

УДК 621.791.725

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1424 С ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ СОЕДИНЕНИЯ

Б. Д. Аннин, В. М. Фомин*, Е. В. Карпов, А. Г. Маликов*,
А. М. Оришич*, А. Н. Черепанов*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

* Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

E-mails: annin@hydro.nsc.ru, fomin@itam.nsc.ru, evkarpov@mail.ru, smalik@ngs.ru,
laser@itam.nsc.ru, ancher@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования свойств соединения, полученного при различных режимах лазерной сварки сплава 1424 (Al–Mg–Li). Определены прочность и структура сварного соединения. Исследовано влияние различных видов деформирования сварного соединения на его прочность. Показано, что при пластическом деформировании прочность сварного соединения увеличивается.

Ключевые слова: лазерная сварка, алюминиевые сплавы, прочность, структура сварного соединения, ударная и пластическая деформация.

DOI: 10.15372/PMTF20150602

Введение. Актуальными проблемами, возникающими в процессе производства авиационной техники, являются уменьшение массы и увеличение надежности деталей. В современном производстве пассажирских широкофюзеляжных самолетов используется технология заклепочного соединения деталей. Данная технология является трудоемкой, а процесс сопровождается значительным шумом и вибрацией. В настоящее время единственным преимуществом использования заклепок являются высокие прочностные и усталостные характеристики соединений, имеющие большое значение в авиации. Впервые клепаные конструкции были заменены конструкциями из алюминиево-литиевого сплава 1420 при создании самолета МИГ-29М. Для изготовления элементов конструкции фюзеляжа (кабины пилота, топливных баков) применялся сплав 1420 (Al–Mg–Li–Zr). Это позволило уменьшить массу фюзеляжа по сравнению с клепаной конструкцией из сплава Д16чТ (плотность сплава 1420 ($\rho = 2,47 \text{ г/см}^3$) на 10 % меньше) и устранить нахлестки, герметики, клепаные и болтовые соединения.

В настоящее время все существующие методы создания неразъемных соединений металлов с помощью сварки плавлением (аргонодуговая, лазерная и электронно-лучевая) не обеспечивают прочность сварного шва, сравнимую с прочностью основного материала. Во Всероссийском институте авиационных материалов разработан современный среднепрочный коррозионно-стойкий свариваемый алюминиевый сплав 1424, имеющий меньшую плотность (по сравнению со сплавом 1420) [1] и являющийся одним из наиболее перспективных сплавов для создания сварного фюзеляжа аэробусов. Сплав 1424 ($\rho = 2,47 \text{ г/см}^3$)

представляет собой модификацию сплава 1420, улучшенного за счет дополнительного легирования цинком и скандием и уменьшения концентрации лития и магния. Сплав 1424 имеет более высокие характеристики прочности, вязкости на разрушение, свариваемости и обладает сверхпластичностью. Листы и пресованные профили толщиной не более 10 мм из сплава 1424 рекомендованы к применению в конструкции в состоянии ТГ1 (закалка на воздухе и искусственное старение) [2]. В настоящее время прочность сварного соединения, выполненного сваркой плавлением, составляет $0,75 \div 0,80$ прочности основного материала [3]. В данной работе изучается прочность сварного соединения алюминиевого сплава 1424.

1. Постановка экспериментов. Лазерная сварка (ЛС) алюминиевого сплава 1424 осуществлялась на созданном в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН автоматизированном лазерном технологическом комплексе "Сибирь-1", включающем непрерывный CO_2 -лазер с мощностью до 8 кВт [4] и параметром качества пучка $K = 0,7$ и компьютерную систему управления лазером. Лазерное излучение фокусировалось на поверхности металла с помощью ZnSe-линзы с фокусным расстоянием $254 \div 304$ мм. Для защиты сварного шва использовалось сопло, из которого подавался инертный газ (гелий). Заготовка из алюминиевого сплава толщиной 1,6 мм оставалась неподвижной, лазерное излучение перемещалось.

Одной из особенностей сварки алюминиево-литиевых сплавов является необходимость устранения оксидной пленки сложного состава, образующейся на поверхности сплава при взаимодействии с окружающей атмосферой. Оксидная пленка устранялась с помощью химического фрезерования на толщину $0,15 \div 0,20$ мм. Непосредственно перед сваркой кромки образцов зачищались до блеска с помощью металлического шабера.

2. Экспериментальное исследование свойств сварного соединения при различных технологических режимах сварки. На начальном этапе происходила оптимизация 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 $2,7 \div 3,5$ кВт. Оптимальное расстояние между фокусом и верхней поверхностью свариваемого листа равно 3 мм. Диапазон значений скорости составлял $3 \div 6$ м/мин.

На рис. 1 представлена зависимость прочности сварного соединения от скорости V . Среднее значение прочности основного сплава составляет $\sigma_{\text{в0}} = 460$ МПа. Прочность сварного соединения испытывалась на универсальной машине для испытания материалов Zwick/Roell Z100.

В результате проведенных экспериментов установлено, что прочность сварного соединения не зависит от скорости сварки и остается постоянной. В пределах разброса экспериментальных данных прочность сварного соединения составляет $0,7 \div 0,8$ прочности сплава.

На следующем этапе исследовалось изменение химического состава сплава в процессе ЛС. Сравнительный спектральный анализ сварного соединения и основного металла проводился на сканирующем электронном микроскопе LEO 1430 VPI, снабженном энергетическим детектором IPX OXFORD. В табл. 1 приведены средние значения массовой доли C компонентов сплава, полученные в результате шести измерений. Установлено, что химический состав сварного соединения близок к составу основного металла. С учетом результатов анализа химического состава проведено исследование сварного шва и основного металла. Анализ сварного соединения и основного металла выполнен на сканирующем электронном микроскопе LEO 1430 VPI при различных увеличениях.

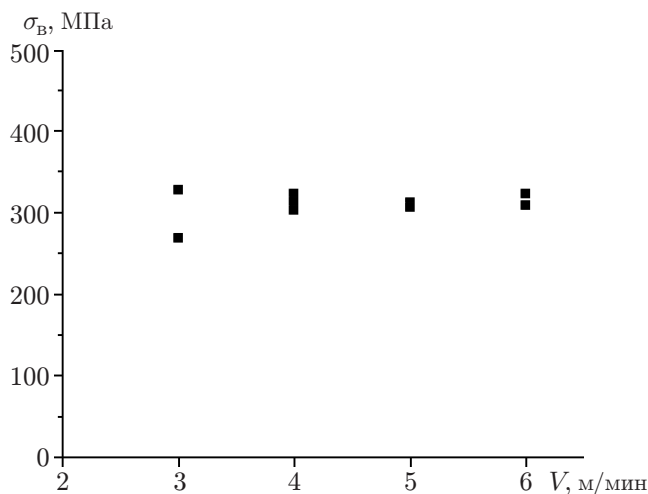


Рис. 1. Зависимость прочности сварного соединения от скорости сварки при $\sigma_{в0} = 460$ МПа

Таблица 1

Спектральный анализ сварного соединения и основного металла

Материал	C	O	Mg	Al	Zn
Сварное соединение	4,52	0,62	4,20	89,91	0,75
Основной металл	4,30	0,38	4,49	90,06	0,77

На рис. 2 показана микроструктура сплава 1424. Видно, что в сварном соединении, в отличие от основного металла, имеются поры размером $0,5 \div 1,0$ мкм.

В последнее время возрос интерес к методу наноструктурирования металлических конструкционных материалов с использованием различных способов создания интенсивной пластической деформации [5–7]. В результате наноструктурирования образуется мелкодисперсная структура металла и улучшаются его механические свойства. На следующем этапе исследовались процессы ЛС и различные способы деформирования сварного соединения. Сварной шов подвергался интенсивной холодной ударной пластической деформации и пластической деформации на прессе. Также образец подвергался шлифовке без деформации, что способствовало уменьшению концентрации остаточных напряжений в сварном шве [8] и устранению поверхностных дефектов, наличие которых приводит к развитию в поверхностном слое замкнутых вихрей локализованной пластической деформации и усталостному разрушению.

Значения прочности сварного соединения при различных способах его обработки приведены в табл. 2 ($\sigma_{в}^*$ — прочность сварного соединения; $k = \sigma_{в}^*/\sigma_{в0}$ — отношение прочности сварного шва к прочности основного металла). Пластическая деформация осуществлялась с помощью пресса наковальни Бриджмена.

При различных способах пластического деформирования происходит увеличение прочности сварного соединения.

Также было проведено исследование зависимости прочности сварного соединения и основного металла от деформации $\varepsilon = (h_0 - h)/h_0 \cdot 100$ % (h_0, h — толщина образца до и после деформации).

На рис. 3 представлены зависимости прочности основного металла, а также прочности шва, подвергаемого пластической деформации путем прессования и интенсивной ударной деформации, от деформации ε . Прочность сварного соединения в отсутствие деформирования приближенно равна 360 МПа.

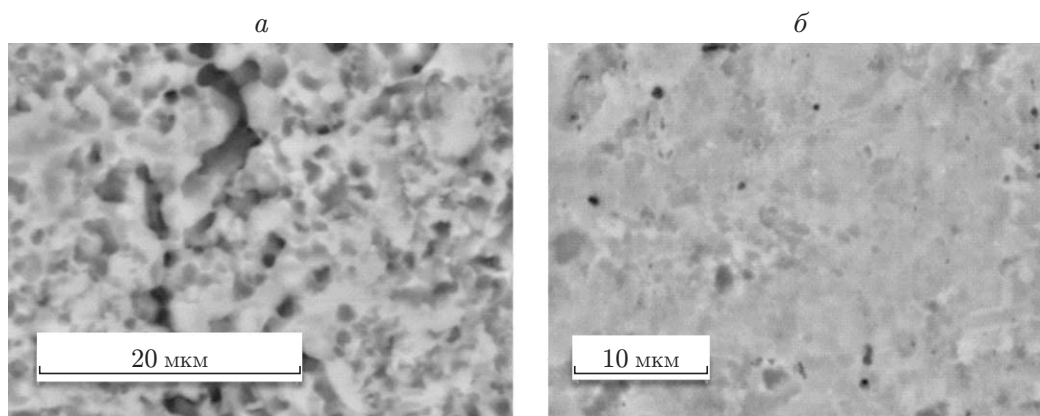


Рис. 2. Микроструктура сплава 1424:
a — сварное соединение, *б* — основной металл

Таблица 2
 Механические характеристики сварных соединений

Способ обработки после ЛС	σ_B^* , МПа	k
Без обработки	359,0	0,78
Пластическое прессование	373,0	0,81
Ударная пластическая деформация	377,0	0,82
Шлифование	381,5	0,83

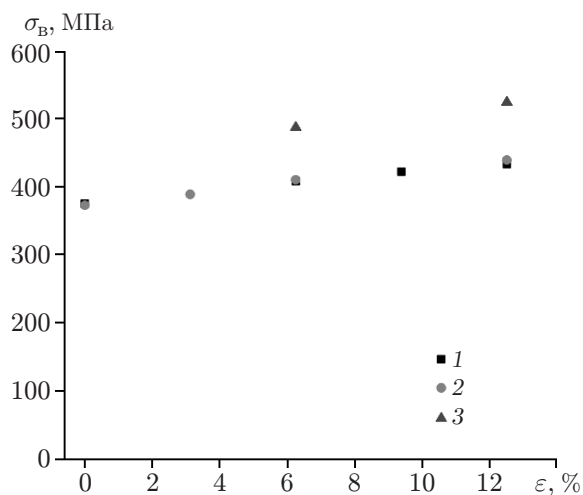


Рис. 3. Зависимость прочности сварного соединения и основного металла от деформации:

1 — прочность сварного шва после ударного деформирования, 2 — прочность сварного шва после пластического прессования, 3 — прочность основного металла после пластического прессования

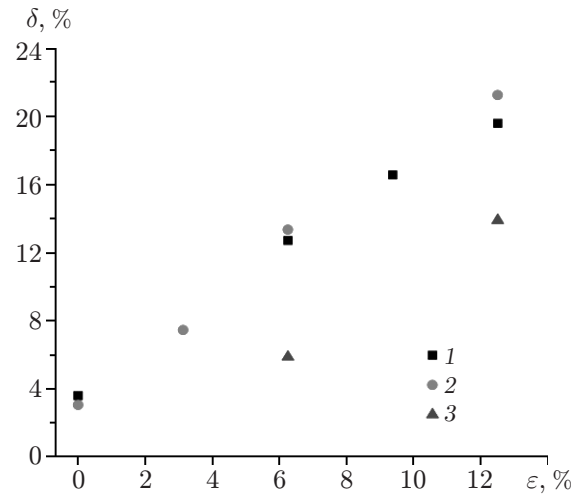


Рис. 4. Зависимость упрочнения сварного соединения и основного металла, подвергнутого ударной пластической деформации, от деформации:

1 — упрочнение сварного шва после ударного деформирования, 2 — упрочнение сварного шва после пластического прессования, 3 — упрочнение основного металла после пластического прессования

Следует отметить, что деформационное упрочнение сплавов может осуществляться методом холодной прокатки. Зависимость предела текучести от деформации имеет вид $\sigma_{0,2} = A\varepsilon^n$, где A , n — константы. Для алюминиевых сплавов значение n находится в диапазоне $1/6 \div 1/3$ [7].

На рис. 3 видно, что основной металл также подвергается упрочнению в результате пластической деформации.

На рис. 4 показано изменение прочности основного металла и сварного соединения в результате ударной (динамической) пластической деформации. Изменение среднего значения прочности сварного соединения, подвергнутого пластической деформации различными способами, определялось по формуле

$$\delta_{1,2} = \frac{\sigma_{в1,2} - \sigma_{в}^*}{\sigma_{в}^*} \cdot 100 \%$$

($\sigma_{в}^* = 360$ МПа — прочность сварного соединения; $\sigma_{в1,2}$ — прочности сварного соединения, подвергаемого холодной ударной пластической деформации ($\sigma_{в1}$) и пластической деформации на прессе ($\sigma_{в2}$)). Упрочнение основного металла, подвергаемого ударной пластической деформации, определялось следующим образом:

$$\delta_3 = \frac{\sigma_{в3} - \sigma_{в0}}{\sigma_{в0}} \cdot 100 \%$$

($\sigma_{в0} = 460$ МПа — исходная прочность основного металла; $\sigma_{в3}$ — прочность основного металла, подвергнутого холодной ударной пластической деформации).

Из рис. 4 следует, что упрочнение сварного соединения $\delta_{1,2}$, подвергнутого пластической деформации, больше упрочнения основного металла δ_3 , подвергнутого ударной пластической деформации. Прочность сварного шва увеличивается на 5–10 %. Характер разрушения сварного соединения при различных деформациях и шлифовании сварного шва различается (рис. 5). На рис. 5 приведены фотографии, полученные с помощью микроскопа Olympus LEXT OLS3000.

На рис. 6 показана макроструктура разрушившихся сварных образцов.

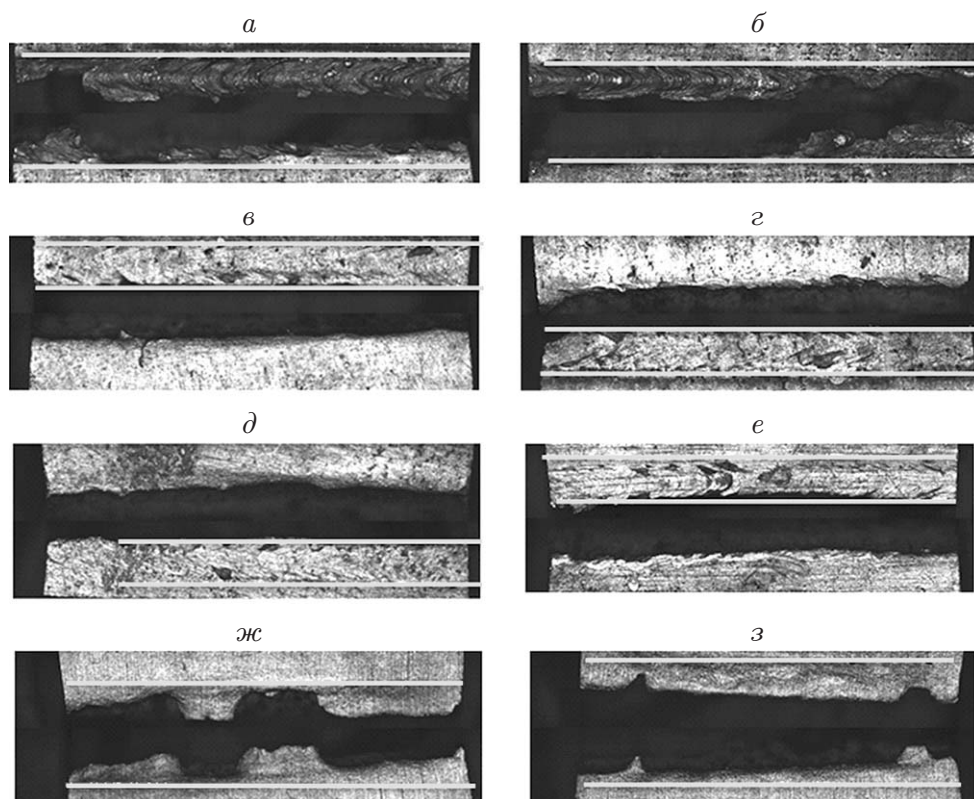


Рис. 5. Характер разрушения сварного соединения при $\varepsilon = 6\%$ ($\times 5$):
а, в, д, ж — вид сверху, *б, г, е, з* — вид снизу; *а, б* — без предварительной обработки шва, *в, г* — после ударной пластической деформации, *д, е* — после пластического деформирования прессованием, *ж, з* — после шлифования поверхности

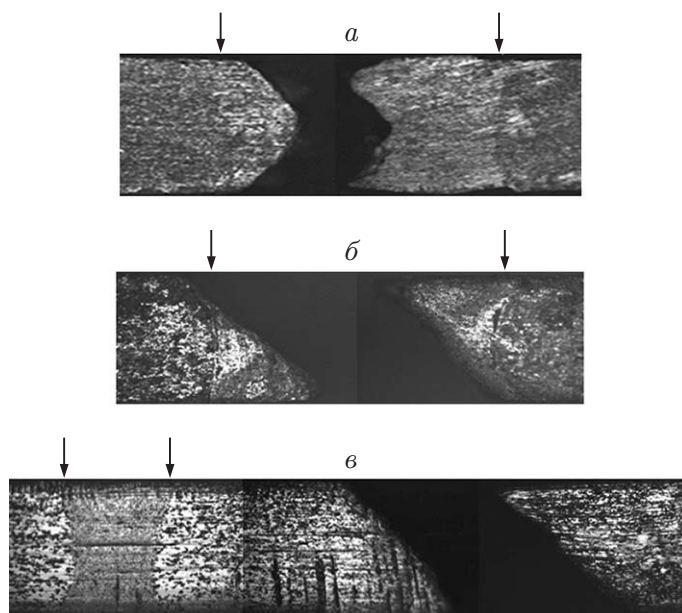


Рис. 6. Макроструктура сварных соединений образцов ($\times 5$):
а — без предварительной обработки, *б, в* — после пластического деформирования (*б* — $\varepsilon = 6\%$, *в* — $\varepsilon = 13\%$); стрелки — границы сварного шва (вид сбоку) после травления в реактиве Келлера

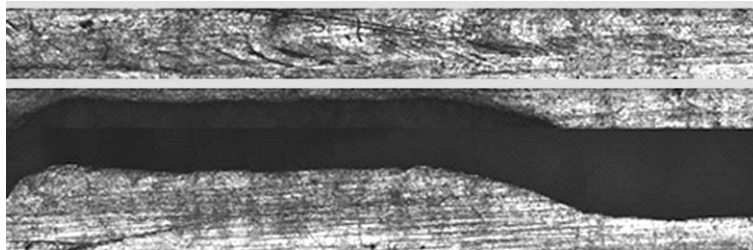


Рис. 7. Характер разрушения сварного соединения при пластической деформации (вид сверху)

Следует отметить, что при $\varepsilon = 13\%$ в случае пластической деформации разрушение происходит не по сварному соединению, а по основному металлу (см. рис. 6, в).

Согласно рис. 5–7 с увеличением деформации пластины происходит упрочнение сварного соединения, в зоне термического влияния сварной шов разрушается, а при дальнейшем увеличении пластической деформации он упрочняется (рис. 7). При $\varepsilon = 6 \div 13\%$ прочность сварного соединения составляет $0,85 \div 0,95$ прочности основного металла.

3. Выводы. В работе проведены экспериментальные исследования лазерной сварки алюминиево-литиевого сплава 1424. Показано, что изменение скорости сварки в диапазоне $3 \div 6$ м/мин не влияет на прочность сварного соединения. В результате спектрального анализа сварного соединения и основного металла установлено, что массовая доля компонентов сплава существенно не меняется. Из результатов анализа структуры сварного соединения и основного металла следует, что в сварном соединении имеется большое количество мелких пор, средний размер которых составляет $0,5 \div 1,0$ мкм. Установлено, что пластическое деформирование сварного соединения позволяет увеличить прочность шва на 5–10 % по сравнению с прочностью основного металла, подвергнутого аналогичной обработке. Результаты проведенных экспериментов показали, что для алюминиевого сплава 1424 прочность сварного соединения составляет $0,85 \div 0,95$ прочности основного металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2126456 РФ, МКИ С 22 С 21/06, С 22 F 1/047. Сплав на основе алюминия и способ его термической обработки / И. Н. Фридляндер, Н. И. Колобнев, Л. Б. Хохлатова, В. Г. Давыдов, В. И. Елагин, В. В. Захаров, А. Г. Братухин, Э. Лехельт, П. Винклер, Т. Пфанненмюллер. Опубл. 20.02.99, Бюл. № 5.
2. Фридляндер И. Н., Хохлатова Л. Б., Колобнев Н. И. и др. Развитие термически стабильного алюминиево-литиевого сплава 1424 для применения в сварном фюзеляже // Металловедение и терм. обраб. металлов. 2002. № 1. С. 3–8.
3. Шиганов И. Н., Шахов С. В., Холопов А. А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 5. С. 34–50. (Спецвыпуск.)
4. Афонин Ю. В., Голышев А. П., Иванченко А. И. и др. Генерация излучения с высоким качеством пучка в непрерывном СО₂-лазере мощностью 8 кВт // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 4. С. 307–309.
5. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Физическая мезомеханика измельчения кристаллической структуры при интенсивной пластической деформации // Физ. мезомеханика. 2008. Т. 11, № 5. С. 5–16.

6. **Рудской А. И.** Наноструктурированные металлические материалы. СПб.: Наука. С.-Петербург. отд-ние, 2011.
7. **Эшби М.** Конструкционные материалы / М. Эшби, Д. Джонс. М.: Издат. дом “Интеллект”, 2010.
8. **Панин В. Е., Сапожников С. В., Каблов Е. Н. и др.** Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 // Физ. мезомеханика. 2006. Т. 9, № 2. С. 85–96.

Поступила в редакцию 22/XII 2014 г.
