. Этот сплав не требует гарантированной защиты корня шва инертным газом, обладает повышенной пластичностью при достаточно высокой прочности, что позволяет рассматривать сплав 01570 как перспективный конструкционный материал для изготовления сварных элементов обшивки, в том числе и при расположении сварных соединений в труднодоступных местах [10, 12]. При этом следует учитывать, что плотность сплава 01570 составляет 2,61 г/см³ против плотности 2,41 г/см³ сплава 1420.

Целью данной работы является исследование характеристик трещиностойкости сварных соединений сплавов 1420 и 01570, изготовленных по различным технологическим схемам.

Материалы и методики проведения исследований

Испытаниям подвергались плоские сварные образцы толщиной $a = 2,4$ мм из сплавов 1420 и 01570. В процессе исследований было испытано 23 образца размером 300×900 мм и четыре образца размером 750×1200 мм.

Для изготовления образцов из сплава 1420 использовали лист толщиной $a = 3$ мм (химический состав приведен ниже, механические свойства – в табл. 1).

Листы из сплавов 1420 и 01570 перед сваркой подвергали химическому фрезерованию для удаления поверхностного слоя по 0,25 мм с каждой стороны с последующим шабрением свариваемых кромок.

Для листов сплава 1420 перед химическим фрезерованием проводили термическую обработку, включающую закалку при температуре $T = 460 \pm 5$ °C с охлаждением на воздухе и искусственное старение при температуре $T = 120 \pm 5$ °C в течение 12 ч. Образец № 8 из данного сплава не подвергался искусственному старению.

Образцы из сплава 1420 сваривали аргонодуговой сваркой с присадочными проволоками СвАМг63 и СвАМг8 (табл. 2). Присадочную

проволоку перед сваркой травили в щелочи NaOH с последующим осветлением в 30 % растворе азотной кислоты. Сварку выполняли на специальных технологических подкладках, которые обеспечивали защиту корня шва инертным газом (аргоном) и формирование проплава.

Образцы сплава 01570 перед химическим фрезерованием подвергались отжигу по трем режимам:

1) нагрев до 320 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе;

2) нагрев до 325 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до 250 °С, выдержка 45 мин., далее охлаждение на воздухе;

3) нагрев 325 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до 200 °С, далее охлаждение на воздухе.

Автоматическую аргонодуговую сварку (ААрДС) проводили на сварочном стенде на базе вертикального фрезерного станка с ЧПУ ФП117, который был оснащен сварочной головкой, источником питания и зажимным сборочно-сварочным приспособлением. Режимы сварки образцов исследуемых сплавов приведены в табл. 3.

Сварку проводили с фиксацией заготовок с защитой корня шва аргоном. Все образцы после сварки подвергали рентгеноконтролю с последующей подваркой недопустимых дефектов.

Из сплава 1420 были изготовлены три партии образцов, которые отличались обработкой после сварки. Образцы серий 5 и 6 подвергались правке на прессе. На образцах серии 6, кроме этого, проводили полную зачистку сварных швов с удалением валика выпуклости шва с лицевой и обратной стороны соединения. Образцы серии 7 подвергались правке с последующей термофиксацией по режиму: закалка при температуре 400±5 °С, выдержка 40 мин. и искусственное старение при $T = 120 \pm 5$ °С, выдержка 12 ч.

Образцы шириной $b = 750$ мм испытывали на электрогидравлической машине (ЭГМ) с максимальным усилием 2500 кН, а шириной 280–300 мм на ЭГМ с максимальным усилием 1000 кН. Образцы испытывали по асимметричному циклу с коэффициентом асимметрии $R = 0,1$ при частоте нагружения $f = 1\text{--}3$ Гц. Испытания проводили до полного разрушения при постоянном значении $\sigma_{\max}$ 100 и 150 МПа (образцы 01570 серии 2 были испытаны при $\sigma_{\max} = 100$ МПа).

В образцах в районе зоны сплавления наносили концентратор в виде отверстия диаметром 3 мм с надрезами по обе стороны по 2,5–3 мм. Для регистрации развития трещин по обе стороны концентратора наклеивали фольговые датчики трещин последовательного обрыва.

Химический состав листов сплавов 1420 и 01570 толщиной 3,0 мм

Марка сплава	Технические условия	Содержание легирующих элементов, мас. %									
		Mg	Li	Sc	Zr	Fe	Si	Cu	Mn	Zn	Be
1420	1-92-2876	5,6	2,38	—	0,1	0,05	0,08	0,01	0,25	0,02	0,0003
01570		6,2	—	0,2	0,05	0,06	0,05	0,04	0,32	0,05	0,0003

Таблица 1

Механические свойства листов исследуемых сплавов

Марка сплава	Направление вырезки образца	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1420	долевое	474–483	343–344	7–8
	поперечное	480–492	328–333	9–10
01570	долевое	425–438	300–307	16–18
	поперечное	435–442	289–297	18–20

Таблица 2

Химический состав присадочных материалов

Марка присадки	Содержание легирующих элементов, мас. %									
	Mg	Cr	Mn	Fe	Si	Zr	Sc	Zn	Be	Ti
СВАМг63	5,8–6,8	—	0,5–0,8	0,4	0,4	—	—	—	0,0002	0,02–0,1
СВАМг8	7,6–7,8	0,25	0,09	—	—	0,11	—	—	0,0005	0,17
Св01571	6,2–6,5	0,04	0,32	0,06	0,05	0,05	0,2	0,05	0,0005	—

Информация с датчиков трещин по мере развития трещины записывалась в память компьютера в виде текущего значения числа циклов нагружения и длины трещины. В дальнейшем эти данные обрабатывали для вычисления значений скорости распространения усталостной трещины (СРТУ) при фиксированных изменениях вязкости разрушения ΔK .

Результаты испытаний и их анализ

Листы сплава 1420 (основной материал). Было испытано два образца 18-1Д и 18-2Д в долевом направлении и два образца 19-1П и 19-3П в поперечном направлении. Испытания проводили на двух уровнях напряжения $\sigma_{\max} = 100$ МПа и по одному образцу от каждого направления для уровня напряжений $\sigma_{\max} = 150$ МПа. Размеры испытанных образцов и полученные результаты приведены в табл. 4.

Значения характеристик трещиностойкости основного материала при долевом направлении вырезки образцов находятся на достаточно высоком уровне (см. табл. 4).

Было испытано 16 образцов сварных соединений сплава 1420, которые были обработаны по описанным выше технологиям. Испытания проводились при напряжениях $\sigma_{\max} = 100...150$ МПа. Образцы шириной $b = 280$ мм имели начальные надрезы $2l = 9 \pm 0,5$ мм по линии шва (рис. 1). В табл. 5 приведены параметры образцов, общая долговечность до разрушения N и характеристики трещиностойкости – вязкость разрушения K_{IC} , остаточная прочность $\sigma_{C \text{ нетто}}$ и СРТУ.

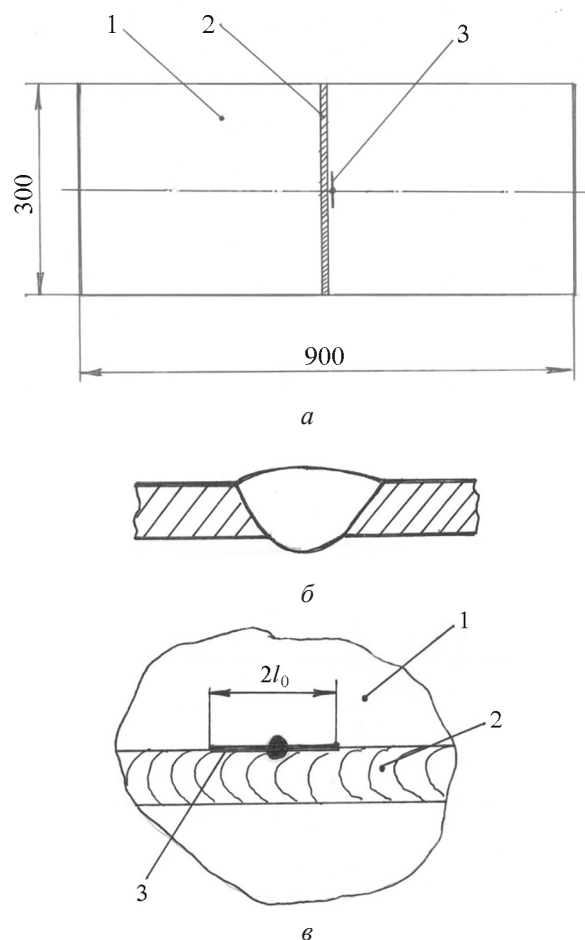


Рис. 1. Образец для определения характеристики трещиностойкости сварного соединения:
а – форма испытываемого образца; б – форма сварного шва; в – надрез и его расположение в сварном соединении; 1 – образец; 2 – сварной шов; 3 – надрез

Таблица 3

Режимы автоматической аргодуговой сварки образцов сплавов 1420 и 01570

Марка сплава	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Диаметр присадочной проволоки, мм	Скорость подачи присадочной проволоки, м/ч
1420	80–90	9,6	2	11–12
01570	130–140	13	2	12–16

Таблица 4

Характеристики трещиностойкости листов из сплава 1420

Номер образца	a, мм	b, мм	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$, МПа	N, цикл	K_{IC} , кг/мм ^{3/2}	$\sigma_C^{\text{нетто}}$, МПа	СРТУ, мм/цикл	
							$\Delta K = 60$ кг/мм ^{3/2}	$\Delta K = 100$ кг/мм ^{3/2}
Долевые образцы								
18–1Д	2,4	300	100/10	115240	303	417	1,0	5,4
18–2Д	2,4	300	150/15	29733	306	346	1,0	7,0
Поперечные образцы								
19–1П	2,4	300	100/10	74591	276	357	1,0	6,0
19–3П	2,4	300	150/15	30084	282	318	1,0	8,5

Образцы (7–1СП, 7–2СП и 7–3СП партия 7) характеризуются многоочаговым разрушением по всей зоне сварного шва. Трещины от надреза развивались медленнее, чем от дефектов сварного шва и валика выпуклости шва. Образцы имели низкие значения долговечности и характеристик трещиностойкости, которые были определены только для одного образца. Фрактграмма разрушения приведена на рис. 2.

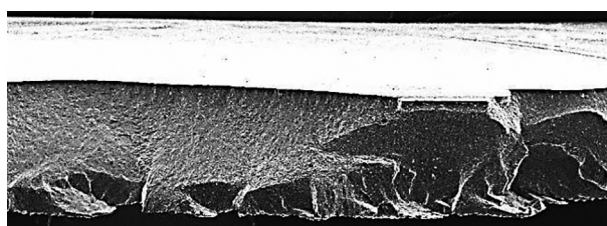


Рис. 2. Многоочаговый излом по трещине образца 7–1СП из сплава 1420 (×10)

Образцы партии 5 (5–1СП, 5–2СП и 5–3СП) также характеризуются многоочаговым разрушением от выпуклости шва с лицевой стороны соединения, однако в меньшей степени, чем для образцов партии 7. Значения вязкости разрушения для них выше, хотя и имел место значительный разброс $K^y_c = 157\text{--}263 \text{ кг/мм}^{3/2}$. Долговечность образцов значительно выше, чем образцов партии 7. Фотография изломов образцов приведена на рис. 3.

Образцы 6–1СП...6–6СП характеризуются, в основном, разрушением при развитии тре-

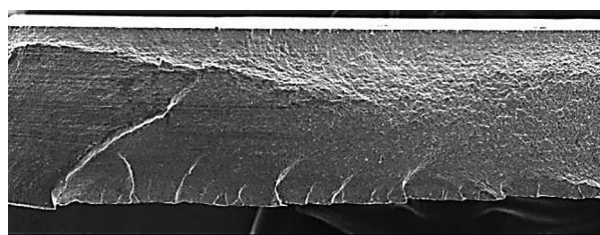


Рис. 3. Многоочаговый излом образца 5–2СП по трещине (×10)

щины от начального надреза. Другие трещины на этом типе образцов проявляются при 70–90 % от полной долговечности (размер по поверхности 3,5 мм) и в дальнейшем соединяются с основной трещиной. Поэтому во многих случаях невозможно определить текущее значение ΔK , а соответственно, и скорости распространения усталостной трещины при заданных значениях ΔK .

Максимальное и среднее значение вязкости разрушения для этой партии образцов достигает значений для листов (из основного материала) без сварки. Фотография изломов приведена на рис. 4.

В табл. 6 приведены параметры нагружения образцов и результаты испытаний двух партий сварных образцов из сплава 01570.

Характеристики трещиностойкости образцов сплава 01570 в среднем оказались выше, чем лучшие образцы (партия 6) из сплава 1420. Наличие выпуклости шва с лицевой стороны соединения для образцов из сплавов 01570 менее критично, чем для сварных образцов из сплава 1420.

Таблица 5

Характеристики трещиностойкости сварных соединений листов из сплава 1420

Номер образца	a, мм	b, мм	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$, МПа	N, цикл	K^y_c , кг/мм ^{3/2}	$\sigma_{\text{с нетто}}$, МПа	СРТУ, мм/кц	
							$\Delta K = 60 \text{ кг/мм}^{3/2}$	$\Delta K = 100 \text{ кг/мм}^{3/2}$
7–1СП	2,5	280	100/10	6611	105	130	1,0	5,6
7–2СП	2,5	280	150/15	6683	—	—	—	—
7–3СП	2,5	280	100/10	119	—	—	—	—
5–1СП	2,5	280	150/15	65754	—	—	—	—
5–2СП	2,45	280	100/10	13682	157	195	—	—
5–3СП	2,45	280	150/15	41943	263	289	0,65	5,0
6–1СП	2,45	280	100/10	97760	213	256	—	—
6–2СП	2,45	280	120/10	47578	231	267	—	—
6–3СП	2,45	280	100/10	29327	252	322	2,5	8,0
6–4СП	2,45	280	150/15	7122	264	300	—	—
6–5СП	2,45	280	150/15	55192	319	380	—	—
6–6СП	2,45	280	150/15	9294	240	272	2,5	8,0
C1–B	2,5	735	104/10	—	157	130	—	—
C2–B	2,5	735	104/10	—	200	146	—	—
C3–B	2,5	735	100/10	—	175	194	—	—

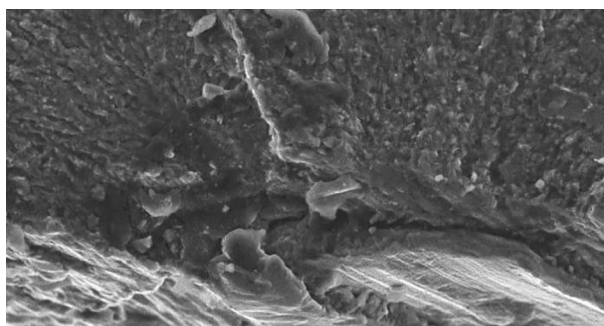


Рис. 4. Одноочаговый излом по трещине образца 6-2СП (×500)

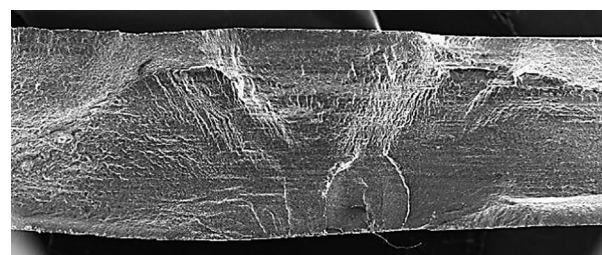


Рис. 5. Многоочаговый излом сварных образцов сплава 01570 (×10)

Таблица 6

Характеристики трещиностойкости сварных соединений листов из сплава 01570

Номер образца	a, мм	b, мм	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$, МПа	N, цикл	K_{σ}^y , кг/мм ^{3/2}	$\sigma_{\sigma}^{\text{нетто}}$, МПа	СРТУ, мм/кц	
							$\Delta K = 60$ кг/мм ^{3/2}	$\Delta K = 100$ кг/мм ^{3/2}
1А	2,9	280	150/15	22041	307	366	0,7	6,5
2А	2,9	280	135/13	8636	279	338	—	—
3А*	2,9	280	100/10	109861	336	200	—	—
21А*	2,9	280	70/7	129170	—	195	—	—
26А	2,9	280	70/7	175905	246	388	1,2	4,9
23СД	2,9	280	70/7	103290	311	195	0,9	4,0
11СД2*	2,9	274	100/10	135280	277	185	—	—

* боковая трещина от дефекта сварного шва.

Вязкость разрушения и остаточная прочность для сварных образцов сплава 01570 составили $K_{\sigma}^y = 246\text{--}336$ кг/мм^{3/2} и $\sigma_{\sigma}^{\text{нетто}} = 195\text{--}388$ МПа.

Значения скорости роста трещин:

- при $\Delta K = 60$ кг/мм^{3/2} составили $d2l/dN = 0,7\text{--}1,2$ мм/кц;
- при $\Delta K = 100$ кг/мм^{3/2} составили $d2l/dN = 4,0\text{--}6,5$ мм/кц;

Фотографии изломов образцов сплава 01570 приведены на рис. 5.

Сварные соединения характеризуются многоочаговым комбинированным усталостным разрушением. При таком разрушении одновременно развивается несколько типов трещин:

- сквозные от начальных надрезов;
- поверхностные, распространяющиеся вглубь образца и по поверхности;
- сквозные от дефектов на кромках образца.

Для каждого из указанных случаев существуют методы определения СРТУ и обработки результатов эксперимента для получения кинетических диаграмм усталостного разрушения. Однако, в настоящее время не существует методов обработки и получения данных СРТУ при одновременном распространении разных типов трещин.

Выводы

Проведены исследования трещиностойкости основного материала и сварных соединений листов толщиной 2,4–3 мм из сплавов 1470 и 01570, выполненных по различным технологическим вариантам. Результаты исследований показали, что:

1. Вязкость разрушения и остаточная прочность материала 1420 и различных технологических вариантов сварных соединений составили:

а) основного материала в долевом и поперечном направлении: $K_{\sigma}^y = 276\text{--}306$ кг/мм^{3/2} и $\sigma_{\sigma}^{\text{нетто}} = 318\text{--}417$ МПа;

б) сварных соединений с последующей правкой на прессе и удалением выпуклости шва с лицевой и корневой стороны соединения:

$K_{\sigma}^y = 213\text{--}319$ кг/мм^{3/2} и $\sigma_{\sigma}^{\text{нетто}} = 256\text{--}380$ МПа;

в) на сварных соединениях без выпуклости шва с лицевой и корневой стороны соединения:

$K_{\sigma}^y = 157\text{--}263$ кг/мм^{3/2} и $\sigma_{\sigma}^{\text{нетто}} = 195\text{--}289$ МПа;

г) на сварных соединениях, подвергшихся правке с термофиксацией без снятия выпуклости шва, развитие трещины имело многоочаговый характер, вследствие чего характеристики разрушения были определены только на одном образце.

2. Существующие методы обработки результатов испытаний на СРТУ в ряде случаев не позволяют определить характеристики трещиностойкости сварных соединений при многоочаговом разрушении.

Заключение

Исследования показали, что у сварных соединений из алюминиевых сплавов 1420 и 01570 после термофиксации разрушение образцов с наличием выпуклости шва носило многоочаговый характер. При этом развитие трещины от надреза происходит медленнее, чем от внутренних дефектов сварных швов и выпуклости самого шва. Полученные данные полезны для практического использования, поскольку скорость распространения усталостной трещины является важной характеристикой для алюминиевых сплавов, применяемых в сварных конструкциях.

Список литературы

1. Сироткин О.С., Мацнев В.Н., Рязанцев В.И. Конструктивно-технологические проблемы производства топливных баков для многоцелевой авиационно-космической системы // Авиационная промышленность. 2001. № 3. С. 5–11.
2. Мацнев В.Н., Рязанцев В.И., Данилов С.Ф. Исследование технологических возможностей Al–Li-сплава 01421 для штампосварных интегральных конструкций // Авиационная промышленность. 2004. № 3. С. 36–42.
3. Захаров В.В. Некоторые проблемы использования алюминиево-литиевых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 2. С. 8–14.
4. Влияние термической обработки на структурное состояние сварных соединений сплава 1420 / В.В. Овчинников, О.Е. Грушко, М.А. Гуреева, И.Н. Фридляндер // Технология металлов. 2006. № 10. С. 21–23.
5. Взаимосвязь сопротивления разрушению и структурных превращений при сварке сплава 1422 / Т.М. Лабур, А.Я. Ищенко, Т.Г. Таранова, Г.М. Григоренко, В.А. Костин, А.А. Чайка // Сварочное производство. 2013. № 5. С. 3–8.
6. Грушко О.Е., Овсянников В.В., Овчинников В.В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение: монография. М.: Наука, 2014. – 298 с.
7. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов: монография. М.: Издательство «Руда и металлы», 2017. – 440 с.
8. Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д. Влияние содержания скандия на структуру и свойства алюминия // Технология легких сплавов. 1984. № 4. С. 5–11.
9. Филатов Ю.А. Промышленные сплавы на основе системы Al–Mg–Sc // Технология легких сплавов. 1996. № 3. С. 30–35.
10. Исследование совместного влияния скандия и хрома на структуру и механические свойства алюминия и его сплавов с магнием / Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, И.Г. Королькова, М.Н. Болотова // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 3. С. 24–27.
11. Рудзей Г.Ф. Влияние дефектов сварки и числа ремонтных проходов на сопротивление усталости сварных соединений из алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 2013. № 11. С. 32–35.
12. Сплав 1570С – материал для герметичных конструкций перспективных многофазовых изделий РКК «Энергия» / А.В. Бронз, В.И. Ефремов, А.Д. Плотников, А.Г. Чернявский // Космическая техника и технологии. 2014. № 4 (7). С. 62–67.

АНДРЕЕВА Людмила Павловна

Московский политехнический университет
E-mail: andree-va@mail.ru
Тел.: (916) 144-21-84

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства». Сфера научных интересов: релаксация напряжений в сварных соединениях алюминиевых сплавов, сварка трением с перемешиванием. Автор 55 научных публикаций.

ОВЧИННИКОВ Виктор Васильевич

Московский политехнический университет
E-mail: vikov1956@mail.ru
Тел.: (962) 967-55-11

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение». Сфера научных интересов: разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов и способов получения из них сварных соединений. Автор 283 научных публикаций.

ЛАТЫПОВА Гульнора Рашитовна

Московский политехнический университет
E-mail: taksa2@yandex.ru
Тел.: (916) 230-45-01

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства». Сфера научных интересов: исследование процессов соединения металлов в твердой фазе. Автор 105 научных публикаций.

STUDY OF THE CRACK RESISTANCE OF WELDING COMPOUNDS FROM ALLOYS 1420 AND 01570

Liudmila P. Andreeva, Viktor V. Ovchinnikov, Gulnara R. Latypova

The article provides results of a study of the characteristics of cracks and residual strength development in welded compounds from aluminum alloys 1420 and 01570 at various technological versions of welding process. It is shown that the fracture toughness and residual strength characteristics of the welded compounds of the material 1420 obtained at a width of 750 mm are in the same range as for the width of 300 mm and are not significantly different from the characteristics of thin rolled sheets of the same alloy. Crack development on welded compounds, which were straightened with thermo fixation without removing a bead of the weld convexity, was multi-focal.

Keywords: aluminum alloys, welding compounds, fracture toughness, residual strength, speed of crack development.

References

1. Sirotkin O.S., Matsnev V.N., Ryazantsev V.I. Konstruktivno-tekhnologicheskie problemy proizvodstva toplivnykh bakov dla mnogotselevoi aviatsionno-kosmicheskoi sistemy [Constructive and technological issues of fuel tanks production for the multi-purpose aerospace system] // *Aviatsyonnaia promyshlennost* [Aviation Industry]. 2001. No. 3. P. 5–11.
2. Matsnev V.N., Ryazantsev V.I., Danilov S.F. Issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostei Al-Li splava 01421 dla shtamposvarnykh integralnykh konstruktov [Study of Al-Li 01421 alloy technological capabilities for stamped integrated structures] // *Aviatsyonnaia promyshlennost* [Aviation Industry]. 2004. No. 3. P. 36–42.
3. Zakharov V.V. Nekotorye problem ispolzovaniia Al-Li splavov [Certain problems of Al-Li alloys using] // *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov* [Metal Science and Metal Thermal Treatment]. 2003. No. 2. P. 8–14.
4. Ovchinnikov V.V., Grushko O.E., Gureeva M.A., Friedlander I.N. Vliianie termicheskoi obrabotki na strukturnoe sostoianie svarnykh soedinenii splava 1420 [Effect of thermal processing on the structural condition of welded alloy compounds 1420] // *Tekhnologia metallov* [Metals technology]. 2006. No. 10. P. 21–23.
5. Vzaimosviaz soprotivleniia razrusheniiu i strukturnykh prevraschenii pri svarke splava 1422 [Relationship of resistance to destruction and structural transformations in welding alloy 1422] / T.M. Labour, A.Y. Ishchenko, T.G. Taranova, G.M. Grigorenko, V.A. Kostin, A.A. Chaika // *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding]. 2013. No. 5. P. 3–8.
6. Grushko O.E., Ovsyannikov V.V., Ovchinnikov V.V. Aluminievo-litievye splavy: metallurgii, svarka, metallovedenie: monografia [Al-Li alloys: metallurgy, welding, metal science: monograph.]. M.: Nauka [Science], 2014. – 298 p.
7. Drita A.M., Ovchinnikov V.V. Svarka aluminievykh splavov: monografia [Welding aluminum alloys: monograph.]. M.: Ruda i Metally [Ore and Metals Publishing House], 2017. – 440 p.
8. Elagin V.I., Zakharov V.V., Rostova T.D. Vliianie soderzhaniia skandii na strukturu i svoistva aluminia [Influence of the content of the scandia on the structure and properties of aluminum] // *Tekhnologia liogkikh splavov* [Light alloy technology]. 1984. No. 4. P. 5–11.
9. Filatov Y.A. Promyshlennye splavy na osnove sistemy Al-Mg-Sc [Industrial alloys based on the Al-Mg-Sc system] // *Tekhnologia liogkikh splavov* [Light alloy technology]. 1996. No. 3. P. 30–35.
10. Issledovanie sovmeistnogo vliianiia skandii i khroma na strukturu i mekhanicheskie svoistva aluminia i ego splavov s magniim [Study of the joint effects of scandia and chromium on the structure and mechanical properties of aluminum and its alloys with magnesium] / L.L. Rochlin, T.V. Dobatkina, I.G. Korolkova, M.N. Bolotova // *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov* [Metal and thermal metal treatment]. 2008. No. 3. P. 24–27.
11. Rudzei G.F. Vliianie defektov svarki i chisla remontnykh prokhodov na soprotivlenie ustalosti svarnykh soedinenii iz aluminievykh splavov [Effect of welding defects and the number of repair passages on resistance to fatigue of welded compounds from aluminum alloys] // *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding]. 2013. No. 11. P. 32–35.
12. Splav 1570C – material dla germetichnykh konstruktov perspektivnykh mnogorazovykh izdelii RKK Energiia [Alloy 1570C is a material for airtight designs of rsc Energia's promising reusable products] / A.V. Bronz, V.I. Efremov, A.D. Plotnikov, A.G. Chernyavsky // *Spacecraft and technology*. 2014. No. 4 (7). P. 62–67.

Liudmila P. ANDREEVA Moscow Polytechnic University E-mail: andree-va@mail.ru Phone: 8 (916) 144-21-84	Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Welding Production Equipment and Techniques Department. Areas of expertise: tensions relaxation in welding joints of Aluminum alloys, friction stir welding. She authored 55 publications.
Viktor V. OVCHINNIKOV Moscow Polytechnic University E-mail: vikov1956@mail.ru Phone: 8 (962) 967-55-11	Doctor of Technical Science (habil.), Professor, Professor of Materials Science Department. Areas of expertise: development of new Aluminum alloys for welding and methods for welding joints production. He authored a total 283 publications.
Gulnara R. LATYPOVA Moscow Polytechnic University E-mail: taksa2@yandex.ru Phone: 8 (916) 230-45-01	Ph.D. in Technical Science, Associate Professor of Welding Production Equipment and Techniques Department. Areas of expertise: research of solid-phase metals synthesis processes. She authored 105 publications.