

УДК 621.791.14

М.М. Бакрадзе¹, М.Д. Пантелеев¹, А.А. Скупов¹,
В.Е. Белозор², П.А. Пономарев²

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ СТП, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-11-20

Исследовано влияние параметров режима сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469 на шероховатость поверхности шва и механические характеристики сварных соединений. Получены математические (регрессионные) модели зависимостей прочности и шероховатости от параметров процесса СТП. Для каждого из исследуемых сплавов установлена область режимов СТП, обеспечивающих шероховатость поверхности сварного шва $R_z \leq 50$ мкм и прочность сварного соединения на уровне 0,75–0,8 от прочности основного материала.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, регрессионная модель, алюминий-литиевые сплавы, механические свойства, усталостные характеристики.

M.M. Bakradze¹, M.D. Panteleev¹, A.A. Skupov¹, V.E. Belozor², P.A. Ponomarev²

FSW-JOINTS MECHANICAL CHARACTERISTICS OPTIMIZATION BY MODERN COMPUTING SYSTEMS

The influence of the friction stir welding parameters of aluminum-lithium alloys V-1461 and V-1469 on welded joint surface roughness and mechanical properties has been investigated. Experiment planning was carried out and mathematical models for the dependencies of strength and roughness on the parameters of the FSW process were developed. For each of the studied alloys a welding parameter range has been established, which ensures an increased purity of the weld surface after welding ($R_z \leq 50 \mu\text{m}$), absence of defects and the welded joint strength level about 0,75–0,8 of the base metal strength.

Keywords: friction stir welding, regression model, aluminum-lithium alloys, mechanical properties, fatigue characteristics.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) [Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)]; e-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

Для обеспечения возрастающих требований к надежности, ресурсу и весовой эффективности современных летательных аппаратов происходит постоянное совершенствование химического состава алюминиевых сплавов по легирующим элементам и примесям, технологических процессов и технологий их производства [1–3]. Повышенные

конструктивно-технологические и эксплуатационные требования к конструкции воздушного судна, а также современные возможности создания и производства материалов обуславливают переход к применению новых материалов с заданными физико-механическими свойствами, к которым относятся высокомодульные алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности. Важно отметить, что создание высокоэффективных изделий авиационной техники невозможно без успешного решения вопросов, связанных с технологическими процессами их переработки [4–9].

Одним из основных векторов развития металлургии алюминиевых сплавов, направленных на повышение весовой эффективности изделий авиационной и космической техники, является создание высокопрочных деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Li и разработка современных технологий получения их неразъемного соединения. При этом сварка является основным технологическим процессом получения таких соединений.

В то же время изготовление крупногабаритных сварных конструкций традиционными методами сварки плавлением из высокопрочных алюминий-литиевых сплавов связано с серьезными трудностями вследствие их низкой стойкости к образованию горячих трещин и разупрочнению под воздействием термического цикла [10–12].

Решить указанные проблемы и повысить свойства сварных соединений сплавов системы Al–Cu–Li можно, используя перспективный технологический процесс соединения в твердой фазе – процесс сварки трением с перемешиванием (СТП) [13].

Способ СТП был запатентован в СССР в 1965 г. [14] и обладает рядом преимуществ, которые обусловлены соединением в твердой фазе. К ним относятся: малое тепловложение при сварке и, соответственно, малое разупрочнение в зоне термического влияния (ЗТВ); низкие остаточные напряжения в сварном соединении, приводящие к минимизации деформации, что особенно важно при производстве крупногабаритных сварных конструкций из термически упрочняемых алюминиевых сплавов [15, 16]. Помимо этого, способ СТП обеспечивает высокую стабильность размеров и воспроизводимость процесса, отсутствие выгорания легирующих элементов и отсутствие внутренних дефектов типа пор и трещин, а также значительное снижение энергетических затрат. Технологический процесс СТП может успешно применяться для соединения алюминиевых сплавов, относящихся к категории несвариваемых методами сварки, когда вынужденно применяются заклепочные соединения. Это значительно упрощает технологию сборки, позволяет повысить уровень ее автоматизации и снизить массу конструкции. При этом применение СТП для соединения листов из алюминиевых сплавов, легированных литием, позволяет повысить коэффициент прочности соединения до 80% от прочности основного материала [17].

Формирование сварного соединения при СТП происходит в результате разогрева металла в зоне сварки до пластического состояния за счет трения и перемещения под высоким давлением в объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладки. Основными параметрами СТП являются скорость вращения (ω) инструмента, скорость линейного перемещения инструмента (скорость сварки $V_{св}$), а также усилие прижатия инструмента (рис. 1).

Перечисленные параметры определяют условия фрикционного нагрева металла в зоне сварки и существенно влияют не только на значения и ориентацию сил, действующих на пластифицированный металл, но и на количественное фазовое состояние шва и околошовной зоны [18]. Именно поэтому важнейшим этапом разработки технологии СТП является выбор параметров режима сварки, которые определяют не только производительность изготовления сварной конструкции в целом, но и уровень механических свойств соединений [19, 20]. Поэтому эффективный поиск оптимальных

диапазонов параметров режима сварки необходим для обеспечения сбалансированного комплекса эксплуатационных, технологических и ресурсных характеристик сварной конструкции.

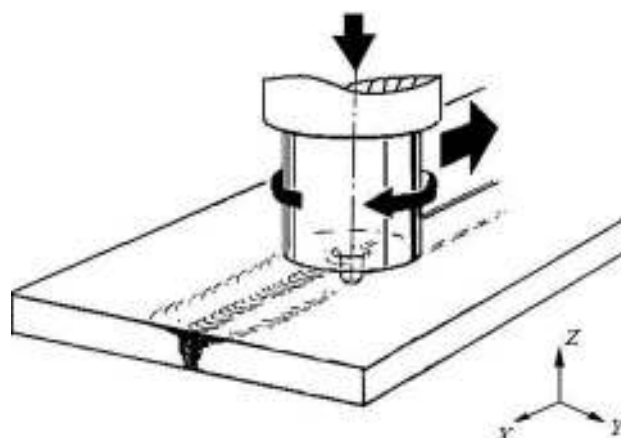


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием [17]

Целью данной работы является определение параметров режима СТП листовых полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469, обеспечивающих уровень прочности сварных соединений не ниже 0,7 от прочности основного металла в сочетании с характеристиками малоциклового усталости на уровне не ниже 150 тыс. циклов. Подобный ресурс особенно важен для конструкций толщиной <5 мм, когда последующая механическая обработка сварных соединений может быть затруднена.

Материалы и методы

Выбор оптимальных режимов сварки основан на поиске экстремума целевой функции предела прочности при разрыве и шероховатости поверхности. Предел прочности при разрыве однозначно характеризует статическую прочность сварного соединения. В качестве косвенного показателя долговечности сварного соединения принято значение шероховатости поверхности, поскольку, во-первых, высокие значения шероховатости поверхности снижают циклическую прочность, во-вторых, способ СТП позволяет получать гладкую поверхность без дополнительной механической обработки.

Целевую функцию строили на основе регрессионного анализа путем обработки результатов эксперимента [21, 22]. Предварительно определяли диапазон технологических параметров сварки сплавов В-1461 и В-1469, обеспечивающий бездефектное формирование сварного соединения.

Изготовленные из сварных соединений образцы испытывали на статическое растяжение и малоцикловую усталость. Переменными параметрами выбраны скорость вращения и линейное перемещение инструмента.

Предел прочности при разрыве (σ_B) сварных соединений определяли в соответствии с ГОСТ 6996–66.

Шероховатость поверхности шва в зоне воздействия рабочего инструмента измеряли с использованием конфокального лазерного сканирующего микроскопа OLYMPUS LEXT OLS3100.

Испытания по определению малоциклового усталости сварных соединений проводили согласно ГОСТ 25.502–79.

Для фрактографического анализа сварных соединений использовали сканирующий электронный микроскоп Verios 460 XHR в соответствии с требованиями ММ1.2 020–2002.

Эксперименты выполняли на образцах из листов толщиной от 3 до 4 мм сплавов В-1461-Т1 и В-1469-Т1.

Для сварки использовали лабораторную установку СТП на базе вертикального фрезерного станка; сварку проводили с использованием серийного инструмента производства АО «ВНИИАлмаз».

Результаты и обсуждение

Зависимости шероховатости и прочности сварных соединений от параметров режима СТП нелинейны и существует область с максимальными (минимальными) значениями. Для исследования подобных нелинейных зависимостей необходимо применение как минимум трех уровней варьирования (ПФЭ 3²) на основании результатов девяти проведенных экспериментов для каждого сплава. Результаты проведения эксперимента по матрице плана второго порядка В₂ представлены в табл. 1 [23].

Таблица 1

Матрица плана второго порядка В₂

Условный номер образца	План эксперимента	
	X ₁	X ₂
1	–	–
2	+	–
3	–	+
4	+	+
5	–	0
6	+	0
7	0	–
8	0	+
9	0	0

Скорость вращения инструмента ω (фактор X₁) варьировалась в пределах 515–790 об/мин, скорость сварки V_{св} (фактор X₂) – в пределах 64–112 мм/мин. Результаты планирования эксперимента по определению предела прочности при разрыве (σ_B) и шероховатости поверхности шва в зоне воздействия рабочего инструмента (R_z) для каждого сплава представлены в табл. 2. Последовательность проведения экспериментов рандомизирована.

Таблица 2

Результаты планирования эксперимента

Условный номер образца	Сплав В-1469		Сплав В-1461	
	σ_B , МПа	R _z , мкм	σ_B , МПа	R _z , мкм
1	395	82	380	77
2	375	91	360	99
3	405	89	365	125
4	415	66	390	101
5	415	70	385	78
6	420	54	390	71
7	405	74	395	68
8	425	67	400	96
9	435	48	410	54

Обработку результатов эксперимента (табл. 3) и последующее построение системы линий уровня (рис. 2 и 3) проводили в программе «Statistica».

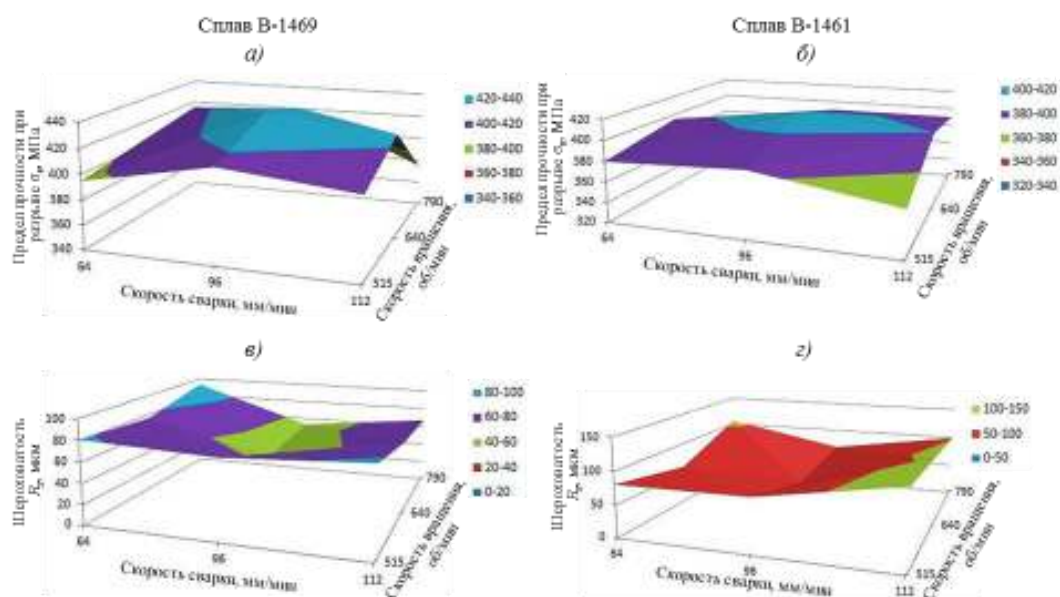


Рис. 2. Зависимости предела прочности при разрыве (а, б) и шероховатости поверхности (в, г) для сварного соединения сплавов В-1469 и В-1461 от режимов сварки трением с перемешиванием

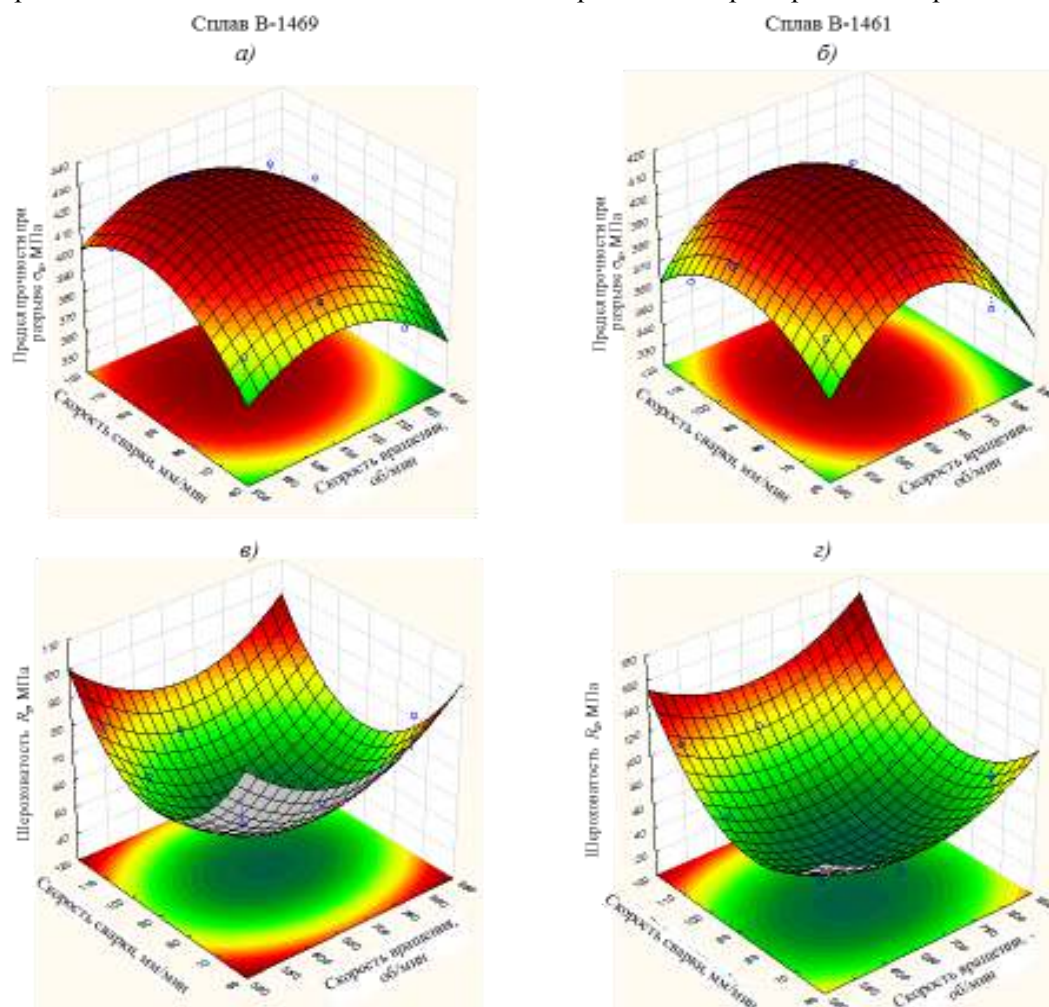


Рис. 3. Поверхности функций отклика предела прочности при разрыве (а, б) и шероховатость поверхности (в, г) в исследуемой области режимов сварки трением с перемешиванием для сплавов В-1469 и В-1461

Таблица 3

Результаты вычисления коэффициентов модели

Коэффициенты регрессии	Функция отклика для сплава			
	В-1469		В-1461	
	$\sigma_{в,св}$, МПа	R_z , мкм	$\sigma_{в,св}$, МПа	R_z , мкм
b0	-105,677	525,01	-131,14	709,662
b1	0,991832	-0,70125	1,34465	-1,0407
b2	4,488076	-5,2476	2,18065	-7,8716
b12	0,00237	-0,00248	0,003331	-0,00346
b11	-0,00093	0,000682	-0,00125	0,001029
b22	-0,03147	0,037977	-0,02387	0,060547

С учетом коэффициентов из табл. 3, соответствующие зависимости могут быть представлены в виде:

для сплава В-1469

$$\sigma_{в} = -105,677 + 0,9918V_{св} + 4,488\omega + 0,00237V_{св} \cdot \omega - 0,00093V_{св}^2 - 0,03147\omega^2, \quad (1)$$

$$R_z = 525,01 - 0,70125V_{св} - 5,2476\omega - 0,00248V_{св} \cdot \omega + 0,000682V_{св}^2 + 0,037977\omega^2;$$

для сплава В-1461

$$\sigma_{в} = -131,14 + 1,34465V_{св} + 2,18065\omega + 0,003331V_{св} \cdot \omega - 0,00125V_{св}^2 - 0,02387\omega^2, \quad (2)$$

$$R_z = 709,662 - 1,0407V_{св} - 7,8716\omega - 0,00346V_{св} \cdot \omega + 0,001029V_{св}^2 + 0,060547\omega^2.$$

Для каждой модели рассчитана дисперсия адекватности и дисперсия ошибок, определяющая меру рассеяния, вызванного экспериментальной ошибкой, по формулам:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n p_i (Y_i' - \hat{Y}_i)^2; \quad (3)$$

$$S_{ош}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} (Y_{ij} - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n p_i - n}, \quad (4)$$

где \hat{Y}_i – значение величины Y, предсказанное полученной эмпирической моделью для каждого из значений X; Y_i' – среднее значение функции отклика в i-ом опыте; n – число опытов; p_i – число параллельных измерений в i-ом опыте.

Адекватность моделей проверяли по критерию Фишера (табл. 4):

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{ош}^2}. \quad (5)$$

Таблица 4

Критерии Фишера для разработанных моделей

Сплав	Модель функции	Расчетное значение критерия F_p	Табличное значение F_p
В-1469	Модель σ	2,159	2,227
	Модель R_z	1,316	
В-1461	Модель σ	2,172	
	Модель R_z	0,526	

Видно, что наибольшее влияние на шероховатость лицевой поверхности сварных соединений (и как следствие – на усталостную долговечность [24]) оказывает скорость сварки, так как перед ней стоит наибольший коэффициент Фишера. При этом модели менее чувствительны к изменению скорости вращения инструмента.

Для полученных поверхностей отклика найдены (табл. 5) экстремумы и соответствующие им значения скорости сварки и скорости вращения инструмента.

Таблица 5

Экстремумы функций σ_b и R_z для сплавов В-1469 и В-1461

Сплав	Функция	Значение	ω	$V_{св}$
В-1469	σ	435	655,5	96
	R_z	47	680,1	91
В-1461	σ	413	660	92
	R_z	45	646	84

В табл. 6 представлены наиболее высокие значения механических характеристик сварных соединений, получение которых возможно при соблюдении режимов, соответствующих расчетным значениям.

Таблица 6

Механические свойства сварных соединений сплавов В-1469 и В-1461

Сплав	σ_b , МПа*	$k = \sigma_{b,св} / \sigma_b$
В-1469	415–440	0,8
	435	
В-1461	390–400	0,75
	395	

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Анализ полученных результатов показывает, что область минимальной шероховатости $R_z \leq 50$ мкм располагается внутри области $\sigma_{b,св} / \sigma_b \leq 0,8$. Полученные зависимости позволяют при заданных параметрах режима прогнозировать значения шероховатости и прочности сварного шва применительно к используемому инструменту.

Известно, что при увеличении шероховатости поверхности деталей снижаются их усталостные характеристики [25]. При СТП формируется специфическая поверхность шва – более грубая, чем исходная поверхность листа. Поэтому при условии отсутствия внутренних дефектов малоцикловая усталость (МЦУ) сварного образца будет определяться именно морфологией лицевой поверхности шва, которая может быть охарактеризована параметром шероховатости R_z , меняющимся в зависимости от режима сварки. Для установления характера этой зависимости испытывали образцы из сплавов В-1469 и В-1461 на МЦУ при напряжении $\sigma_{max}^{нетто} = 196$ МПа. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Установлено, что сварные соединения сплавов В-1469 и В-1461 с шероховатостью поверхности швов $R_z \leq 50$ мкм показывают высокие значения МЦУ: более 300 тыс. циклов без разрушения для сплава В-1461 и более 150 тыс. циклов для сплава В-1469.

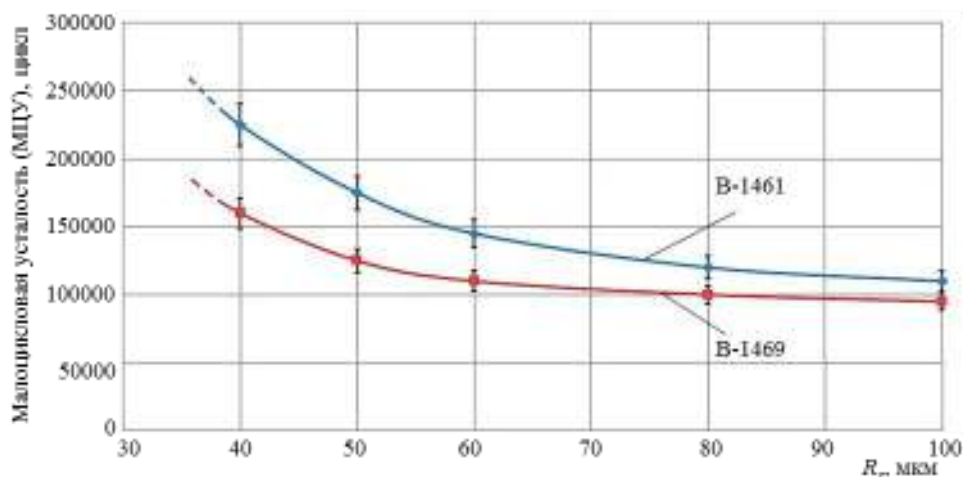


Рис. 4. Зависимость МЦУ от шероховатости поверхности сварных соединений сплавов В-1469 и В-1461 (при напряжении $\sigma_{\max}^{\text{нетто}} = 196$ МПа)

Фрактографический анализ сварных соединений сплавов В-1469 и В-1461 после испытаний на МЦУ показал, что очаги изломов непосредственно связаны с неровностями сварного шва. При шероховатости лицевой поверхности сварного шва $R_z \leq 50$ мкм в изломах сварных образцов наблюдается один развитый очаг разрушения. Разрушение сварного соединения сплава В-1469 развивается от усталостных трещин (рис. 5).

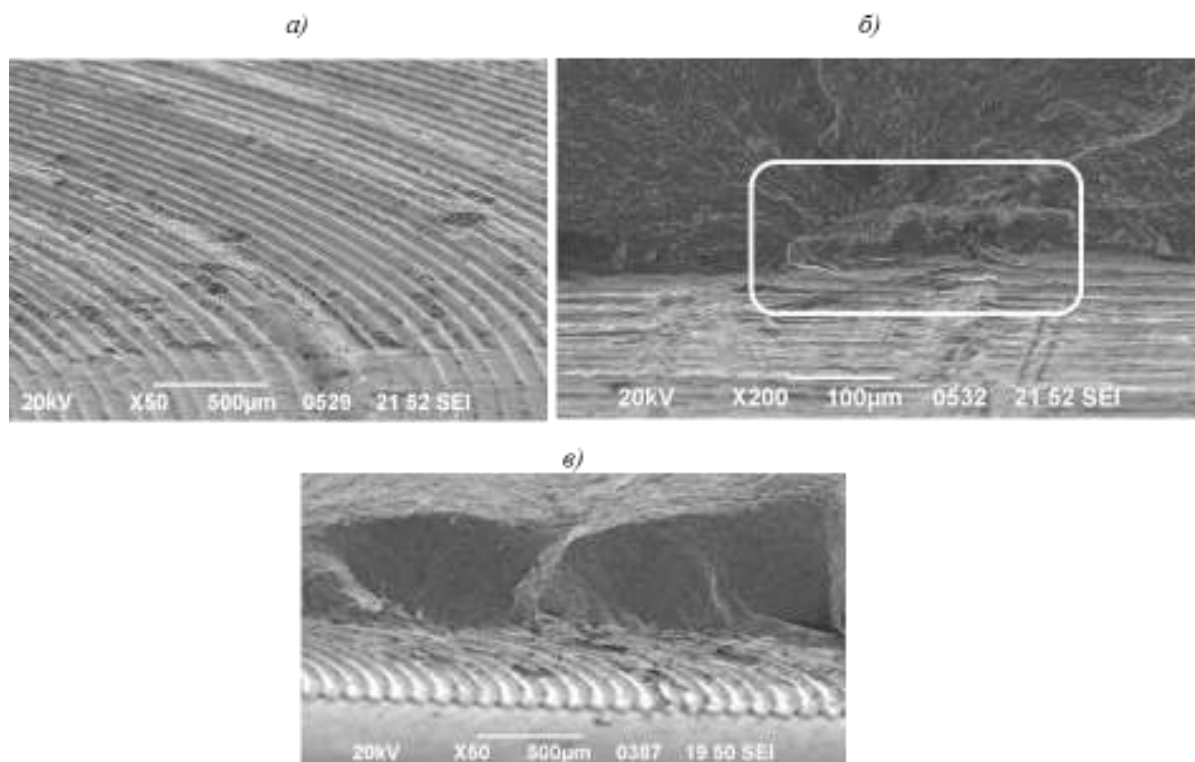


Рис. 5. Сварное соединение сплава В-1469 (а) с одноочаговым (б) и многоочаговым характером разрушения (в)

При шероховатости лицевой поверхности шва $R_z \geq 60$ мкм очагами разрушения сварных образцов являются грубые неровности сварного шва и разрушение становится многоочаговым, развиваясь на все сечение образца.

Заключения

1. Построены математические (регрессионные) модели зависимостей прочности и шероховатости поверхности соединений, выполненных СТП, от технологических параметров сварки – скорости сварки ($V_{св}$) и скорости вращения инструмента (ω).

2. Определена область режимов СТП для алюминий-литиевых сплавов В-1469 и В-1461, обеспечивающих прочность сварного соединения на уровне 0,75–0,8 от прочности основного материала и значения МЦУ более 300 тыс. циклов без разрушения (при напряжении $\sigma_{\max}^{\text{нетто}} = 196$ МПа).

3. Применение режимов СТП с пониженной шероховатостью поверхности позволяет повысить характеристики сопротивления усталости сварных соединений.

4. Установленные зависимости МЦУ от шероховатости сварных соединений сплавов В-1469 и В-1461 позволят прогнозировать потенциальный ресурс сварных соединений и при необходимости вводить мероприятия по улучшению чистоты поверхности сварных швов.

5. Определено критическое значение шероховатости ($R_z \leq 50$ мкм) поверхности сварных швов, выполненных СТП, при котором меняется характер разрушения сварных соединений с многоочагового до одноочагового и происходит повышение характеристик сопротивления усталости сварных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8 (884). С. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.
3. Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Скупов А.А., Щербачев А.В., Белозор В.Е. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.
4. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Козлова О.Ю., Пантелеев М.Д., Осипов Н.Н., Клычев А.В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №10 (70). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.
5. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
6. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 3–10.
8. Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
9. Ключкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 8–12.
10. Шалин Р.Е., Ефремов И.С., Яровинский Ю.Л., Лукин В.И. Опыт проектирования и изготовления крупногабаритных конструкций из алюминий-литиевых сплавов изделий ракетно-космической техники // Сварочное производство. 1996. №11. С. 14–18.

11. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Лавренчук В.П., Котельникова Л.В., Оглодков М.С. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминиево-литиевого сплава В-1461 // Сварочное производство. 2010. №11. С. 14–17.
12. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Антипов В.В., Клочков Г.Г., Скупов А.А. Влияние термической обработки на структуру сварных соединений листов из сплава В-1469 системы Al–Cu–Li, полученных лазерной сваркой // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 9–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-9-18.
13. Petrovic M., Veljic D., Rakin M. et al. Friction-stir welding of high-strength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage // Materials in technology. 2012. Vol. 46. No. 3. P. 215–221.
14. Способ сварки металлов трением: а.с. 195846 СССР; опубл. 04.05.67.
15. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Journal Material Science Engineering. 2005. Vol. 50. P. 1–78.
16. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений // Сварочное производство. 2007. №9. С. 35–40.
17. Бецофен С.Я., Сбитнева С.В., Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Долгова М.И., Кабанова Ю.В. Исследование формирования фазового состава сплава системы Al–Cu–Li В-1469 в процессе сварки трением с перемешиванием // Металлы. 2018. №6. С. 54–63.
18. Силис М.И., Елисеев А.А., Силис В.Э. и др. Особенности структуры сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных фрикционной сваркой // Металловедение и термическая обработка. 2009. №4. С. 34–39.
19. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 15–19.
20. Yanfeng D., Zhijie T., Peitao G., Yanhua Z. Effect of process parameters on weld quality by friction stir welding of 2219 aluminum alloy // China Welding. 2011. Vol. 20. No. 2. P. 12–16.
21. Лукин В.И., Саморуков М.Л., Ковальчук В.Г. Моделирование ротационной сварки трением высокожаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Сварочное производство. 2016. №11. С. 12–18.
22. Саморуков М.Л. Аналитический подход к математическому моделированию температурной составляющей ротационной сварки трением // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2018).
23. Должанский Ю.М., Новик Ф.С., Чемлева Т.А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации свойств сплавов: методич. пособие. М.: ВИАМ, 1974. 132 с.
24. Lukin V.I., Ioda E.N., Skupov A.A., Panteleev M.D., Ovchinnikov V.V., Malov D.V. Effect of the surface roughness of friction stir welded joints on the fatigue characteristics of welded joints in V-1461 and V-1469 aluminium-lithium alloys // Welding International. 2017. Vol. 31:12. P. 974–978. DOI: 10.1080/09507116.2017.1369062.
25. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости. М.: Машиностроение, 1969. 503 с.