

ШТАМПОВКИ ИЗ СВАРИВАЕМОГО СВЕРХЛЕГКОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1420

И.Н. Фридляндер, О.Е. Грушко, В.В. Овчинников, Б.С. Денисов



ФРИДЛЯНДЕР
Иосиф Наумович

Академик, начальник лаборатории ВИАМа – Всероссийского института авиационных материалов, лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, премии Совета Министров СССР. Разработанные под его руководством высокопрочные, жаропрочные и криогенные алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом всех советских и российских самолетов, вертолетов, жидкостных и твердотопливных ракет, ядерных сверхскоростных центрифуг для обогащения урана-235. За работы по созданию и применению в авиастроении алюминиево-литиевого сплава 1420 (в составе коллектива специалистов) И.Н. Фридляндер удостоен Государственной премии Российской Федерации за 1998 год.



ОВЧИННИКОВ
Виктор Васильевич

Профессор, доктор технических наук, академик Международной академии информатизации. Ведущий специалист по сварке ФГУП «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Основное научное направление деятельности – разработка методов и технологических средств получения качественных сварных соединений при изготовлении ответственных конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов. Автор более 220 научных работ, в том числе авторских свидетельств и патентов на изобретения.



ГРУШКО
Ольга Евгеньевна

Доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГУП «ВИАМ». Специалист в области металлургии и металловедения алюминиевых деформируемых сплавов. Автор более 90 научных трудов и 20 изобретений.



ДЕНИСОВ
Борис Семенович

Кандидат технических наук, главный технолог ОКБ им. А.И. Микояна, лауреат Государственной премии СССР. Специалист в области технологии сборки летательных аппаратов и отработки конструкций на технологичность. Автор более 60 научных трудов и 22 изобретений.

Введение

Снижение веса авиационной техники и улучшение ее летно-технических характеристик возможно только за счет разработки и при-

менения новых материалов, технологий и конструкторских решений. В связи с этим представляет интерес создание сварных конструкций, особенно для герметичных отсеков, которые позволят решить эту задачу. Разработанная группы алюминиевых коррозионно-стойких свариваемых сплавов на базе системы Al-Li-Mg, в том числе с введением элементов Sc, Zr и некоторых микродобавок [1] сделало возможным решение проблемы создания герметичных сварных отсеков планера самолета, в том числе топливных баков. В сравнении с обычной конструкцией герметичных отсеков, собранных из полуфабрикатов серийного сплава Д16 на механической клепке с применением герметиков, сварные конструкции с использованием сплава 1420 обеспечили снижение массы до 24% [2].

Основным полуфабрикатом, из которого изготавливаются силовые шпангоуты поперечного набора, являются кованные штамповки, с которыми конструктивно сопряжены прессованные панели, профили, листы, что определило выбор ковано-штампованных полуфабрикатов в качестве объекта исследований. Из сплава 1420 было произведено более 80 наименований штамповок. Для сварных соединений проведены комплексные исследования механических свойств и ресурсных характеристик в сравнении с основным материалом.

Методики исследования

Для изготовления сварных образцов были отобраны заготовки от поковок и штамповок. Оба полуфабриката были получены в условиях серийного производства. Для сварки электронным лучом отбирались заготовки от поковок толщиной 40 мм и штамповок массой 80 кг. Химический состав и механические свойства материала заготовок представлены в табл. 1, 2.

Все образцы испытывались в искусственно-совершенном состоянии ТВ1 (нагрев под закалку при температуре 450 °С, выдержка 30 мин, закалка водо-воздушной смесью со скоростью охлаждения 1 °С/с, старение 120 °С, 12 ч) материала [3].

Подготовка образцов под сварку включала обезжиривание, химическое фрезерование и механическую зачистку кромок, проводимую непосредственно перед сваркой.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) проводилась при ускоряющем напряжении 60 кВ, токе $I_{св} = 260$ мА и скорости сварки 15 м/ч. Сварные швы выполнялись за один проход перпендикулярно продольному направлению волокна. Сварные соединения, полученные методом ЭЛС, испытывали без дополнительной термической обработки.

Сварные соединения контролировались визуально и рентгеновским просвечиванием на наличие дефектов.

Таблица 1

Химический состав материала, использованного для сварки

Полуфабрикат	Mg	Li	Zr	Sc	Fe	Si	Na	Al
Поковка	5,0	1,95	0,11	–	0,07	0,03	0,0006	Основа
Штамповка	5,16	1,8	0,064	0,14	0,07	0,03	0,0008	Основа

Таблица 2

Механические свойства материала, использованного для сварки

Полуфабрикат	Механические свойства								
	Д			П			В		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Поковка	453	283	10,9	463	300	9,9	433	254	7,9
Штамповка	470	296	16,3	478	300	16,7	432	265	10,0

Примечание. В таблице использованы обозначения: Д – долевое, П – поперечное, В – высотное направления волокон в материале; σ_B – предел прочности; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; δ – относительное удлинение при разрыве.

Для основного материала и сварных соединений определялись механические свойства при растяжении, характеристики малоциклового усталости при осевой нагрузке, критический коэффициент интенсивности напряжений (или вязкость разрушения) в условиях плоской деформации (K_{IC}), скорость роста трещины усталости (СРТУ), критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плосконапряженного состояния (K_{IC}^Y). Кроме того, для сварных соединений определялись угол загиба и ударная вязкость. Испытания осуществлялись по стандартным методикам на образцах, представленных на рис. 1–3.

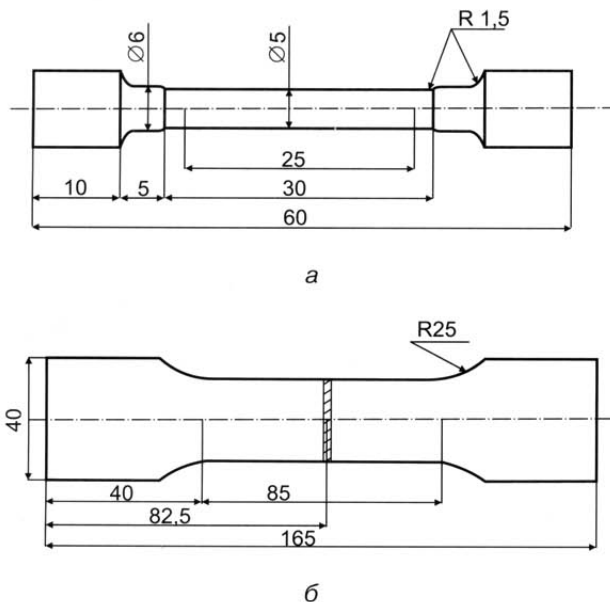


Рис. 1. Образцы для определения механических свойств при растяжении:
а – поковки и штамповки; б – сварного соединения

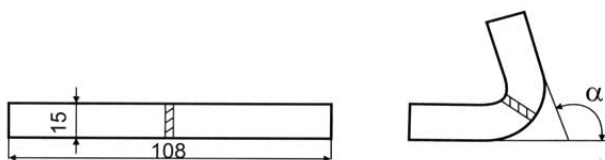


Рис. 2. Образец для определения угла загиба сварных соединений

При испытании образцов на растяжение шов располагали в центре образца под прямым углом к его продольной оси, при этом соблюдалась симметричность образца, как в продольном,

так и в поперечном направлениях (рис. 1, б). Испытания различных участков сварного соединения на ударную вязкость проводили на образцах, имеющих надрез по зоне сплавления и металлу шва. При испытании на загиб с поперечным расположением шва определяли способность сварного соединения принимать заданный по размеру и форме изгиб (рис. 2).

Эта способность характеризуется углом загиба α при образовании первой трещины в растянутой зоне образца. Для определения характеристик усталости основного материала использовали плоские образцы в виде пластин размером 36x200 мм толщиной 5 мм. Образцы имели концентратор напряжения в виде центрального круглого отверстия диаметром 6 мм (рис. 3, а). Для определения характеристик усталости сварного соединения использовался образец той же формы и размера, но при этом роль концентратора напряжений играл сварной шов, располагающийся на образце таким же образом, как на образце для испытания сварного соединения на растяжение (рис. 3, б).

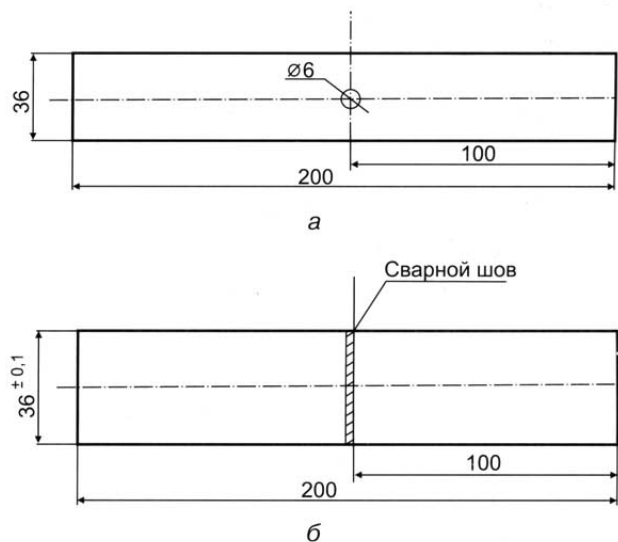


Рис. 3. Образцы для определения характеристик малоциклового усталости:
а – основного материала; б – сварного соединения

Испытания проводили на машинах типа PSA-10 фирмы «Шенк» с электрогидравлическим следящим приводом при осевом растяжении по отнулевому циклу синусоидальной фор-

мы ($R_\sigma = 0$) с частотой нагружения, равной 3 Гц. Все образцы испытывали при одном уровне максимального напряжения в нетто-сечении образца, равном 157 МПа. Исследования характеристик усталости сварных соединений выполнялись в основном в режиме нагружения, который выбирался таким образом, чтобы число циклов до разрушения составляло около $2 \cdot 10^5$. Испытания проводили до полного разрушения образца.

Испытания на вязкость разрушения при плоской деформации (K_{IC}) проводили по методике, полностью соответствующей американскому стандарту ASTM E 399.72 на образцах, нагруженных по схеме внецентренного растяжения (рис. 4).

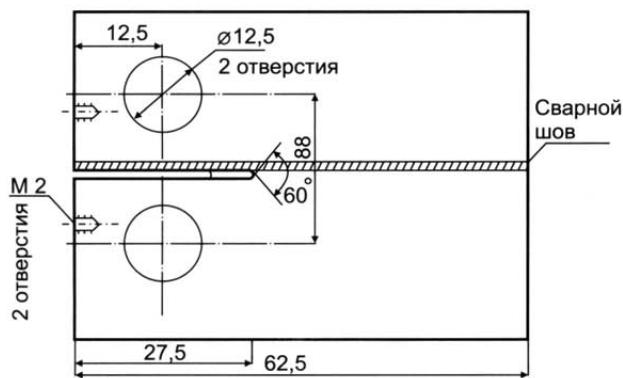


Рис. 4. Образец для определения K_{IC} основного материала и сварного соединения при внецентренном растяжении

Особенность методики состояла в том, что исходный надрез был короче рекомендованного в стандарте, что позволило перед испытаниями на этих же образцах определить скорость роста трещины усталости [4].

Обсуждение полученных результатов

На рис. 5 показан типичный использованный для испытаний сварной образец, полученный из штамповки 1420 методом ЭЛС.

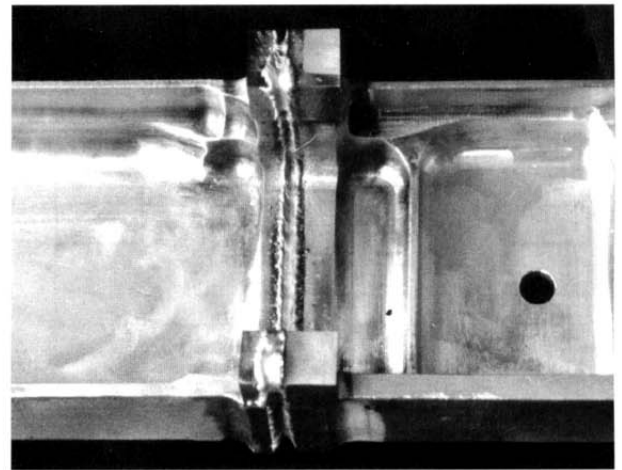


Рис. 5. Сварной образец, полученный из штамповки сплава 1420 методом ЭЛС

Механические свойства и угол загиба сварных соединений поковок и штамповок из сплава 1420 приведены в табл. 3. Указаны минимальные, максимальные и средние значения по

Таблица 3

Механические свойства и угол загиба сварных соединений
поковок и штамповок из сплава 1420

Тип образца	σ_B , МПа	$\sigma_B^{св}/\sigma_B$	КСУ, Дж/см ³		Угол загиба, град.
			Надрез вдоль металла шва	Надрез по зоне сплавления	
Поковка	<u>350–410</u> 380	0,85	<u>4,5–8,4</u> 6,7	<u>6,5–14,0</u> 9,2	<u>38–46</u> 43
Штамповка	<u>368–380</u> 372	0,80	<u>8,4–11,0</u> 9,6	<u>14–244</u> 20	<u>54–61</u> 57

Примечания

- В таблице использованы обозначения: σ_B – предел прочности основного материала; $\sigma_B^{св}$ – предел прочности сварного соединения; КСУ – ударная вязкость.
- В числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние значения по данным испытаний восьми образцов.

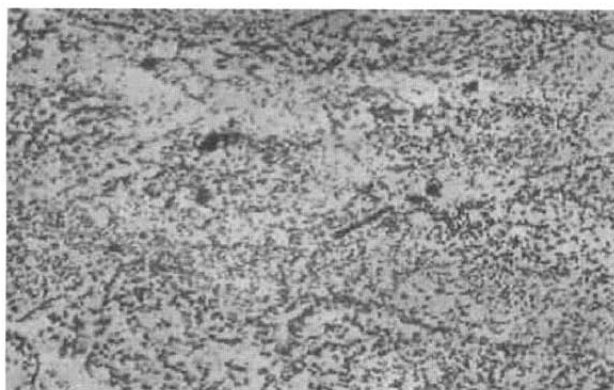
данным испытаний восьми образцов. На рис. 6 приведена микроструктура поковки и выполненного из неё сварного соединения. Поковка имеет полигонизованную структуру, в которой присутствуют вторичные выделения фазы S (Al_2MgLi) как по телу зерна, так и по большеугловым границам, декорируя их. В микроструктуре сварного соединения, выполненного методом ЭЛС (ширина сварного шва 2-4 мм), зона термического влияния выявляется металлографически как зона шириной 1,5 мм с меньшим, чем в основном материале количеством выделений фазы S. Резкой границы перехода от литой структуры шва к основному металлу не наблюдается, что свидетельствует о высоком качестве сварки.

Результаты испытаний на усталость основного материала 1420 и сварных соединений приведены в табл. 4. Некоторые образцы, изготовленные из поковки, выдержали без разрушения число циклов нагрузки, превышающее базовое, которое при исследовании было принято равным $2 \cdot 10^5$ циклов. Испытания этих образцов были прекращены ввиду их чрезмерной продолжительности (число циклов $N \sim 10^6$), а среднее значение долговечности до разрушения N_{cp} и соответствующее ей значение среднего квадратического отклонения (с.к.о.) определяли по разработанной в ЦАГИ методике. При этом предполагали, что распределение характеристик усталости является логарифмически нормальным. Следует от-

метить, что данные о сопротивлении усталости, полученные для поковки и штамповки, характеризуются повышенным статистическим разбросом, что свидетельствует о невысокой стабильности характеристик усталости этих полуфабрикатов. Аналогичная закономерность наблюдается и для других алюминиевых сплавов.

Усталостные характеристики сварного соединения из сплава 1420, выполненного электронно-лучевой сваркой, имели высокие значения (табл. 4). Кроме достаточно большой величины средней долговечности получено весьма низкое рассеяние числа циклов до разрушения. Наблюдаемые минимальные значения числа циклов на некоторых образцах связаны с наличием выходящих на поверхность пор диаметром 0,4 мм, которые не были выявлены применяемым рентгеновским методом. При исследовании изломов было установлено, что очаг усталостного разрушения располагается в зоне выхода пор на поверхность. Высокий уровень усталостной долговечности соединений, выполненных методом ЭЛС, частично объясняется отсутствием концентраторов напряжений в виде усиления и проплава. Однако полученные результаты свидетельствуют о весьма высоких возможностях ЭЛС, особенно при надежном контроле по выявлению дефектов.

Данные по статической трещиностойкости и сопротивлению росту трещины усталости приведены в табл. 5 и на рис. 7.



а



б

Рис. 6. Микроструктура материала образцов:

а – поковка сплава 1420 (x400); б – сварное соединение, выполненное методом ЭЛС (x100)

Таблица 4

Характеристики усталости основного материала штамповок
и поковок сплава 1420 и сварных соединений из них, полученных ЭЛС

Тип образца	$\sigma_{\max}$, МПа	N , число кциклов, <i>min-max</i>	N_{cp}	S
Поковка	157	92–310	208	0,36
Штамповка		96–387	215	0,35
ЭЛС штамповки		254–1328	667	0,38
ЭЛС поковки	175	>2000	>2000	–

Примечание. В таблице использованы обозначения: $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение цикла; $N, min-max$ – минимальное и максимальное значения долговечности до разрушения; N_{cp} – среднее значение долговечности до разрушения; S – дисперсия долговечности до разрушения.

Таблица 5

Характеристики статической трещиностойкости и сопротивление росту трещины усталости поковки из сплава 1420 и сварного соединения из штамповки, полученного ЭЛС

Тип образца	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	dL/dN , мм/цикл при ΔK , МПа·м ^{1/2}		
		9,3	15,5	18,6
Поковка	32*; 34*; 33 33	–	0,485; 0,560 0,523	0,955; 1,32 1,14
ЭЛС штамповки	29,5*; 31,6*; 33,5* 31,6*	0,083	0,350; 0,352 0,351	0,670–0,700 0,685

Примечания

1. Используются обозначения: dL/dN – скорость роста трещины усталости (СРТУ); L – длина трещины; N – число циклов; ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений.
2. Значения K_{IC} , отмеченные знаком *, не корректны и могут быть использованы лишь для сравнительных оценок, так как не выполнено условие стандарта для минимальной толщины t материала в окрестности вершины трещины $t > 2,5(K_{IC}/\sigma_{0,2})^2$.

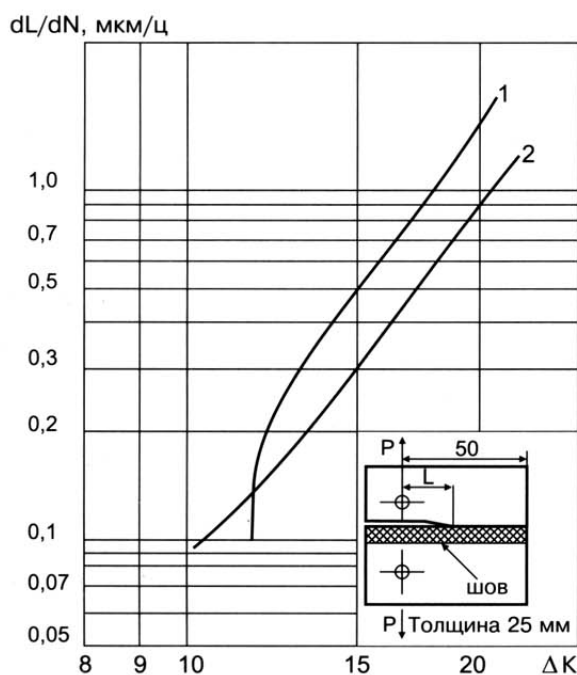


Рис. 7. Сопротивление росту трещины усталости:

1 – поковка сплава 1420;

2 – сварное соединение из штамповки,
выполненное методом ЭЛС

Полученные характеристики статической и циклической трещиностойкости демонстрируют возможности полуфабрикатов сплава 1420 и сварных соединений из него. Статическая трещиностойкость сварного соединения ЭЛС не уступает этой характеристике основного материала. При этом в сравнении с основным материалом СРТУ сварных соединений при всех значениях коэффициента интенсивности напряжений меньше, чем в основном материале. Таким образом, сварные соединения по главным ресурсным характеристикам превосходят основной материал.

Штамповки и поковки из сплава 1420 в состоянии искусственного старения обладают высокой стойкостью к коррозионному растрескиванию, имея в поперечном направлении по толщине $\sigma_{cr} = 180$ МПа.

На рис. 8–10 представлены типичные сварные конструкции планера самолета, в которых использованы полуфабрикаты из сплава 1420.

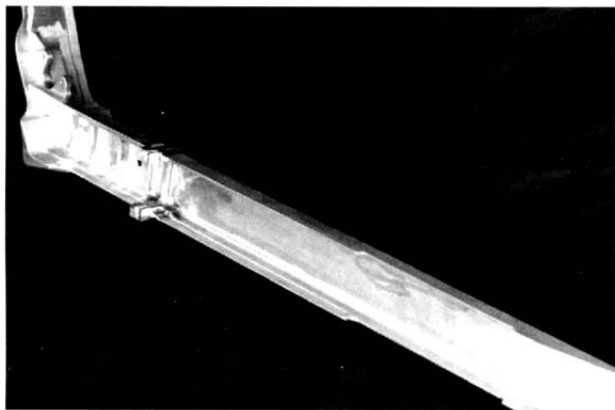


Рис. 8. Подфонарная балка,
сваренная из штамповок сплава 1420
методом ЭЛС

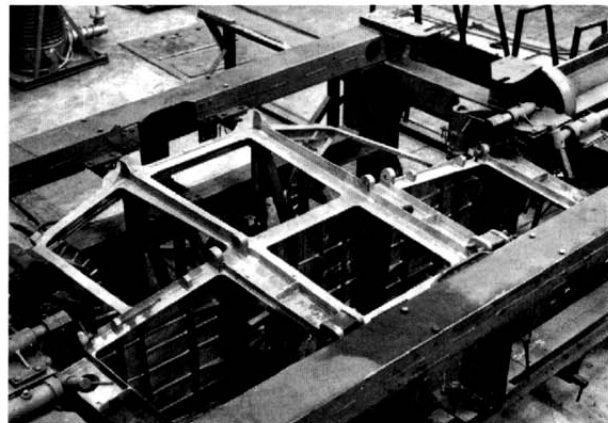


Рис. 9. Каркас бака в стапеле:
в центре – силовой шпангоут, сваренный
из штамповок сплава 1420 методом ЭЛС



Рис. 10. Хвостовая часть фюзеляжа.
Сборка детали под электронно-лучевую сварку

Заключение

Полученные результаты испытаний показывают возможности штамповок и поковок из сплава 1420 и потенциальные возможности сварных соединений ЭЛС из сплава 1420, в частности, для создания крупногабаритных изделий даже с учетом возможного снижения долговечности за счет масштабного эффекта, возникающих остаточных напряжений после сварки натурной конструкции, имеющегося технологического разброса. Кроме того, штамповки сплава 1420 могут использоваться для окантовки иллюминаторов, компонентов кабины, кожухов и колес.

Список литературы

1. Patent RU № 2038405 19.02.93.
2. I.N. Fridlynder a.o. Aluminum-Lithium Alloys of Aerospace Application// Sixth Int. Al-Li Conf. 1991, G. Pk (FRG). P. 35–42.
3. Patent RU № 2048592 20.11.95.
4. Grushko O.E., Denisov B.S., Yablonsky I.S. a.o. The potential possibilities of electron beam welding for Al-Li-Mg alloys // Journal of Advanced Materials, 1995, No. 6. P. 6–11.