

УДК 669.715

*V.V. Antipov¹, N.Yu. Serebrennikova¹, Yu.N. Nefedova¹,
O.Yu. Kozlova¹, M.D. Panteleev¹, N.N. Osipov², A.V. Klychev²*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1441

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26

Описаны технологические особенности при изготовлении деталей из листов алюминий-литиевого сплава 1441 методами инструментального формообразования. Показана возможность использования контактной сварки при изготовлении деталей из листов сплава 1441. Представлены результаты исследований фазового состава и структуры образцов, вырезанных из деталей сплава 1441, методами просвечивающей электронной и оптической микроскопии. Описаны процессы формообразования автоклавным методом элементов и деталей из листов, плит алюминий-литиевого сплава 1441 и гибридного материала с использованием листов сплава 1441 и стеклопластиков.

Ключевые слова: алюминий-литиевый сплав, листы, формообразование, структура, свойства, гибридный материал, контактная точечная сварка.

*V.V. Antipov¹, N.Yu. Serebrennikova¹, Yu.N. Nefedova¹, O.Yu. Kozlova¹,
M.D. Panteleev¹, N.N. Osipov², A.V. Klychev²*

MANUFACTURING CAPABILITY OF Al–Li 1441 ALLOY DETAILS

Machinability by means of tool forming of sheet details of Al–Li 1441 alloy is described. Possibility of fabrication operations using resistance spot welding in assembly operations of details made of Al–Li 1441 alloy sheets is shown. The results of phase content and microstructure investigations by means of TEM and visible-light microscopy are shown. Processes of 1441 sheets and plates details forming and hybrid material made of 1441 sheets and fiberglass by means of autoclave molding.

Keywords: Al–Li alloy, details, forming, structure, properties, hybrid material, resistance spot welding.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Публичное акционерное общество «Воронежское акционерное самолетостроительное объединение» [Public Joint Stock Company Voronezh Joint-Stock Aircraft Construction Company]; e-mail: admin@air.vrn.ru

Введение

Алюминиевые сплавы продолжают служить в качестве конструкционных материалов для авиационной техники. Успешно применяются в отечественных и зарубежных самолетах высокопрочные сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu (B95п.ч., B95о.ч., 7075, 7475 и др.) и ресурсные среднепрочные сплавы системы Al–Cu–Mg (Д16ч., 1163, 2324, 2524 и др.).

К достоинствам алюминиевых сплавов можно отнести хорошую технологичность в металлургическом и машиностроительном производстве: стабильные литейные свойства при выплавке слитков и изготовлении всех видов полуфабрикатов прокаткой, штамповкой, прессованием и ковкой. При изготовлении деталей отработаны технологии обработки резанием, размерного травления, соединения при сборке конструкций

(сварка, клепка и т. п.). К достоинствам алюминиевых сплавов относят низкую плотность материала в сочетании с высокой удельной прочностью, хорошей коррозионной стойкостью, повышенными ресурсными характеристиками в отношении трещиностойкости и усталостной долговечности [1–3].

Возрастающие требования к надежности, ресурсу и весовой эффективности авиационных конструкций определяют необходимость постоянного совершенствования прочностных и технологических характеристик алюминиевых сплавов путем изменения состава по легирующим элементам и примесям (металлическим – железу, кремнию; неметаллическим – водороду), изменения технологических процессов и параметров при производстве полуфабрикатов, подбора новых режимов термической и термомеханической обработок полуфабрикатов, их эксплуатационных и технологических характеристик [4–8]. Использование традиционных приемов по улучшению характеристик алюминиевых сплавов не дает возможности в полной мере изменить свойства, необходимые для обеспечения поставленных конструкторами задач к современным самолетам.

В результате повышения конструктивно-технологических и эксплуатационных требований к конструкции воздушного судна возникла необходимость в создании нового класса материалов с применением современных методов моделирования и производства полуфабрикатов, обеспечивающих переход к применению новых материалов с заданными физико-механическими свойствами. Высокомодульные алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности и гибридные конструкционные материалы, изготовленные с использованием алюминий-литиевых листов и клеевых препрегов, являются перспективным направлением авиационного материаловедения. В связи с этим в настоящее время одним из перспективных способов развития алюминиевых сплавов с целью повышения весовой эффективности изделий авиационной техники является разработка алюминиевых деформируемых сплавов пониженной плотности, легированных литием. Применение алюминий-литиевых сплавов обеспечивает повышение весовой эффективности конструкций за счет пониженной плотности материалов, повышенной удельной прочности и жесткости.

Одним из технологических процессов получения неразъемных соединений на стадии изготовления деталей узлов и агрегатов для авиакосмической техники, которые позволяют значительно снизить трудоемкость, является сварка. Применительно к сплаву 1441 сборочные операции возможно реализовать как методом сварки в твердой фазе, так контактной точечной сваркой [9].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3, 5].

Материалы и методы

Исследования структуры материала при формообразовании методами холодной листовой штамповки, гибки, отбортовки и вытяжки, а также оценку возможности контактной точечной сварки (КТС) проводили на листах из алюминий-литиевого сплава 1441 толщиной 1,0 мм.

Качество сварного соединения определяли величиной, размером и расположением литой зоны, состоянием поверхности свариваемых деталей в зонах сварного шва. Все структурные исследования, в том числе сварных соединений, проводили с помощью оптического микроскопа Olympus GX 51, оснащенного цифровой камерой.

Электронно-микроскопические структурные исследования образцов из деталей с окончательной термической обработкой проводили на фольгах на просвечивающем

электронном микроскопе ТЕСНА I F20 S-TWIN, оснащенный сканирующей системой, светлопольным и темнопольными детекторами электронов.

Результаты и обсуждение

Способность литья улучшать механические, коррозионные и физические свойства сплавов известна давно. Литий является одним из легких металлов, его плотность составляет $0,53 \text{ г/см}^3$. Легирование алюминия литием наряду с повышением механических свойств повышает его коррозионную стойкость и снижает плотность сплава, что ведет к повышению весовой эффективности конструкции [10, 11].

Разработанный во ФГУП «ВИАМ» ресурсный среднепрочный сплав 1441 на базе четверной системы Al–Cu–Mg–Li с дополнительным легированием Zr и Ti обладает определенными преимуществами по сопротивлению усталости и трещиностойкости перед распространенными традиционными ресурсными сплавами Д16ч.-Т и 1163-Т системы Al–Cu–Mg, широко применяемыми в качестве обшивочного материала панелей крыла и фюзеляжа [12]. Полуфабрикаты из сплава 1441 характеризуются повышенной коррозионной стойкостью и высокими адгезионными свойствами как для гальванических, так и лакокрасочных покрытий [13].

Технологические возможности сплава 1441 позволяют получать на промышленном оборудовании ОАО «КУМЗ» разные виды полуфабрикатов с характеристиками в соответствии с требованиями нормативной документации. Технологические особенности сплава 1441 позволяют изготавливать листы методом холодной рулонной прокатки без промежуточных отжигов толщиной до 0,3–0,5 мм, что расширяет их использование в слоистых конструкциях [14].

Листы из сплава 1441 рекомендуется применять в искусственно-состаренных состояниях T1 и T11. Применение для тонких листов двухступенчатого режима старения с более высокой второй ступенью нагрева позволяет совмещать технологический процесс полимеризации стеклопрепрегов с формообразованием металлических слоев при изготовлении деталей из слоистых материалов класса СИАЛ, в том числе и автоклавным методом.

Имеется положительный опыт применения листов и профилей из сплава 1441 в конструкции планера самолетов Бе-200 и Бе-103. Использование полуфабрикатов из сплава 1441 в реальных конструкциях позволило достичь весовой эффективности ~10%.

Для расширения применения алюминий-литиевого сплава 1441 и его внедрения в модернизированные и новые модификации авиационных изделий возникла необходимость дополнительной оценки технологической пластичности полуфабрикатов для изготовления деталей формообразованием в производственных условиях при операциях листовой штамповки, гибки, отбортовки и вытяжки, а также отработки режимов контактной сварки.

В условиях самолетостроительного предприятия ПАО «ВАСО» изготовлены детали из листов сплава 1441 толщиной 1,0 мм применительно к авиационным конструкциям (рис. 1). Схематично процесс изготовления деталей из листов методом инструментального формообразования представлен на рис. 2.

Отработку технологических процессов изготовления деталей с учетом степеней деформации провели на листовых заготовках в разных исходных состояниях термообработки: отожженном, свежезакаленном и естественно-состаренном. Для обеспечения соответствия характеристик материала требованиям нормативной документации все изготовленные детали термообработаны до состояния T1.



Рис. 1. Детали из листов алюминий-литиевого сплава 1441 толщиной 1,0 мм

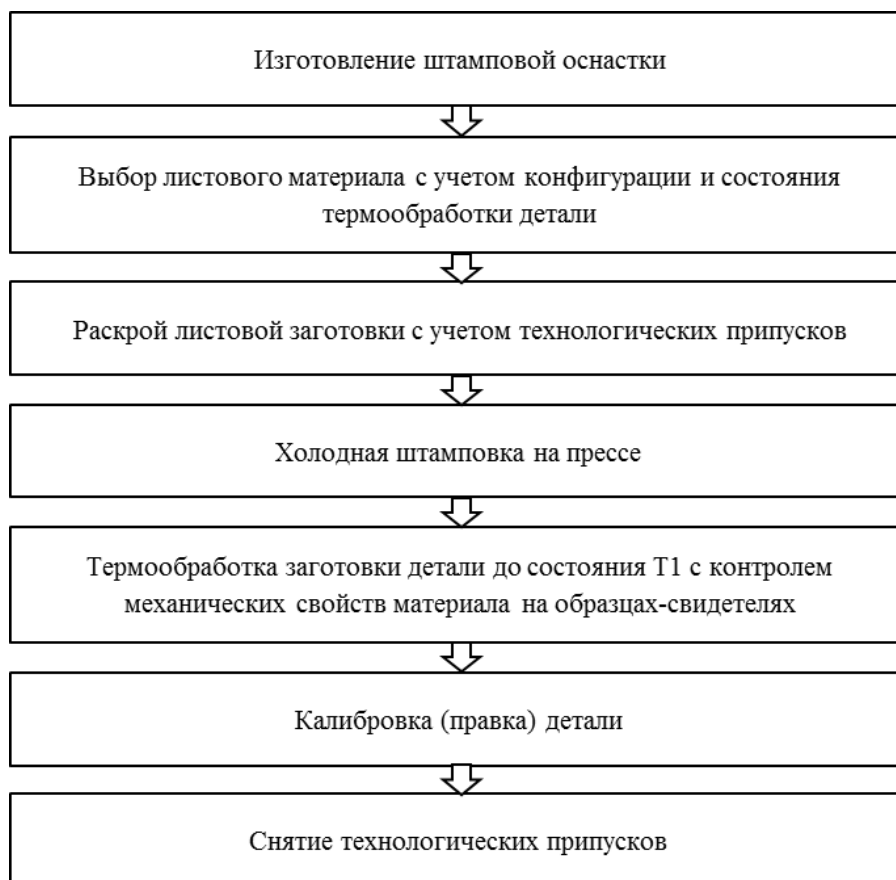


Рис. 2. Схема процесса формообразования деталей из листов холодной штамповкой

Для оценки структуры термообработанного материала методами просвечивающей электронной и оптической микроскопии проведены исследования фазового состава и структуры образцов, вырезанных из готовых деталей сплава 1441. Показано, что в оптическом микроскопе структура листов сплава 1441 в состоянии Т1 преимущественно рекристаллизованная (рис. 3), с довольно однородным зерном размером $d_{\text{ср}} \approx 15\text{--}25$ мкм.

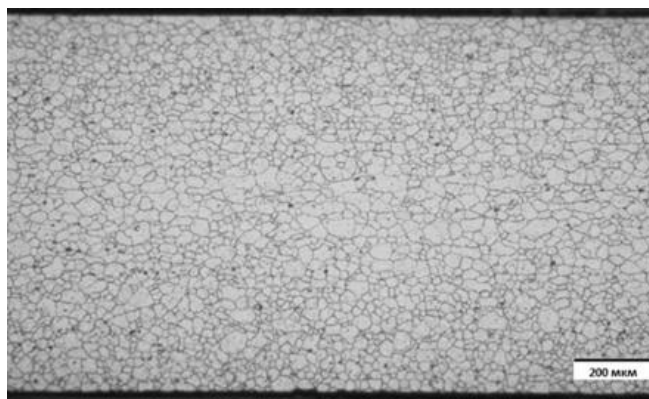


Рис. 3. Структура листа из сплава 1441-Т1 толщиной 1,0 мм, полученная с помощью оптического микроскопа (продольное направление, травление в концентрированной HNO_3)

Методом просвечивающей электронной микроскопии помимо рекристаллизованных зерен, высокоугловые границы которых образуют равновесные стыки, обнаруживаются отдельные участки нерекристаллизованной субзеренной структуры (рис. 4).

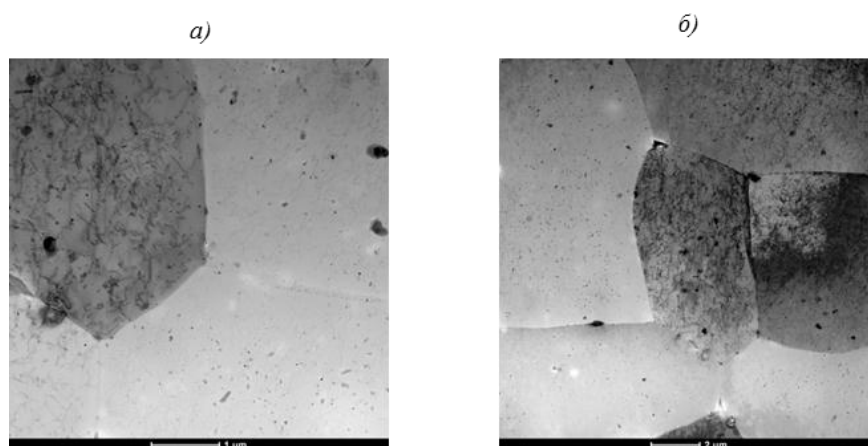


Рис. 4. Структура листов из сплава 1441-Т1:
a – зеренная структура; *б* – участки субзеренной структуры

Как и для большинства алюминий-литиевых сплавов, основными упрочняющими фазами сплава 1441 являются δ' - (Al_3Li) и S' -фазы (Al_2CuMg) [15–19]. Распад твердого раствора в сплаве 1441 в состоянии Т1 приводит к образованию выделений δ' -фазы сферической формы, распределенных в объеме зерен с высокой плотностью (рис. 5, *a*); S' -фаза наблюдается в виде конгломератов из вытянутых реек различной кристаллографической ориентировки (рис. 5, *б*).

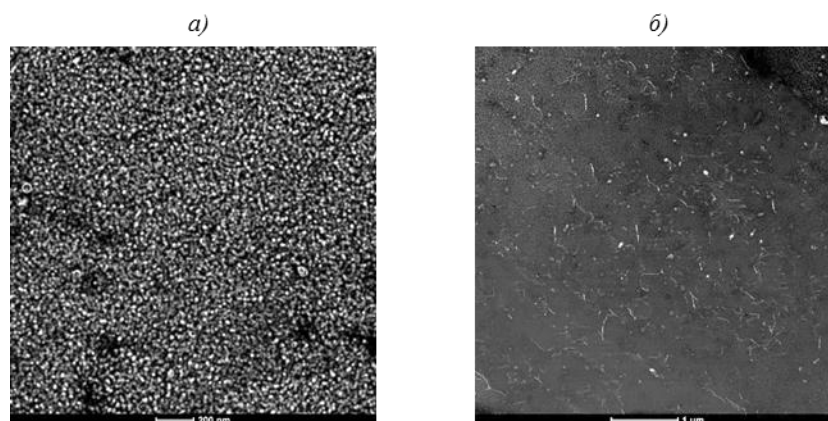


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения в листах из сплава 1441-T1 выделений δ' - (а) и S' -фаз (б)

Основные характеристики образцов из деталей сплава 1441-T1 приведены в таблице.

Свойства образцов из деталей сплава 1441-T1

Свойства	Значения свойств
σ_B , МПа	440–460
$\sigma_{0,2}$, МПа	340–365
δ_5 , %	8,0–8,5
d , г/см ³	2,59
E , ГПа	79
СРТУ: dl/dN , мм/кцикл (при $\Delta K=31,0$ МПа $\sqrt{м}$)	1,4–1,5
МЦУ: N_{cp} , кцикл ($f=5$ Гц, $\sigma_{max}=157$ МПа)	180–210

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что стабильность структуры и механических характеристик целиком зависит от выбранных режимов термообработки, и оптимизировать подбор состояния исходного материала для проведения технологических процессов формообразования деталей в зависимости от их конфигурации.

Дополнительным преимуществом полуфабрикатов из сплава 1441 является возможность применения контактной сварки при производстве деталей, что позволяет оптимизировать конструктивно-технологические решения при проектировании конструкций.

Сварку деталей рекомендуется проводить только в окончательном состоянии термообработки. Перед сваркой проводили подготовку поверхности деталей. Качество сварных швов проверяли с помощью рентгеновского контроля и металлографического анализа. Анализ макроструктуры сварных соединений показал, что литое ядро сварных точек имеет правильную круглую форму в плоскости контакта и равномерный провар в обе детали. В сварных точках отсутствуют дефекты типа трещин и рыхлот (рис. 6). Глубина проплавления составляет ~30%, а глубина вмятины от электродов не превышает 15% от толщины свариваемых листов. Диаметр литого ядра составляет от 5,0 до 6,5 мм. Проведенные механические испытания сварных соединений на срез показали, что $\tau_{cp}=340\text{--}370$ МПа.



Рис. 6. Вид сварного соединения ($\times 8$) алюминий-литиевого сплава 1441-T1 (листы толщиной 1,0 мм)

Ведутся также работы по отработке технологии изготовления методом автоклавного формообразования крупногабаритных конструктивных элементов: обшивок фюзеляжа из листов сплава 1441 и обшивок панелей крыла самолета из плит сплава 1441, а также гибридных материалов с применением алюминий-литиевых листов и стеклопластиков. Сущность метода состоит в совмещении процессов формообразования деталей и их старения (достаривания) до состояния T1 с использованием технологической оснастки.

Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния заготовок. В результате получены значения остаточных напряжений и пружинения заготовок после снятия деформирующей нагрузки, определена геометрическая форма рабочего контура технологических матриц. Разработаны чертежи и изготовлены технологические матрицы из жаропрочного алюминиевого сплава АК4-1. Формообразование заготовок из плит и листов проведено в автоклаве по специально разработанным температурно-временным режимам с регламентированной подачей давления и выдержкой в течение 5–30 ч в зависимости от толщины конечного изделия.

Схематично процесс изготовления деталей из листов, плит и гибридного материала автоклавным методом представлен на рис. 7. Листы и плиты предварительно подвергают механической обработке в соответствии с требованиями чертежа.

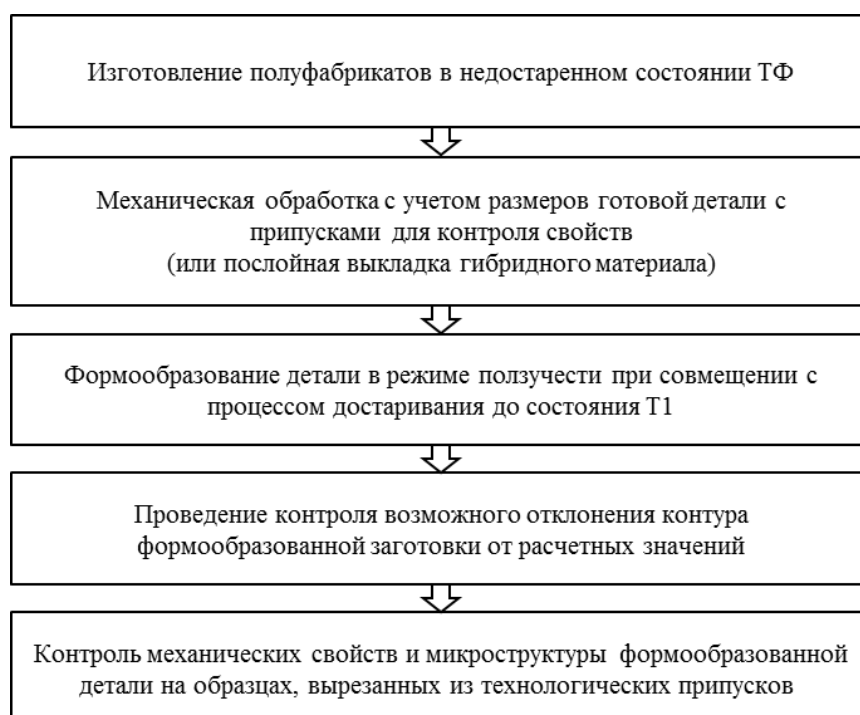


Рис. 7. Схема процесса изготовления деталей автоклавным методом

Полученные механические свойства готовых деталей должны удовлетворять требованиям нормативной документации на данный материал (плиты и листы из сплава 1441 в искусственно-состаренном состоянии T1).

Разрабатываются отечественные алюмокомпозиты класса СИАЛ, представляющие собой слоистые композиционные материалы с использованием листов толщиной 0,3–2,0 мм из алюминий-литиевого сплава 1441 и полимерных слоев. Гибридные слоистые материалы обеспечивают повышенные характеристики трещиностойкости и весовую эффективность конструкций из листовых полуфабрикатов [20–23]. Примеры экспериментальных структур гибридного материала применительно к обшивкам фюзеляжа и панелей крыла представлены на рис. 8.

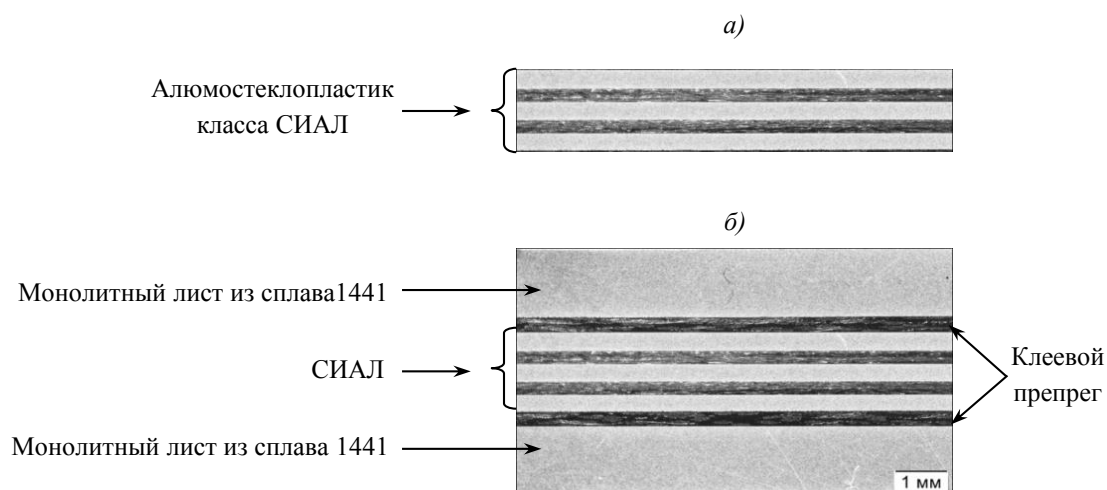


Рис. 8. Схемы слоистого гибридного материала применительно к обшивкам фюзеляжа (а) и панелей крыла (б)

Схемы процессов изготовления деталей на рис. 2 и 7 отличаются последовательностью формообразования и термической обработкой. На рис. 2 дана последовательность формообразования детали в состояниях с повышенными пластическими свойствами (отожженное, свежезакаленное) с последующими термообработками заготовки детали и ее калибровкой до геометрической формы по чертежу. На рис. 7 показан процесс совмещения термической обработки с формообразованием, который отличается тем, что при проектировании оснастки необходимо учитывать степень остаточной деформации для получения требуемой геометрической формы детали, а температурные режимы должны обеспечивать получение требуемых свойств конечной детали, в случае изготовления гибридных слоистых конструкций – возможность достичь окончательной полимеризации слоев стеклопластика.

Заключения

1. Технологическая пластичность полуфабрикатов из сплава 1441 в отожженном, свежезакаленном и естественно-состаренных состояниях при изготовлении деталей формообразованием при операциях листовой штамповки, гибки, отбортовки и вытяжки позволяет изготавливать детали планера самолета.

2. Дополнительным преимуществом полуфабрикатов из сплава 1441 является возможность применения контактной сварки (с уровнем напряжений среза 340–370 МПа) при производстве деталей, что позволяет оптимизировать конструктивно-технологические решения при проектировании конструкций.

3. Детали из алюминий-литиевого сплава 1441-Г1 обладают высоким модулем упругости ($E=79$ ГПа), пониженной плотностью ($d=2,59$ г/см³), хорошими прочностными свойствами ($\sigma_B=440-460$ МПа, $\sigma_{0,2}=340-365$ МПа, $\delta_5=8,0-8,5\%$), имеют повышенные трещиностойкость ($dl/dN=1,4-1,5$ мм/цикл при $\Delta K=31,0$ МПа $\sqrt{м}$) и малоцикловую усталость ($N_{cp}=180-210$ цикл при $f=5$ Гц, $\sigma_{max}=157$ МПа).

4. Применение полуфабрикатов из алюминий-литиевого сплава 1441 и слоистых алюмополимерных материалов класса СИАЛ для изготовления деталей авиационных конструкций взамен традиционных алюминиевых сплавов Д16 и 1163 позволит снизить массу конструкций до 10% за счет пониженной плотности, повышенной удельной прочности и жесткости.

5. Продолжаются работы по изучению автоклавного формообразования элементов и деталей из листов и плит из алюминий-литиевого сплава 1441 и гибридного материала с использованием тонких листов и клеевых препрегов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука, 2005. 275 с.
2. Фридляндер И.Н., Колобнев Н.И., Сандлер В.С. Алюминиево-литиевые сплавы. Машиностроение: энциклопедия в 40 т. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова, О.Г. Сенаторовой, Р.Е. Шалина. С. 156–184.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А. Высокопрочные сплавы. Машиностроение: энциклопедия в 40 т. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова, О.Г. Сенаторовой, Р.Е. Шалина. С. 94–128.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
6. Сенаторова О.Г. Алюминий пока сохраняет лидерство // Индустрия. Инженерная газета. 2005. №29. С. 2.
7. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8 (884). С. 86–91.
8. International Alloy Designations and Chemical Compositions Limits for Wrought Aluminum Alloys. Aluminum Associations, USA. 2015. 32 p.
9. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности // Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 47–52.
10. Лещинер Л.Н., Кишкина С.И., Старова Е.Н., Федоренко Т.П., Булгакова Е.Н. Свойства неплакированных и плакированных листов из сплава 1441 // Цветные металлы. 1994. №4. С. 56–59.
11. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Шамрай В.Ф., Ключков Г.Г. Высокопрочный конструкционный Al–Cu–Li–Mg сплав пониженной плотности, легированный серебром // Металлургия. 2007. №6 (624). С. 3–7.
12. Лещинер Л.Н., Латушкина Л.В., Федоренко Т.П. Сплав 1441 системы Al–Cu–Mg–Li // Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. «Металловедение сплавов алюминия с литием». М.: ВИЛС, 1991. С. 76–77.
13. Антипов В.В. Технологичный алюминий-литиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе // Металлургия. 2012. №5. С. 36–39.

14. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И. Структура и свойства конструкционных алюмокомпозитов марки СИАЛ // Сб. тр. Междунар. конф. «Слоистые композиционные материалы–98». Волгоград, 1998. С. 131–133.
15. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Хохлатова Л.Б. и др. Фазовые превращения в процессе длительных температурных нагревов для промышленных сплавов 1224, В-1469 и 1441 // Физика металлов и металловедение. 2011. №3. С. 253–261.
16. Lukina E.A., Alekseev A.A., Zaitsev D.V. et al. Application of the Diagrams of Phase Transformations during Aging for Optimizing the Aging Conditions for V-1469 and 1441 Al–Li Alloys // The 12-th International Conference of Aluminium Alloys: Proceedings of the Conference. Yokohama, 2010. P. 1984–1989.
17. Alekseev A.A., Lukina E.A., Khokhlatova L.B. et al. Phase Transformations in Alloy 1424 (Al–Li–Mg) and 1441 (Al–Li–Cu–Mg) // During Long Term Low-Temperature Exposure (LLTE): Proceedings of ICAA-11. 2008. P. 1001–1005.
18. Лукина Е.А. Фазовые превращения в Al–Li сплавах при старении и в процессе длительных низкотемпературных нагревов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2011. 23 с.
19. Ключкова Ю.Ю. Формирование структуры и свойств холоднокатаных листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2014. 148 с.
20. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю. и др. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. 2016. №10. С. 5–19.
21. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
22. Слоистый алюмокомпозит и изделие, выполненное из него: пат. 2600765 Рос. Федерация; опубл. 10.06.15.
23. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В., Сидельников В.В. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224.