
УДК 669.715:669.721.5

Г.Г. Клочков, О.Е. Грушко, В.И. Попов,
В.В. Овчинников*, В.Ф. Шамрай**

СТРУКТУРА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СВАРИВАЕМОСТЬ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА В-1341 СИСТЕМЫ Al–Mg–Si

Приведены результаты исследования листов сплава В-1341, разработанного на основе системы Al–Mg–Si, легированного кальцием. Изучены кристаллографическая текстура, микроструктура, способность к формообразованию при холодной деформации и свариваемость листов толщиной 1,5 мм.

Ключевые слова: Al–Mg–Si, В-1341, листы, технологичность, свариваемость, структура, кальций.

В конструкции современных летательных аппаратов широкое применение находят сварные узлы из алюминиевых сплавов, работающие под внутренним давлением жидкостей и газов. К таким узлам относятся подвесные и накладные топливные баки, топливные аккумуляторы, бачки и баллоны, а также сварные трубопроводы.

Технологический процесс изготовления бачков и баллонов включает операции холодной штамповки листовой заготовки и дуговую сварку неплавящимся электродом в защитном газе. В отечественной и зарубежной практике при изготовлении изделий, технологический цикл которых включает операции холодной штамповки с глубокой вытяжкой, растяжением и изгибом, обычно применяют сплавы системы Al–Mg. Однако эти сплавы обладают относительно низкой прочностью, не являются вакуумно-плотными в листах толщиной менее 2,5 мм, склонны к наклепу и формированию деформационных полос при деформации растяжением. Для аналогичных целей могут широко использоваться листы из сплавов системы Al–Mg–Si (серии 6000). В последние годы этим сплавам уделяется большое внимание в связи с тем, что их начинают применять в автомобильной промышленности.

В работе приведены результаты исследования листов сплава В-1341, разработанного на основе системы Al–Mg–Si, легированного кальцием. Изучены кристаллографическая текстура, микроструктура, способность к формообразованию при холодной деформации, свариваемость листов толщиной 1,5 мм сплавов системы Al–Mg–Si, содержащих легирующие добавки кальция, имеющих регламентированную рекристаллизованную структуру после закалки. Показана высокая технологичность листов, позволившая получить детали типа полусфер, тонкостенные профили в условиях стесненного изгиба, гофрированные панели. Изучена свариваемость сплава В-1341, получены герметичные сварные баллоны, которые при испытании под избыточным давлением до 1,3 ат (0,13 МПа) сохраняли герметичность. Полученные результаты показали перспективность применения сплава В-1341 системы Al–Mg–Si в сварных герметичных конструкциях вместо сплавов системы Al–Mg. Разработанный сплав применен в новом российском гражданском самолете SSJ (Sukhoi Super Jet) в конструкции пилонов, систем кондиционирования и отъемной части крыла.

* ФГУП «Российская самолетостроительная корпорация „МиГ”».

** «ИМЕТ им. А.А. Байкова» РАН.

Методы и материал для исследования

В качестве материала для исследований использовали холоднокатаные листы толщиной 1,5 мм из сплавов системы Al–Mg–Si двух составов: без кальция и с кальцием. Величину зерна определяли на микрошлифах, вырезанных в продольном направлении относительно прокатки по толщине листа.

Технологичность при холодном формообразовании холоднокатаных листов в закаленном состоянии оценивали комплексной методикой [1], включающей определение показателей, характеризующих способность материала к выдавке (коэффициент выдавки $K_{\text{выд}}$, высота купола H) и гибке (минимальный радиус изгиба r_{min}).

Величину $K_{\text{выд}}$ определяют по формуле:

$$K_{\text{выд}} = H / (D_{\text{м}} - s),$$

где H – высота купола, мм; $D_{\text{м}}$ – диаметр матрицы, мм; s – толщина листа, мм.

Влияние Са на структуру

Одними из существенных факторов, определяющих способность к формообразованию при холодной деформации, являются кристаллографическая текстура и зеренная структура. Размер зерна в листах из сплавов системы Al–Mg–Si не должен превышать величины $d \approx 50\text{--}70$ мкм [2]. В алюминиевых сплавах на параметры структуры существенное влияние оказывают переходные металлы, такие как Fe, Zr, Ti, а также щелочные и щелочноземельные металлы.

Исследована структура листов двух сплавов. Микроструктуры листов изученных сплавов заметно различаются как по размеру зерна, так и по своему характеру. Зерна в сплаве без кальция значительно крупнее, чем в сплаве с кальцием (соответственно: ~ 100 и ~ 30 мкм), они имеют более равноосную (полигональную) форму. Все это указывает на то, что в сплаве без кальция прошла собирательная рекристаллизация. Зерна в сплаве с кальцием мельче и более вытянуты, структура более однородная (рис. 1).

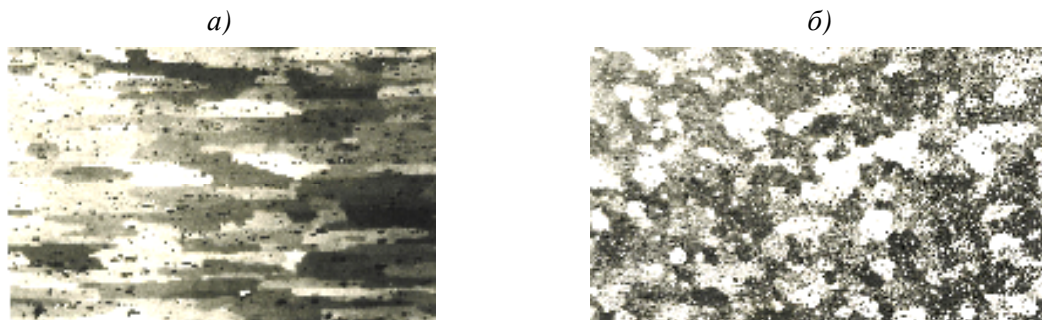


Рис. 1. Микроструктура ($\times 100$; цветное травление) сплава В-1341 без кальция (а) и с кальцием (б)

Листы сплава без кальция характеризуются заметной неоднородностью текстуры по толщине. По всему сечению листа преобладает кубическая ориентация $\{100\}\text{-}\langle 0kl \rangle$. В структуру срединных слоев заметный вклад внесли ориентации сдвигового типа $\{hkl\}\text{-}\langle 011 \rangle$ с осью $\langle 011 \rangle$, параллельной направлению прокатки. Практически отсутствуют ориентации плоской деформации типа $\{110\} + \{hkl\}\text{-}\langle 112 \rangle$, характерные для текстуры срединных слоев листов из алюминиевых сплавов [3, 4]. В срединной части листов отмечено присутствие октаэдрической ориентации сдвигового типа $\{111\}\text{-}\langle 011 \rangle$, которая выражена наиболее отчетливо в сплаве с кальцием. В целом наблюдается некоторая не-

регулярность мотива полюсных фигур, проявляющаяся в виде нарушений зеркальной симметрии позиций текстурных максимумов, отвечающих совокупности ориентации одного типа, что свидетельствует о наличии крупных зерен.

Основной особенностью прямых полюсных фигур (ППФ) листов сплава с кальцием является сильный центральный максимум ($P \approx 10-20$), соответствующий кубической текстуре. Помимо кубической текстуры, только на ППФ подповерхностных слоев сплава без кальция фиксировались следы текстуры Госса типа $\{110\}-\langle 001 \rangle$ и компонент $\{113\}-\langle 332 \rangle$. На большинстве полюсных фигур проявились изолированные интенсивные максимумы, свидетельствующие о присутствии крупных зерен произвольной ориентации. Полюсные фигуры сплава с кальцием имеют более регулярный характер, на них практически полностью отсутствуют сильные изолированные максимумы [5]. В отличие от сплава без кальция, в структуре сплава с кальцием в качестве основного присутствовал октаэдрический компонент $\{111\}\langle 110 \rangle$, который, как известно, обеспечивает однородное течение металла при холодной штамповке без образования фестонов.

Для обеспечения хорошего формообразования при холодной деформации необходимо, чтобы листы были изотропны. Листы сплава, легированного кальцием, в состоянии Т (закалка+естественное старение) – изотропны (рис. 2). Значения предела прочности находятся в диапазоне 252–258 МПа, а относительного удлинения: 28,5–31,3%.

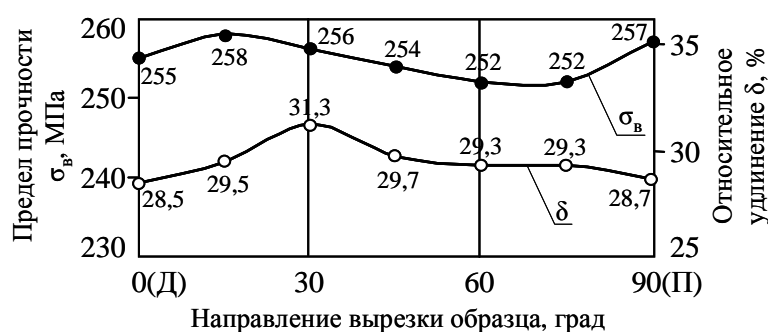


Рис. 2. Свойства листов из сплава В-1341 в зависимости от направления вырезки образцов

Влияние Са на формообразование и свариваемость

На листах обоих сплавов в состоянии Т были определены характеристики технологичности при холодном формообразовании (табл. 1). Высота купола при выдавке H и коэффициент выдавки на листах сплава с кальцием выше, чем на листах без кальция. Минимальный угол изгиба для обоих сплавов находится в пределах $(0,6-0,8)s$ (s – толщина листа, мм).

Таблица 1

Характеристики технологичности сплавов системы Al–Mg–Si

Сплав	Показатель технологичности			
	r_{\min}	$K_{\text{выд}}$	H , мм	Качество поверхности
Без кальция	0,6–0,8	35	20	Небольшая шероховатость
С кальцием	0,6–0,8	43	23	Гладкая

Исследована свариваемость сплавов системы Al–Mg–Si. В табл. 2 показано влияние содержания кальция на склонность сплава к образованию трещин. Аргондуговую сварку образцов осуществляли без присадки и с присадочной проволокой. Как видно, введение в сплав кальция позволяет снизить коэффициент трещинообразования. Склонность к трещинообразованию при сварке плавлением в результате введения кальция снижается за счет измельчения структуры швов.

Склонность к трещинообразованию при сварке ААрДЭС сплава В-1341

Сплав	Вид сварки	Коэффициент трещинообразования, %
Без кальция	Без присадки	45
С кальцием	Без присадки	18
	С присадкой	2–8

Изготовление деталей из листов сплава В-1341

На основании полученных результатов сплав системы Al–Mg–Si, легированный кальцием, запатентован и получил марку В-1341. Освоено его промышленное производство в виде листов, прессованных прутков, профилей, труб. Гарантированный уровень свойств листов из сплава В-1341:

Предел прочности σ_b , МПа ≥ 330

Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа ≥ 260

Относительное удлинение δ , % ≥ 10 .

Из холоднокатаных листов в состоянии Т методами холодной деформации могут быть получены детали сложной формы (рис. 3) без промежуточной термической обработки.

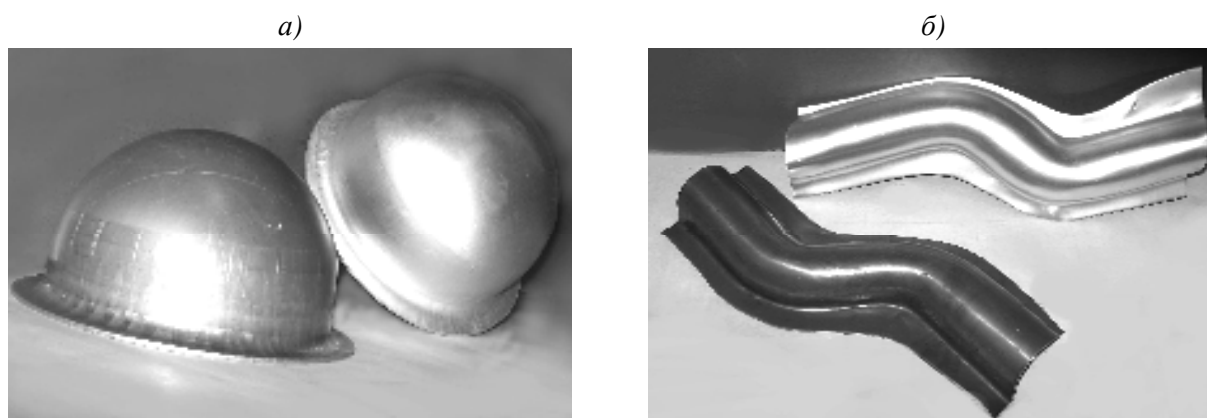


Рис. 3. Детали из сплава В-1341, полученные холодной деформацией:
а – днище бака $\varnothing 120$ мм (штамповка за два перехода, без промежуточной термической обработки); *б* – полупатрубок (штамповка за один переход)

Листы, сварные соединения и детали из сплава В-1341 имеют высокую коррозионную стойкость. Глубина межкристаллитной коррозии (МКК) в состоянии Т1(закалка+искусственное старение) и после нагрева при 175°C , 1000 ч не превышает 0,1 мм.

Листы из сплава В-1341 хорошо свариваются с листами сплавов системы Al–Mg. Характеристики сварных соединений приведены в табл. 3.

Механические свойства сварных соединений

Сочетание сплавов	Состояние образца*	Предел прочности сварного соединения $\sigma_{в.св}$, МПа	Угол изгиба, град
В-1341-Т+В-1341-Т	1	208	83
	2	288	62
В-1341-Т+АМг2	1	196	100
	2	197	81
В-1341-Т4+АМг4	1	202	90
	2	215	72
В-1341-Т4+АМг6	1	207	81
	2	282	60

* 1 – после сварки; 2 – искусственное старение после сварки.

Проведены сравнительные циклические испытания на герметичность образцов-емкостей (рис. 4) из сплава В-1341 (толщина листа 1,5 мм) и сплава АМг4 (толщина листа 2,5 мм) по следующей схеме:

- проверка на герметичность давлением воздуха 0,2 МПа;
- подъем давления до 0,2 МПа (через штуцер в дне) и сброс давления до нуля (один цикл);
- осмотр герметичности сварных швов через каждые 1000 циклов.

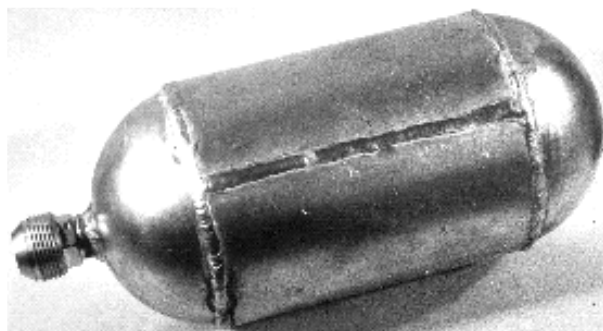


Рис. 4. Образец-емкость из сплава АМг4



Рис. 5. Топливный аккумулятор из сплава В-1341 (показано образование «бочки»)

Испытания на герметичность избыточным давлением показали, что образцы-емкости из сплава АМг4 теряют герметичность при повышении давления с 0,2 до 0,3 МПа. При этом наблюдается отпотевание (нарушение герметичности) как по основному металлу, так и по сварному соединению. Нарушение герметичности по сварному соединению происходит по металлу шва или по зоне сплавления.

При испытаниях на герметичность циклическим нагружением образцы-емкости из сплава В-1341 выдержали $(48-50) \cdot 10^3$ циклов без нарушения герметичности основного металла и продольного сварного шва, такие же образцы-емкости из сплава АМг4 теряли герметичность приблизительно через $(28-33) \cdot 10^3$ циклов нагружения.

Хорошая штампуемость и свариваемость листов сплава В-1341 позволяет изготавливать из него сварные топливные аккумуляторы, топливные баки, расположенные в крыльях самолета, и расширительные бачки из листа толщиной 1,5 мм (взамен сплава АМг4 толщиной 2,5 мм). Применение сплава В-1341 должно способствовать повышению надежности в эксплуатации сварных емкостей. На рис. 5 показан топливный аккумулятор из сплава В-1341 после испытания на прочность при внутреннем давлении, в 2 раза превышающем рабочее.

Таким образом, во ФГУП «ВИАМ» разработан и запатентован сплав марки В-1341 на основе системы Al–Mg–Si с легирующей добавкой кальция, которая оказывает положительное влияние на комплекс свойств, структуру и свариваемость сплава. Показаны высокие характеристики коррозионной стойкости, формообразования и свариваемости листов из сплава В-1341. Сплав рекомендован для замены сплавов системы Al–Mg в сварных узлах, работающих под давлением, и деталей, полученных холодной деформацией. В промышленном производстве освоено изготовление листов (рулонная прокатка), пресованных профилей, прутков, труб. Полуфабрикаты из сплава В-1341 могут использоваться в авиационной и автомобильной промышленности, строительстве. Разработанный сплав применен в новом российском гражданском самолете SSJ (Sukhoi Super Jet).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. М.: Машиностроение. 1975. С.175.
2. Katsushi M., Yasuaki S., Mashiro Y. U.S. Patent 6334916, January, 2002.
3. Фридляндер И.Н., Шамрай В.Ф., Бабарэко А.А. и др. //Металлы. 1999. №2. С. 79–84.
4. Фридляндер И.Н., Бабарэко А.А., Сандлер В.С. //Перспективные материалы. 2000. №4. С. 19–24.
5. Шамрай В.Ф., Грушко О.Е., Шевелёва Л.М., Самсонов В.Д. //Перспективные материалы. 2004. №5. С. 16–22.

УДК 669.715:669.884

Ю.Ю. Клочкова, О.Е. Грушко, Л.П. Ланцова, И.П. Бурляева, Б.В. Овсянников*

ОСВОЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ПЕРСПЕКТИВНОГО АЛЮМИНИЙЛИТИЕВОГО СПЛАВА В-1469

Приведены результаты испытаний катаных и прессованных полуфабрикатов из сплава В-1469-Т1. Сплав В-1469 на основе системы Al–Cu–Li–Mg–Ag является алюминиевым деформируемым, термически упрочняемым, пониженной плотности, высокопрочным, высококоррозионностойким.

***Ключевые слова:** листы, прессованные профили, раскатные кольца, алюминийлитиевые сплавы, исследование, термическая обработка.*

Создание российских гражданских и боевых самолетов нового поколения, а также современных образцов ракетно-космической техники, в том числе работающих в условиях криогенных температур, требует разработки и освоения промышленного производства новых конструкционных материалов [1–3].

Алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом летательных аппаратов, поэтому на протяжении нескольких десятилетий как за рубежом, так и в России ведутся исследования, направленные на разработку алюминиевых сплавов, легированных литием, обладающих большей удельной прочностью и жесткостью [4].

Работами зарубежных исследователей показано, что при дополнительном легировании сплавов системы Al–Cu–Li серебром можно получить более высокий уровень прочностных характеристик. Положительное влияние серебра на эффект старения сплавов алюминий–литий и алюминий–медь–литий было обнаружено Харди еще в 1956 году. В настоящее время зарубежные фирмы разрабатывают третье поколение таких сплавов.

В 2003 г. во ФГУП «ВИАМ» разработан и запатентован высокопрочный высококомодульный ($E=78–80$ ГПа) коррозионностойкий свариваемый сплав В-1469 пониженной плотности ($d=2,67$ г/см³) на основе системы Al–Cu–Li–Mg, легированный Ag, Zr и Sc. Благодаря дополнительному легированию цирконием, скандием и серебром, по удельной прочности он превосходит все существующие алюминиевые деформируемые сплавы, имеет высокие характеристики коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности. Сплав технологичен при литье и обработке давлением, что позволяет получать из него все виды полуфабрикатов.

*ОАО «КУМЗ», г. Каменск-Уральский.