

УДК 629.784.02:669.715:621.791.14

СПЛАВ 1570С — МАТЕРИАЛ ДЛЯ ГЕРМЕТИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МНОГОРАЗОВЫХ ИЗДЕЛИЙ РКК «ЭНЕРГИЯ»

© 2014 г. Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская область, Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Оптимизирован химический состав алюминиевого сплава 1570С применительно к созданию изделий ракетно-космической техники многоразового использования. Освоено промышленное производство сплава 1570С. Проведены всесторонние исследования и выпущены опытные технические условия на полуфабрикаты из сплава 1570С. Разработаны технологические рекомендации по изготовлению сварных крупногабаритных конструкций из сплава 1570С. Отработана технология изготовления элементов конструкции пилотируемого транспортного корабля нового поколения. Показано, что сварка трением с перемешиванием — эффективный и перспективный способ сварки для изготовления космических аппаратов.

Ключевые слова: алюминиевый сплав 1570С, сварка трением с перемешиванием, пилотируемый транспортный корабль нового поколения.

ALLOY 1570C — MATERIAL FOR PRESSURIZED STRUCTURES OF ADVANCED REUSABLE VEHICLES OF RSC ENERGIA

Bronz A.V., Efremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavsky A.G.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

The chemical composition of aluminum alloy 1570C was optimized to adapt it to the use in reusable rocket and space hardware. Industrial production of the 1570C alloy was set up. Comprehensive studies were conducted and tentative specifications for semi-finished products made of 1570C alloy were published. Manufacturing recommendations were developed for constructing large welded structures made of the 1570C alloy. Manufacturing process was developed for structural elements of the new-generation manned transportation spacecraft. It was demonstrated that friction stir welding is an efficient and promising welding method for spacecraft manufacturing.

Key words: aluminum alloy 1570C, friction stir welding, new-generation manned transportation spacecraft.



БРОНЗ А.В.



ЕФРЕМОВ В.И.



ПЛОТНИКОВ А.Д.



ЧЕРНЯВСКИЙ А.Г.

БРОНЗ Александр Владимирович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: aleksandr.bronz@rsce.ru
 BRONZ Alexander Vladimirovich – Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher at RSC Energia, e-mail: aleksandr.bronz@rsce.ru

ЕФРЕМОВ Виктор Иванович — начальник лаборатории РКК «Энергия», e-mail: viktor.efremov@rsce.ru
 EFREMOV Victor Ivanovich — Head of Laboratory at RSC Energia, e-mail: viktor.efremov@rsce.ru

ПЛОТНИКОВ Андрей Дмитриевич — кандидат технических наук, начальник отделения РКК «Энергия», e-mail: andrey.plotnikov@rsce.ru
 PLOTNIKOV Andrey Dmitrievich — Candidate of Science (Engineering), Head of Division at RSC Energia, e-mail: andrey.plotnikov@rsce.ru

ЧЕРНЯВСКИЙ Александр Григорьевич — заместитель генерального конструктора РКК «Энергия», e-mail: alexander.cherniavsky@rsce.ru
 CHERNYAVSKY Alexander Grigoryevich — Deputy General Designer at RSC Energia, e-mail: alexander.cherniavsky@rsce.ru

Сплав АМг6 — традиционный конструкционный материал для ракет и космических аппаратов

Проблема поиска новых свариваемых алюминиевых сплавов, относящихся к группе термически неупрочняемых и имеющих более высокие прочностные характеристики, чем существующие промышленные сплавы системы Al–Mg, самым непосредственным образом связана с созданием новых, более совершенных, образцов инновационной техники.

Одной из наиболее актуальных проблем научно-технического прогресса является повышение массового совершенства изделий ракетной и космической техники. Основной путь решения этой проблемы — улучшение удельных прочностных характеристик конструкционных материалов.

Наиболее распространенным материалом для большинства сварных конструкций ракет и космических аппаратов в течение длительного времени является алюминиевый термически неупрочняемый сплав АМг6, производимый в виде различных деформированных полуфабрикатов. Использование сплава АМг6 в конструкциях этого вида объясняется его несомненными достоинствами, такими как:

- хорошая свариваемость, позволяющая получать сварные соединения, близкие по прочности к основному металлу;
- высокая коррозионная стойкость, позволяющая работать в компонентах топлива и в морских условиях;
- достаточно высокая пластичность;
- высокая технологичность в металлургическом и машиностроительном производствах, связанная, в частности, с отсутствием необходимости в упрочняющей термической обработке полуфабрикатов и готовых деталей;

- высокая размерная и термическая стабильность.

Вместе с тем существенным недостатком сплава АМг6 является его довольно низкая прочность: гарантированный предел текучести, основная расчетная характеристика для большинства конструкций, у отожженных полуфабрикатов из сплава АМг6 составляет, в зависимости от вида полуфабриката, всего лишь 120...155 МПа.

Из сказанного выше становится ясно, насколько актуальной для ракетно-космической техники является проблема поиска таких новых сплавов, которые, обладая всеми достоинствами, присущими сплаву АМг6, имели бы более высокие прочностные свойства.

Таким образом, разработка и внедрение новых, более прочных, коррозионностойких технологичных термически неупрочняемых алюминиевых сплавов — это существенный вклад в решение проблемы повышения тактико-технических данных изделий ракетной и космической техники, возможность создания новых типов летательных аппаратов с использованием сварки как основного метода соединений.

Перспектива перехода к сплавам системы Al–Mg–Sc

Однако, достижение высоких прочностных свойств алюминиевых сплавов зачастую идет в ущерб их технологичности. Разрабатываются новые сплавы, имеющие существенно более высокие прочностные характеристики, технологичность и надежность. Внедрение таких сплавов позволит не только повысить надежность и ресурс конструкции, но и снизить ее массу и металлоемкость. Перспективным направлением решения этих задач является легирование сплавов системы Al–Mg переходными металлами, в частности, скандием [1].

Таблица 1

Сравнительные характеристики сплавов 01570 и АМг6

| Характеристики | Сплав 01570 | Сплав АМг6 |
|--|-------------|------------|
| Система сплава | Al–Mg–Sc | Al–Mg |
| Плотность γ , г/см ³ | 2,65 | 2,64 |
| Модуль упругости E, МПа | 69 580 | 69 580 |
| Предел прочности σ_B , МПа | 370...390 | 313 |
| Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа | 245 | 157 |
| Относительное удлинение δ , % | 15 | 15 |
| Удельная прочность σ_B/γ , км | 14,5 | 11,9 |
| Коэффициент прочности сварного шва $\sigma_{B\text{св.соед}}/\sigma_B$ | 0,85...0,95 | 0,9...0,95 |

По пределу текучести полуфабрикаты из сплава системы Al–Mg–Sc превосходят аналогичные полуфабрикаты из сплава АМг6 в 1,5...2,0 раза в зависимости от вида полуфабриката. Применение сплава 01570 вместо сплава АМг6 дает выигрыш в массе до 20%.

О необходимости модернизации сплава 01570 применительно к созданию изделий ракетно-космической техники многоразового использования

В настоящее время имеется достаточно большой опыт применения сплава 01570 в изделиях ракетно-космической техники разового использования. Однако для изготовления герметичных отсеков космических аппаратов многоразового использования, кроме высокой прочности и пластичности, сплав системы Al–Mg–Sc должен обладать высокой статической и динамической трещиностойкостью, обеспечивающей неоднократное использование изделия, т. е. подход к выбору материала должен быть таким же, как к материалу планера самолета. Сплав 01570 имеет низкую сопротивляемость развитию усталостной трещины, что делает его непригодным для многоразового использования [3].

Реализация необходимого комплекса механических и эксплуатационных свойств может быть обеспечена за счет корректировки химического состава сплава 01570. В ходе такой корректировки при участии сотрудников РКК «Энергия» было выбрано оптимальное содержание основных легирующих элементов (снижение содержания Mg, Mn, снижение верхнего предела Sc), малых добавок (Be, Ce) и увеличена чистота по примесям, главным образом Fe и Si ($\Sigma_{\text{Fe+Si}} \leq 0,12$). Сплаву присвоена марка 1570С и выпущены ТУ на его химический состав. Особенностью сплава 1570С является низкое суммарное содержание Fe+Si, которое в промышленных условиях может быть обеспечено только при высокой чистоте шихтовых материалов, в первую очередь, первичного алюминия (табл. 2).

Скандий, используемый в качестве легирующего элемента в алюминиевых сплавах, оказался наиболее эффективным переходным металлом из всех ранее известных применительно к данной группе сплавов — выделения фазы Al_3Sc более дисперсные (1...10 нм), чем выделения от других металлов. Это объясняется тем, что высокая стабильность дисперсных выделений этой фазы в большой степени влияет на формирование ячеистой структуры деформированных полуфабрикатов. Дисперсные частицы интерметаллида в зависимости от температурных и скоростных условий пластической деформации сплава в большей или меньшей степени повышают температуру рекристаллизации и способствуют, в результате высокотемпературных нагревов, получению нерекристаллизованной структуры и дополнительного упрочнения сплава. По мере повышения дисперсности алюминиевых фаз увеличиваются как эффект непосредственного дисперсионного твердения, так и величина структурного упрочнения. Скандий в значительной степени стабилизирует литую ячеистую структуру, его добавка позволяет получать слитки непрерывного литья из алюминиевых сплавов с недендритной структурой. При наличии дополнительных легирующих элементов 0,1...0,2% (особенно Ti, Zr, Hf) массовая критическая концентрация скандия ($\approx 0,15...0,35\%$), при которой образуется мелкозернистая структура, существенно уменьшается.

Требованиям авиационно-космической промышленности в большей мере удовлетворяет высокопрочный термически неупрочняемый алюминиевый сплав 01570. Сплав 01570 системы Al–Mg–Sc был разработан Всероссийским институтом легких сплавов (ВИЛС) в 70-х гг. прошлого столетия. В нем содержится: 5,8...6,8% Mg; 0,3...0,5% Sc; 0,1...0,25% Mn; 0,05...0,15% Zr, а также добавки других элементов. Сплав обладает высокой коррозионной стойкостью, прочностью и хорошей свариваемостью.

В отожженном состоянии сплав предназначен для изготовления как сварных, так и бесшовных конструкций, работающих в диапазоне температур $-196...+156^\circ\text{C}$, и имеет во всех видах полуфабрикатов более высокие, чем у сплавов системы Al–Mg, прочностные характеристики (табл. 1).

Сплав 01570 не является жаропрочным: при повышении температуры испытаний он быстро разупрочняется. Вместе с тем известно, что сплав является природно сверхпластичным, т. е. деформированные полуфабрикаты из него могут подвергаться сверхпластической формовке без специальной подготовки структуры, что, в свою очередь, позволяет получать изделия сложной формы [2].

Таблица 2

Химический состав сплавов 01570 (по ТУ 1-809-420-2007) и 1570С (по ТУ 1-809-1177-2009)

| Сплав | Массовая доля элемента, % масс | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|-----|--------|
| | Mg | Mn | Sc | Zr | Ti | Be | Ce | Fe | Si | Прочие |
| 01570 | 5,3...6,3 | 0,2...0,6 | 0,17...0,35 | 0,05...0,15 | 0,01...0,05 | 0,0002...0,005 | — | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| 1570С | 5,0...5,6 | 0,2...0,5 | 0,18...0,26 | 0,05...0,12 | 0,01...0,03 | 0,0002...0,005 | 0,0002...0,0009 | $\Sigma_{Fe+Si} \leq 0,05...0,12$ | | 0,1 |

Слиток и полуфабрикаты в отожженном состоянии имеют нерекристаллизованную структуру и хорошее сочетание прочностных и пластических свойств. Ранее было показано [4], что сплав 1570С обладает удовлетворительной технологической пластичностью при холодной деформации, подтверждена возможность изготовления деталей сложной формы с промежуточным отжигом. Наиболее высокой прочностью обладают листы ($\sigma_B = 450$ МПа) и тонкостенные профили ($\sigma_B = 410$ МПа). Прочностные свойства полуфабрикатов больших сечений — плит и раскатных колец — ниже ($\sigma_B = 380$ МПа). Листы отличаются высоким сопротивлением малоциклового усталости, низкой чувствительностью к концентратору напряжений (эффективный коэффициент концентрации напряжений $K_\sigma \approx 1,4$) и высоким сопротивлением развитию трещин ΔK (рис. 1). Установлено, что ограниченный предел выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ при пульсирующем нагружении образцов из плиты сплава 1570С толщиной 35 мм равен 200 МПа (рис. 2).

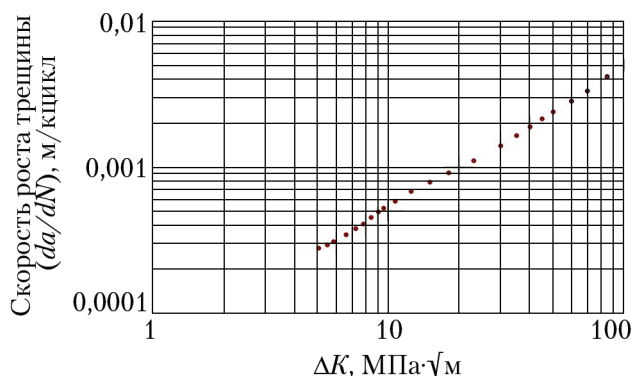


Рис. 1. Диаграмма циклической трещиностойкости листа толщиной 2,5 мм из сплава 1570С

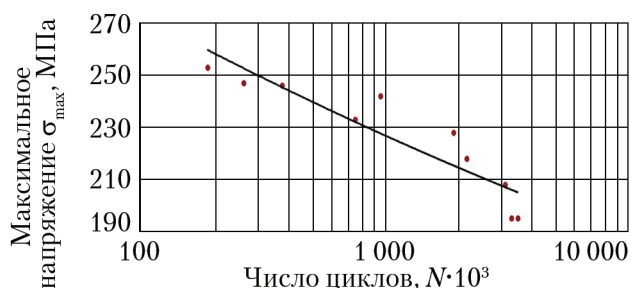


Рис. 2. Диаграмма усталостной прочности сплава 1570С (плита толщиной 35 мм)

Освоение промышленного производства алюминиевого сплава 1570С

Авторами совместно с Всероссийским институтом легких сплавов была отработана технология и получены опытно-промышленные партии полуфабрикатов и заготовок, в том числе крупногабаритных, из сплава выбранного состава — листов, плит, прутков, профилей, раскатных колец, поковок, штамповок, сварочной проволоки. Проведены всесторонние исследования полученных полуфабрикатов. Разработаны технологические рекомендации по изготовлению сварных крупногабаритных конструкций из сплава 1570С. Выпущены опытные ТУ на листы, плиты, прутки, профили, раскатные кольца и сварочную проволоку из сплава 1570С.

На следующем этапе на Каменск-Уральском металлургическом заводе (КУМЗ) были изготовлены промышленные партии полноразмерных полуфабрикатов из сплава 1570С. Отработана технология литья и изготовления плоских слитков сечением 300×1100 мм. Химический состав полученных слитков полностью соответствовал требованиям ТУ 1-809-1177-2009 на химический состав алюминиевого сплава 1570С как по основным легирующим элементам, так и по примесям. Отработаны режимы термической и термомеханической обработки сплава 1570С в процессе изготовления от гомогенизации слитков до получения конечных полуфабрикатов, выпущены технические условия на плиты (ТУ 1-804-505-2012) и листы (ТУ 1-804-506-2012) из алюминиевого сплава 1570С. Полученные полуфабрикаты имели следующие размеры: плиты 30×1800×2000 и 35×1800×2000 мм, листы (2,5...4,0)×1500×3000 мм.

Крупногабаритные полуфабрикаты из сплава 1570С по механическим характеристикам превосходят аналогичные полуфабрикаты из сплава АМг6. Для листов и плит предел прочности при растяжении $\sigma_B = 375...400$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 245...300$ МПа и относительное удлинение $\delta = 15...20\%$.

Отработка технологии изготовления элементов конструкции пилотируемого транспортного корабля нового поколения

Из полученных плит толщиной 30 мм на Заводе экспериментального машиностроения РКК «Энергия» (ЗЭМ) были изготовлены фрагменты конструкции корпуса гермокабины командного отсека возвращаемого аппарата пилотируемого транспортного корабля нового поколения (ПТК НП): сектор конической обечайки с иллюминатором (рис. 3) и сектор конической обечайки с крышкой входного люка.

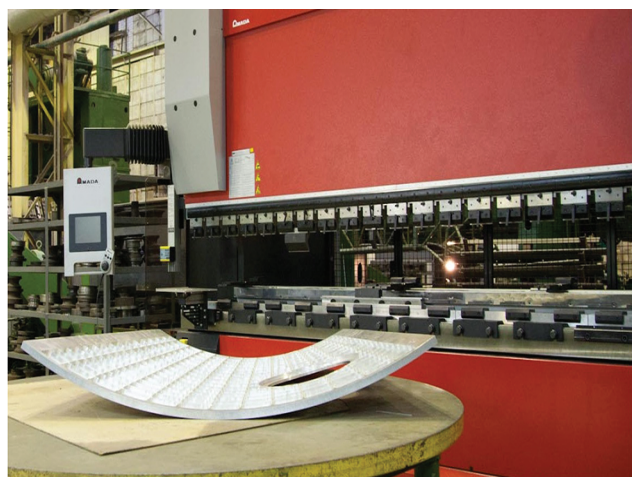


Рис. 3. Элемент конической обечайки (с вафельной оболочкой)

В процессе изготовления штатных элементов конической обечайки были отработаны технологические процессы механической обработки (вафельная оболочка), гибки (придание конусности), термофиксации (для предотвращения негативного влияния внутренних напряжений при механической обработке).

Выбор способа сварки герметичных изделий из сплава 1570С

Герметичность изделия предъявляет высокие требования к сварным соединениям. Были проведены исследования влияния различных видов сварки на сварной шов из сплава 1570С. Показано, что плиты толщиной 30...35 мм из сплава 1570С хорошо свариваются всеми видами сварки. В качестве основного метода, обеспечивающего практически равнопрочное основному металлу сварное соединение, предпочтительным выглядит сварка трением с перемешиванием (СТП).

СТП на сегодняшний день является одной из перспективных технологий и набирает все большую популярность среди мировых производителей авиационной и

ракетно-космической техники. Среди основных преимуществ СТП при сварке алюминиевых сплавов по сравнению со сваркой плавлением можно выделить следующие:

- возможность получения беспористых швов;
- отсутствие сварочных материалов;
- не требуется специального профиля кромок и удаления окисной пленки перед сваркой;
- возможность получения соединений во всех пространственных положениях;
- возможность получения швов на сплавах, чувствительных к образованию горячих трещин при сварке плавлением.

Установлено, что на сплаве 1570С возможно получение прочности сварного шва после СТП на уровне не менее 0,9 от прочности основного металла при толщине 35 мм. Исследования микро- и макроструктуры металла шва, выполненного СТП, показали, что во всех зонах соединения отсутствуют дефекты в виде трещин и несплошностей. Сварные соединения имеют высокую ударную вязкость металла шва (KCU до 70 Дж/см²). Метод СТП позволяет восстанавливать не только швы, полученные этим способом сварки, но также может применяться для устранения дефектов сварных швов, полученных дуговой сваркой.

Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- выбор сплава 1570С системы Al–Mg–Sc дает возможность обеспечения достаточно высокого уровня прочностных свойств без применения трудно реализуемой на практике упрочняющей термической обработки (заковки и старения) крупногабаритных деталей;
- по техническому заданию РКК «Энергия» отработана технология изготовления листов и плит (в т. ч. крупногабаритных, на серийном металлургическом предприятии КУМЗ, г. Каменск-Уральский), прутков, профилей, раскатных колец, поковок, штамповок, сварочной проволоки;
- на все полуфабрикаты выпущены технические условия на их поставку;
- изготовлены штатные конические элементы конструкции герметичного отсека для макета ПТК НП;
- сварка трением с перемешиванием является перспективной технологией получения герметичных неразъемных соединений из толстостенных плит сплава 1570С, прочность сварного шва может достигать уровня 95...100% прочности основного металла.

Авторы выражают благодарность В.И. Агальцову (ФГУП «ЦНИИмаш») за помощь при проведении экспериментально-расчетных исследований предельного состояния сплава 1570С при статическом и циклическом нагружениях.

Список литературы

1. Филатов Ю.А. Промышленные сплавы на основе системы Al–Mg–Sc // Технология легких сплавов. 1996. № 3. С. 30–35.

2. Андреев В.В., Головкин А.Н., Бондаренко О.В. Экспериментальное исследование прокатываемости алюминиевого сплава системы

Al–Mg–Sc // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. 2010. № 42. С. 14–19.

3. Елагин В.И., Швечков Е.И., Филатов Ю.А., Захаров В.В. Трещиностойкость листов из сплавов Al–Mg–Sc // Технология легких сплавов. 2005. № 1–4. С. 40–44.

4. Филатов Ю.А., Плотников А.Д. Структура и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевого сплава 01570С системы Al–Mg–Sc для изделия РКК «Энергия» // Технология легких сплавов. 2011. № 2. С. 15–26.

Статья поступила в редакцию 02.06.2014 г.

References

1. Filatov Yu.A. *Promyshlennyye splavy na osnove sistemy Al–Mg–Sc* [Industrial alloys based on the Al–Mg–Sc system]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1996, no. 3, pp. 30–35.

2. Andreev V.V., Golovko A.N., Bondarenko O.V. *Eksperimental'noe issledovanie prokatyvayemosti alyuminievogo splava sistemy Al–Mg–Sc* [Experimental study of rollability of aluminum alloy of the Al–Mg–Sc system]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «XPII». Zbirnik naukovikh prats'. Tematichnyi випуск: Novi rishennya v suchasnikh tekhnologiyakh*, 2010, no. 42, pp. 14–19.

3. Elagin V.I., Shvechikov E.I., Filatov Yu.A., Zakharov V.V. *Treshchinostoykost' listov iz splavov Al–Mg–Sc* [Crack resistance of sheets of Al–Mg–Sc alloys]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2005, no. 1–4, pp. 40–44.

4. Filatov Yu.A., Plotnikov A.D. *Struktura i svoystva deformirovannykh polufabrikatov iz alyuminievogo splava 01570С sistemy Al–Mg–Sc dlya izdeliya RKK «Energiya»* [Structure and properties of strained semi-finished products made of aluminum alloy 1570S of the Al–Mg–Sc system for products of RSC Energia]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2011, no. 2, pp. 15–26.