

УДК 621.791:669018.44

Б.Д. Аннин¹, В.М. Фомин², Е.В. Карпов¹, А.Г. Маликов², А.М. Оршич²**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ
ВЫСОКОПРОЧНОГО СПЛАВА В-1469**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-9-16

Проведено комплексное экспериментальное исследование лазерной сварки алюминий-литиевого сплава В-1469 с целью получения высокопрочного сварного соединения. Установлено, что пластическое деформирование сварного соединения позволяет увеличить прочность шва на 5–10% по сравнению с прочностью недеформированного шва. Термообработка сварного шва увеличивает его прочность, однако существенно снижает прочность основного сплава вне зоны термического влияния сварочного процесса. Применение термообработки позволяет получить прочность сварного соединения 0,85 от прочности основного сплава в состоянии поставки Т1.

Ключевые слова: лазерная сварка, алюминий-литиевый сплав, прочность, термообработка.

Complex experimental research of laser welding of aluminum-lithium alloy В-1469 in order to obtain heat-resistant welded joint is considered in the work. It is found, that plastic deformation of the welded joint allows increasing weld strength by 5–10% in comparison with non-deformed welded joint. Heat treatment of welded joint increases its strength, however it essentially reduces strength of the main alloy out of thermal influence zone of welding process. Application of heat treatment allows obtaining the strength of welded joint equal to 0,85 from strength of the main alloy as received state T1.

Keywords: laser welding, aluminum-lithium alloy, strength, heat treatment.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук [Siberian branch of Russian academy of sciences Lavrentev Institute of hydrodynamic]; e-mail: igil@hydro.nsc.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук [Siberian branch of Russian academy of sciences Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics]; e-mail: admin@itam.nsc.ru

Введение

Повышение весовой эффективности перспективных изделий авиационно-космической техники в настоящее время возможно благодаря применению нового поколения алюминидовых деформируемых сплавов пониженной плотности, легированных литием. Особый научно-практический интерес представляют сплавы системы Al–Cu–Li, которые обладают наилучшим среди алюминий-литиевых сплавов сочетанием прочности и высокой коррозионной стойкости [1].

Разработаны алюминидовые сплавы системы Al–Cu–Li с пределом прочности при растяжении >500 МПа. Во ФГУП «ВИАМ» создан высокопрочный сплав В-1469 [2, 3], имеющий зарубежные аналоги: сплав 2195, который широко используется для сварных конструкций ракетно-космической техники, а также сплавы 2098 и 2198, примененные в конструкциях самолетов компании Airbus. В современном производстве пассажирских широкофюзеляжных самолетов применяется очень трудоемкая и неэффективная технология заклепочного соединения деталей с использованием миллионов заклепок, что обусловлено высокими характеристиками прочности и выносливости таких соединений, имеющими

первостепенное значение для авиации. Новый инновационный путь развития авиационной техники связан с освоением сварки. Активно ведутся работы по изучению перспектив сварки трением с перемешиванием, аргоно-дуговой сварки, лазерной сварки, сварки электронным пучком, которые в отличие от классической технологии клепки обладают большей производительностью процесса, менее трудоемки и более технологичны [4–11].

В работе [4] показано преимущество применения лазерной сварки взамен клепки для создания фюзеляжа самолетов фирмы Airbus А318 и А380. Применение лазерного излучения в качестве инструмента для сварки авиационных сплавов обладает рядом ценных преимуществ, особенно по сравнению с традиционным дуговым способом создания неразъемных соединений. Высокая концентрация энергии и небольшая величина пятна нагрева позволяют получать швы с объемом сварочной ванны в несколько раз меньше, чем при дуговой сварке. Снижение объема расплава и получение швов с большим отношением глубины проплавления к ширине шва (приблизительно на порядок по сравнению с дуговой сваркой) позволяют уменьшить деформацию деталей в ~10 раз, что, в свою очередь, приводит к значительной эконо-

мии металла за счет уменьшения размеров допусков. Уменьшение ширины шва в 2–5 раз позволяет расширить ассортимент деталей, для которых из-за термовлияния или компактности существуют ограничения на размеры мест, где может быть расположен сварной шов. Высокая производительность достигается за счет скорости сварки, которая в несколько раз превышает скорости сварки при дуговых способах, и экономии времени на правку после сварки. Жесткий термический цикл с высокими скоростями нагрева и охлаждения дает возможность существенно сократить зону термического влияния. Это позволяет предотвратить фазовые и структурные превращения в околошовной зоне, приводящие к разупрочнению, снижению коррозионной стойкости и т. д.

Лазерная сварка также имеет преимущество перед электронно-лучевой сваркой, выполняющейся в вакууме и требующей сложного оборудования при сварке длинных частей фюзеляжа. От сварки трением с перемешиванием лазерная сварка отличается более высокой скоростью процесса и технологичностью при изготовлении сложных конструкций. В работе [5] впервые показана демонстрационная лазерная сварка сплава 2198 (аналога сплава В-1469) для ее дальнейшего использования при создании соединения стрингера с фюзеляжем.

Однако вплоть до настоящего времени все существующие методы создания неразъемных соединений алюминиевых сплавов с помощью технологии сварки (аргоно-дуговая, лазерная и электронно-лучевая) не обеспечивают прочность сварного шва, сравнимую с прочностью основного материала. Оказалось, что после сварки необходима дополнительная обработка шва. Причем вид обработки зависит от типа сплава. Так, в работах [9, 10] исследована лазерная сварка алюминиевого сплава 1424 и показано положительное влияние холодной пластической деформации. Прочность сварного соединения увеличилась с 0,7–0,8 до 0,95 от прочности основного материала.

К настоящему времени уровень прочности сварных соединений высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469, выполненных сваркой трением с перемешиванием (СТП), электронно-лучевой сваркой, автоматической аргоно-дуговой и лазерной сваркой составляет 0,65–0,8 от прочности исходного сплава [6–8] без последующей обработки сварного соединения. Так, при лазерной сварке с применением присадочной проволоки прочность сварного соединения составила 417 МПа, разрушение произошло в зоне термического влияния, при этом прочность исходного сплава составляла 530 МПа. Лазерная сварка без присадочной проволоки позволила получить прочность сварного соединения 372 МПа, разрушение произошло по шву [8].

Сплав В-1469 является деформируемым, термически упрочняемым сплавом, т. е. максималь-

ные прочностные свойства для данного сплава достигаются только после специальной термической обработки [12], которая приводит к выравниванию структурной неоднородности и устранению разупрочнения в зоне термического влияния. Данный сплав применяется в конструкции в состоянии Т1 – закалка+искусственное старение.

В работе [11] исследовалось влияние термической обработки на механические свойства и коррозионную стойкость неразъемных соединений сплава В-1469, полученных сваркой трением с перемешиванием. Показан максимальный уровень характеристик прочности сварного соединения, который достигался при проведении полной термообработки (закалка+искусственное старение) после сварки.

Целью данной работы является комплексное исследование процесса лазерной сварки сплава В-1469 с применением холодной пластической деформации и термической обработки с целью получения высокопрочного сварного соединения.

Методика экспериментов

Лазерная сварка (ЛС) алюминиевого сплава В-1469 толщиной 1,6 мм осуществлялась на автоматизированном лазерном технологическом комплексе «Сибирь-1», включающем непрерывный CO₂-лазер с мощностью до 8 кВт. Лазерное излучение фокусировалось на поверхности сплава с помощью ZnSe-линзы с фокусным расстоянием 254 мм. Для защиты сварного шва использовался инертный газ (гелий). Одной из особенностей сварки алюминий-литиевых сплавов является необходимость устранения оксидной пленки сложного состава, образующейся на поверхности сплава при взаимодействии с окружающей атмосферой. Оксидную пленку во ФГУП «ВИАМ» удаляли с помощью химического фрезерования на толщину 0,15–0,20 мм. Непосредственно перед сваркой кромки образцов зачищали до блеска с помощью металлического шабера. Прочность сварных соединений измеряли при статическом растяжении на электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z100. Поскольку в сварном образце деформация существенно неоднородна по длине, точное измерение относительного удлинения с помощью внешнего тензометра невозможно. Для сравнения деформирования образцов использовалось относительное удлинение рабочей части, определявшееся по перемещению подвижной траверсы. Эта величина далее приводится на графиках в качестве деформации δ .

Макро- и микроструктура сварных швов исследованы на оптическом микроскопе Olympus LEXT OLS3000. Образцы для испытаний на прочность изготавливали согласно ГОСТ 1497–84. Спектральный анализ сварного шва и основного сплава производили на сканирующем электронном микроскопе LEO 1430 VPI, снабженном энергетическим детектором IPX OXFORD. Тер-

мообработку производили в камерной печи Carbolite, оснащенной контроллером температуры.

Экспериментальное исследование свойств сварного соединения при различных технологических режимах сварки

На начальном этапе проводили оптимизацию процесса ЛС по энергетическим параметрам: мощности лазерного излучения, положению фокального пятна лазерного излучения относительно поверхности заготовки и скорости сварки. В результате установлено, что оптимальная мощность излучения находится в диапазоне 2,7–3,5 кВт. Оптимальное расстояние между фокусом и верхней поверхностью свариваемого листа равно 3 мм. Диапазон значений скорости составлял 3–6 м/мин. Среднее значение прочности основного сплава В-1469 составляло $\sigma_{\text{в}}=557$ МПа.

На рис. 1 представлена зависимость прочности сварного соединения $\sigma_{\text{в.св}}$ от скорости сварки V .

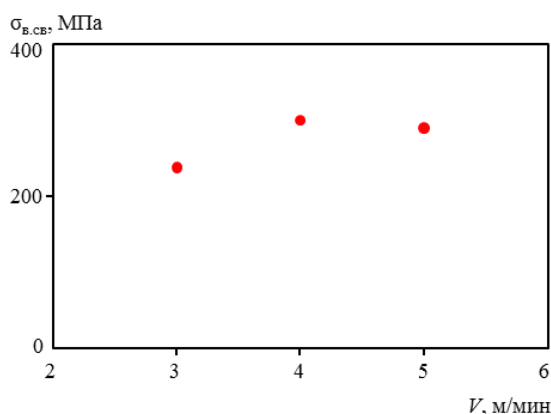


Рис. 1. Зависимость прочности сварного соединения от скорости сварки

В результате проведенных экспериментов установлено, что прочность сварного соединения слабо зависит от скорости сварки. В дальнейшем сварку проводили при скорости 4 м/мин. В пределах разброса экспериментальных данных прочность сварного соединения составляла 0,45–0,55 от прочности основного сплава.

Исследовали изменение химического состава сплава в процессе ЛС. Средние значения массовой доли S основных химических элементов, полученные в результате шести измерений, в сварном соединении близки к значениям для основного сплава. Так, измерения в пределах экспериментального разброса показали следующие значения основных химических элементов, % (по массе): 68,0–70,4 Al; 2,9–2,8 Cu; 0,15–0,13 Mg (сплав-сварное соединение соответственно).

Комплексная обработка сварного соединения и основного сплава В-1469

Цель следующего этапа работы – комплексное

исследование влияния процессов термообработки и пластической деформации на прочностные свойства сварного соединения и основного сплава.

Для данного сплава разработаны и исследованы режимы закалки и искусственного старения, позволяющие получать максимальный уровень прочности. При выборе режимов термообработки использовали данные работы [12]. Так, по результатам механических испытаний при растяжении в зависимости от различных режимов закалки можно сделать вывод, что режим нагрева под закалку в воде при температуре 530°C в течение 30 мин обеспечивает уровень прочности порядка 530 МПа при сохранении высокой пластичности. Режим искусственного старения, обеспечивающий максимальные прочностные свойства сплава при сохранении высокой пластичности, включает выдержку в течение 24 ч при температуре 160°C.

В работе [11] показано положительное влияние термической обработки при создании неразъемных соединений методом сварки трением с перемешиванием. Применение полного цикла термообработки в режиме закалка+искусственное старение повысило прочность сварного соединения со среднего значения 445 МПа до уровня прочности 501 МПа.

В работах [9, 10] исследовано влияние различных видов деформирования сварного соединения на его прочность. Установлено, что пластическое деформирование сварного соединения позволяет увеличить прочность шва на 5–10% по сравнению с прочностью основного сплава, подвергнутого аналогичной обработке. Результаты проведенных экспериментов показали, что для алюминиевого сплава 1424 прочность сварного соединения после деформационной обработки составляет 0,95 от прочности основного сплава.

Образцы лазерных сварных соединений получены при следующем режиме сварки: мощность лазера 3 кВт, скорость сварки 4 м/мин, заглубление фокуса в материал –3 мм. После сварки образцы подвергали термообработке и пластической деформации. В некоторых опытах сваривались образцы, предварительно подвергшиеся отжигу. Исследовалось влияние каждой термической процедуры на изменение прочности. Для сравнения влияния термообработки на прочностные свойства сплава и шва образцы основного сплава без сварного шва также подвергли термообработке. Необходимо отметить, что как при наличии шва, так и при его отсутствии термической обработке подвергали весь образец, а пластической деформации – только область шва и зоны термического влияния.

В табл. 1 представлены методики подготовки и испытания образцов. Для каждой серии изготавливали по три образца.

Использовали следующие режимы термообработки:

– закалка в воде после выдержки при температу-

Таблица 1

Обработка образцов для испытаний на прочность

Условный номер образца	Вид обработки	Образцы без шва	Сваренные образцы
1	Без обработки (исходное состояние)	+	+
2	Закалка	+	+
3	Закалка+искусственное старение	+	+
4	Пластическая деформация шва	–	+
5	Пластическая деформация шва+закалка	–	+
6	Пластическая деформация шва+закалка+искусственное старение	–	+

ре 530°C в течение 30 мин; скорость нагрева до 530°C составила 5°C/мин;

– искусственное старение при 160°C в течение 24 ч; скорость нагрева до 160°C составила 5°C/мин.

На рис. 2 показана диаграмма растяжения для сварного шва и шва подвергнутого пластической деформации по толщине на 8%. Видно, что пластическая деформация сварного шва по толщине на 8% увеличивает прочность сварного соединения с 306 до 322 МПа. Изучение внешнего вида соединения, а также исследование микроструктуры не выявило наличия трещин после пластической деформации сварного шва.

Следующий этап исследований – изучение влияния термообработки на сварное соединение, основной сплав и сварное соединение, подвергнутое пластическому деформированию. На рис. 3 приведены диаграммы растяжения образцов, демонстрирующие влияние термической обработки на сплав В-1469 без сварного шва.

Напомним, что сплав В-1469 упрочняется термической обработкой (закалка+искусственное старение) в процессе изготовления листов. Повторная закалка сплава привела к его разупрочнению (рис. 3, кривая 2), средняя прочность закаленного сплава составила $\sigma_b=385$ МПа, последующее искусственное старение увеличило значение прочности до $\sigma_b=443$ МПа. При закалке предельное относительное удлинение возросло, а при последующем искусственном старении уменьшилось и приблизилось к значениям от исходного сплава.

На рис. 4 приведены диаграммы растяжения образцов, демонстрирующие влияние термической обработки на сплав В-1469 при наличии сварного шва.

На рис. 5 приведены фотографии образцов со сварным швом, разрушенным в процессе испытаний по режимам 1–3 (см. диаграммы на растяжение – рис. 4). Разрушение при испытании на прочность сварного шва без термической обработки происходило по шву (рис. 5, а); закаленного образца, а также закаленного и состаренного образца – вне зоны воздействия лазерного излучения и зоны термического влияния (рис. 5, б, в).

Таким образом, данные, приведенные на рис. 3–5, позволяют сделать вывод, что после термообработки прочность сварного шва оказывается выше прочности основного сплава, подвергнутого аналогичной термообработке. Диаграммы растяжения образцов со сварным соединением, подвергнутых различным видам термообработки, определяются динамикой изменения прочности исходного сплава вне зоны влияния сварного процесса. Средние значения прочности для закаленного сварного образца и закаленного+искусственно состаренного сварного образца составили соответственно 384 и 440 МПа, т. е. практически равны значениям прочности для образцов из основного сплава, подвергнутых аналогичной обработке, – соответственно 385 и 443 МПа.

Диаграммы растяжения образцов со сварным швом после пластической деформации и термообработки (режимы 4, 5, 6 – см. табл. 1) аналогичны представленным на рис. 4. Разрушение образца (рис. 6) также происходит вне зоны шва и определяется свойствами термически обработанного сплава.

Таким образом, проведенные исследования показали наличие противоречивой ситуации. С одной стороны, лазерный шов обладает низкой прочностью (рис. 4, режим 1) и нуждается в термической обработке для увеличения механических характеристик (рис. 4, режим 3). С другой – термическая обработка шва приводит к снижению прочности сплава вне области сварки. Провести термическую обработку шва, не затрагивая окружающий сплав за его пределами, невозможно, поскольку всегда будет пограничная зона термического влияния. С целью поиска путей разрешения этого противоречия исследовали возможность повышения прочностных характеристик основного сплава после термической обработки введением дополнительной операции – предварительного смягчающего отжига. Все образцы предварительно подвергали отжигу при температуре 400°C в течение 60 мин с последующим охлаждением со скоростью не более 30°C/ч до температуры 260°C, затем на воздухе. Далее проводили термическую обработку по ранее описанным режимам. После каждого этапа термообработки измеряли прочностные характеристики.

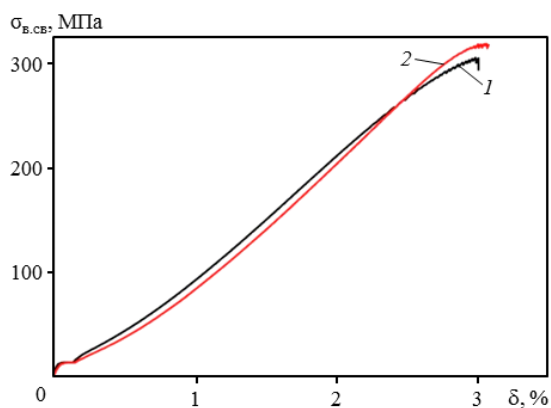


Рис. 2. Зависимость напряжения от деформации сварных соединений в исходном состоянии (1) и после пластической деформации (2), обработанных соответственно по режимам 1 и 4 (см. табл. 1)

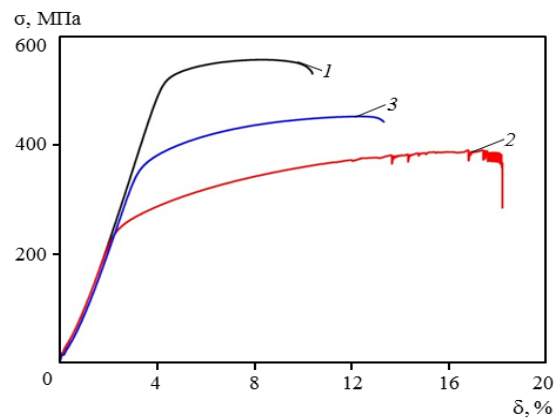
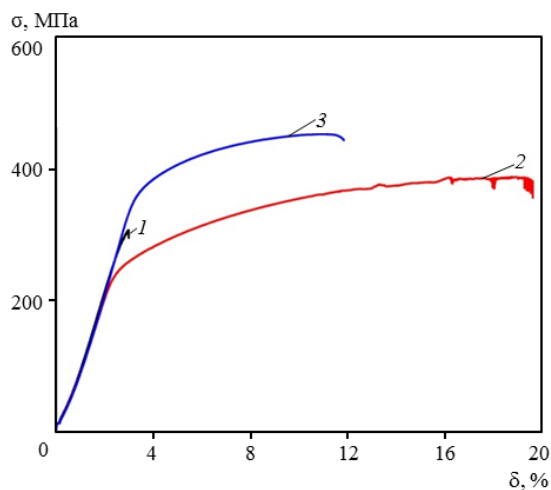


Рис. 3. Зависимость напряжения от деформации образцов из основного сплава В-1469:

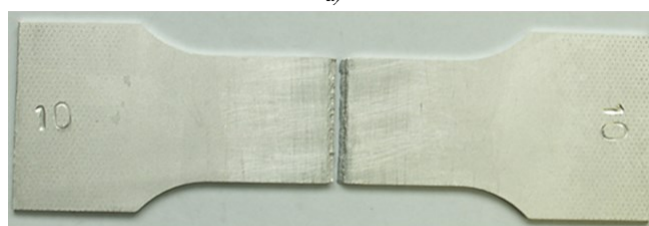
1 – без термообработки (режим 1); 2, 3 – после термообработки по режимам 2 и 3 (см. табл. 1)

Рис. 4. Зависимость напряжения от деформации образцов со сварным швом:

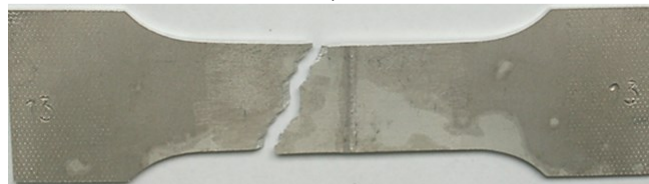
1 – без термообработки; 2 – после закалки; 3 – после закалки и искусственного старения



а)



б)



в)



Рис. 5. Вид разрушенных в процессе испытаний на растяжение образцов со сварным швом:

а – без термической обработки (режим 1); б, в – с последующей термической обработкой соответственно по режимам 2 и 3 (см. табл. 1)



Рис. 6. Вид образца, разрушенного в процессе испытаний на растяжение (режим 5 – см. табл. 1)

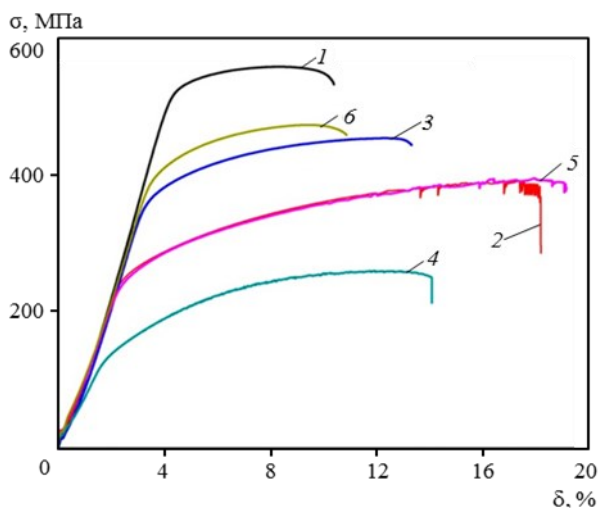


Рис. 7. Зависимость напряжения от деформации образцов из основного сплава:

1 – без термообработки; 2 – после закалки; 3 – после закалки и искусственного старения (режимы 1–3 – см. табл. 1); 4 – после отжига; 5 – после отжига и закалки; 6 – после отжига, закалки и искусственного старения (режимы 1–3 – см. табл. 2)

Таблица 2

Прочность и разрушение образцов без шва и со швом при различных видах обработки

Условный номер образца	Вид обработки для образцов без сварного шва	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	Вид обработки для образцов со сварным швом	$\sigma_{\text{в.св}}$, МПа	Зона разрушения
1	Отжиг	259	Лазерная сварка+отжиг	257	Сплав
2	Отжиг+закалка	394	Лазерная сварка+отжиг+закалка	403	-«-
3	Отжиг+закалка+искусственное старение	472	Лазерная сварка+отжиг+закалка+искусственное старение	465	Шов
4	-	-	Отжиг+лазерная сварка	258	Сплав
5	-	-	Отжиг+лазерная сварка+ закалка	406	-«-
6	-	-	Отжиг+лазерная сварка+закалка+искусственное старение	475	Шов

На рис. 7 показаны диаграммы растяжения образцов из основного сплава В-1469 для различных видов термообработки. Проведено сравнение данных при наличии и отсутствии отжига.

В табл. 2 представлены данные по подготовке и испытанию образцов с дополнительной процедурой отжига, приведены средние значения прочности ($\sigma_{\text{в}}$) и определены зоны разрушения для образцов со сварным соединением. Из данных рис. 7 и табл. 2 видно, что прочность сплава после отжига резко уменьшается – до $\sigma_{\text{в}}=259$ МПа (рис. 7, кривая 4). Однако закалка (рис. 7, кривая 5), а также закалка и искусственное старение (рис. 7, кривая 6) позволяют существенно увеличить $\sigma_{\text{в}}$ до среднего значения 475 МПа.

После термообработки (закалка+искусственное старение) среднее значение прочности сварного соединения до отжига и после отжига составляет 475 МПа и определяется динамикой изменения прочности сплава, подвергнутого аналогичной обработке.

В табл. 3 представлены обобщенные данные, полученные в результате проведенных экспериментов, по прочности сварного соединения, а также значения предельной пластической деформации δ' в качестве показателя, характеризующего пластичность образца со швом. Введен также коэффициент ослабления сварного соединения для различных состояний листов, который определяется по формуле $k=\sigma_{\text{в.св}}/\sigma_{\text{в}}$, где $\sigma_{\text{в.св}}$ – времен-

Таблица 3

Обобщенные данные прочности сварных соединений

Вид обработки сплава	$\sigma_{в,св}$	$\delta',\%$	k	Зона разрушения
Сварка	306	0,7	0,55	Шов
Сварка+пластическая деформация	322	0,4	0,56	-«-
Сварка+закалка	384	17,8	0,69	Сплав
Сварка+закалка+искусственное старение	440	11,7	0,79	-«-
Сварка+отжиг	257	9,8	0,46	-«-
Сварка+отжиг+закалка	403	16,5	0,72	-«-
Сварка+отжиг+закалка+искусственное старение	465	3,9	0,83	Шов
Отжиг+сварка	258	12,3	0,46	Сплав
Отжиг+сварка+закалка	406	13,2	0,73	-«-
Отжиг+сварка+закалка+искусственное старение	475	2,7	0,85	Шов

ное сопротивление разрыву сварного соединения; $\sigma_{в}$ – временное сопротивление разрыву основного сплава.

Из данных, приведенных в табл. 3, видна существенная разница между предельными пластическими деформациями образцов, в которых разрушение произошло по шву, и образцов, разрушившихся по основному материалу. Разница объясняется тем, что перед разрушением шва происходит локализация пластических деформаций в сварной области, что приводит к уменьшению абсолютных значений прироста длины, отношение которой к длине рабочей части образца используется в качестве меры деформации.

При полной термообработке (закалка+искусственное старение) прочность сварного соединения выше прочности сплава, подвергнутого аналогичной обработке. Процедура предварительного отжига и полная термообработка позволяют получить прочность сварного соединения 0,85 от прочности основного материала в состоянии поставки Т1, что равняется прочности сплава, подвергнутого аналогичной обработке. При этом согласно данным, приведенным на рис. 2, а также результатам исследований в работах [9, 10], применение пластической деформации к термически обработанному сварному соединению позволяет увеличить прочность на 8% и достичь значения 512 МПа, что составляет 0,92 от прочности исходного сплава.

Выводы

В работе проведены комплексные экспериментальные исследования лазерной сварки алюминий-литиевого сплава В-1469. Показано, что изменение скорости сварки в диапазоне 3–6 м/мин слабо влияет на прочность сварного соединения. В результате спектрального анализа сварного соединения и основного сплава установлено, что массовая доля компонентов сплава при сварке существенно не меняется.

Установлено также, что пластическое деформирование сварного соединения позволяет увеличить прочность шва на 5–10% по сравнению с прочностью недеформированного шва. Термообработка сварного шва в виде закалки и искусственного старения позволяет кардинально увеличить прочность шва, однако существенно снижает прочность основного сплава вне зоны термического влияния сварочного процесса. Применение термообработки (отжиг, закалка и искусственное старение) позволяет получить прочность сварного соединения 0,85 от прочности основного сплава в состоянии поставки Т1.

Таким образом, проблема отработки технологии лазерной сварки сплава В-1469 на данном этапе сведена к проблеме разработки технологии термической обработки шва без разупрочнения окружающего сплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клочкова 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.
2. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминий-литиевые сплавы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
3. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2237098 Рос. Федерация; опубл. 24.07.03.
4. Zink W. Welding Fuselage shells // *Industrial Laser Solutions*. 2001. V. 16. Issue 8. P. 7–10.

5. Dittrich D., Standfuss J., Liebscher J., Brenner B., Beyer E. Laser Beam Welding of Hard to Weld Al Alloys for a Regional Aircraft Fuselage Design – First Results // *Physics Proceeding*. 2011. V. 12. P. 113–122.
6. Petrovic M., Veljic D., Rakin M., Radovic N., Sedmak A., Bajic N. Friction-stir welding of highstrength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage // *Materials in technology*. 2012. V. 46. №3. P. 215–221.
7. Овчинников В.В., Грушко О.Е., Алексеев В.В., Магнитов В.С., Егоров Р.В. Структура и свойства сварных соединений алюминиевого сплава В-1469, полученных электронно-лучевой сваркой // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. №5. С. 7–11.
8. Овчинников В.В. Технология сварки алюминиевых сплавов: учеб. пособие. М.: МГИУ, 2005. 68 с.
9. Аннин Б.Д., Фомин В.М., Антипов В.В., Иода Е.Н., Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Черепанов А.Н. Исследование технологии лазерной сварки алюминиевого сплава 1424 // *Доклады академии наук*. 2015. Т. 465. №4. С. 419–424.
10. Annin B.D., Fomin V.M., Karpov E.V., Malikov A.G., Orishich A.M., Cherepanov A.N. Development of a technology for laser welding of the 1424 aluminum alloy with a high strength of the welded joint // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015. V. 56. №6. P. 945–950.
11. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6.
12. Клочкова Ю.Ю., Клочков Г.Г., Романенко В.А., Попов В.И. Структура и свойства листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-3-8.