



На правах рукописи

АНТИПОВ ВЛАДИСЛАВ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ
СЛОИСТЫХ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
С ВАРЬИРУЕМЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ
НА ОСНОВЕ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ
ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Самара – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственном научном центре Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ).

Официальные Ковалев Игорь Евгеньевич

оппоненты: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»). Начальник Научно-исследовательского комплекса ЦАГИ. Доктор технических наук, профессор.

Баурова Наталья Ивановна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ). Профессор кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин», декан факультета «Дорожные и технологические машины». Доктор технических наук, профессор.

Можаровский Сергей Михайлович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН). Ведущий научный сотрудник. Доктор технических наук.

Ведущая

организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет» («Московский Политех»).

Защита состоится «14» мая 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.122.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <http://d99912202.samgtu.ru>.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения принять участие в заседании диссертационного совета или прислать свой отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из ключевых направлений совершенствования авиационной техники является применение материалов с пониженной плотностью и улучшенными служебными характеристиками. В настоящее время большой интерес представляют алюминиевые сплавы, легированные литием, каждый % (по массе) которого снижает плотность сплава в среднем на 3 % и увеличивает модуль упругости приблизительно на 5 %. В России разработаны и освоены в серийном производстве алюминий-литиевые сплавы 1420, 1424, 1441, В-1469 и др., большинство из которых нашли применение в конструкциях самолетов ТАНТК им. Г.М. Бериева, ОКБ им. А.С. Яковлева, ПАО «Компания «Сухой», ПАО «Туполев», «РСК «МиГ», АНТК «Антонов». Аналогичные сплавы с литием марок 8090, 2094, 2095, 2195, 2099, 2050 разработаны зарубежными компаниями.

В последние годы для дополнительного снижения массы и повышения ресурсных характеристик авиационных конструкций ведутся работы по созданию слоистых металлополимерных композиционных материалов (МПКМ) с пониженной плотностью, которые сочетают в себе свойства листов из алюминиевых сплавов и полимерных составляющих, армированных высокопрочными высокомодульными волокнами (арамидными, углеродными, стеклянными).

Разработанные российские и зарубежные МПКМ, состоящие из чередующихся листов из алюминиевых сплавов и стеклопластика (АЛОП и ARALL – с арамидными волокнами, АЛКАР и CARALL – с углеродными волокнами, СИАЛ и GLARE – со стеклянными волокнами), позволяют получить композиции, которые обладают пониженной плотностью и скоростью развития усталостных трещин, повышенной прочностью по сравнению с листами из алюминиевых сплавов.

По комплексу свойств наиболее перспективными среди МПКМ являются слоистые алюмостеклопластики СИАЛ, позволяющие обеспечить высокую весовую эффективность, повышенные характеристики трещиностойкости и безопасности при эксплуатации, в сочетании с более низкой стоимостью и повышенной технологичностью при изготовлении, отвечающие необходимым конструктивно-технологическим требованиям при применении их в изделиях авиационной техники.

За рубежом также большое внимание уделяется созданию, исследованию и применению слоистых материалов GLARE, в которых используются листы из традиционных алюминиевых сплавов 2024, 7075 (аналоги российских сплавов Д16 и В95) и слои стеклопластика. Компания «Airbus» использует материалы GLARE для обшивок и соединительных лент отсеков фюзеляжа самолета А-380.

Для дополнительного снижения массы авиационных конструкций предложено использовать в качестве металлических слоев в составе слоистого алюмостеклопластика СИАЛ листов из алюминий-литиевых

сплавов пониженной плотности взамен листов из традиционных алюминиевых сплавов Д16, 1163 и В95.

Разработка слоистых алюмокомпозитов СИАЛ, сочетающих в себе технологические и механические характеристики листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 и стеклопластика, позволит получить материалы, превосходящие по прочностным, ресурсным и коррозионным характеристикам как монолитные материалы, используемые в авиационной технике, так и слоистые материалы на основе традиционных алюминиевых сплавов.

Выявленные на предварительных стадиях исследований преимущества алюмокомпозитов подтверждают их важное практическое значение для развития российского авиастроения. В связи с этим требуется разработка научно-технологических основ создания слоистых алюмокомпозитов нового поколения на основе алюминий-литиевых сплавов, что и определяет актуальность данной работы.

Целью работы является разработка научно-технологических основ получения и создание слоистых алюмокомпозитов нового поколения с улучшенными физико-механическими свойствами на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности для авиационной техники.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- оптимизация структурно-фазового состояния алюминий-литиевого сплава 1441 с массовыми соотношениями основных легирующих элементов: $Cu/Li \approx 1$ (0,8–1,1); $Mg/Li \approx 0,5$ (0,35–0,6) при суммарном легировании этими элементами 4,1–5,0 % (по массе) путем варьирования температурно-временных параметров режимов гомогенизирующего отжига слитков и искусственного старения листов;

- разработка режима гомогенизации, обеспечивающего повышение технологической пластичности слитков для изготовления тонких листов из сплава 1441;

- исследование влияния технологических параметров изготовления на механические и коррозионные свойства листов из алюминий-литиевого сплава 1441;

- разработка режимов изготовления листов толщиной 0,25 мм из алюминий-литиевого сплава 1441, параметров многоступенчатой упрочняющей термической обработки и подготовки поверхности листов для их применения в слоистых алюмокомпозитах;

- разработка слоистых алюмокомпозитов на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и исследование влияния их строения на плотность, характеристики прочности, трещиностойкости, технологичности, огнестойкости и молниестойкости;

- разработка математической модели расчета механических характеристик слоистых алюмокомпозитов;

- повышение служебных характеристик слоистых алюмопестклопластиков за счет применения высокопрочного клееного связующего с улучшенными адгезионными характеристиками;
- исследование изменения свойств алюмопестклопластиков после испытаний в натуральных климатических условиях;
- разработка технологических режимов изготовления конструктивно-подобных образцов на основе алюмопестклопластиков;
- проведение испытаний и сравнительного анализа прочностных и ресурсных характеристик конструктивно-подобных образцов из традиционных алюминиевых сплавов и слоистых металлополимерных материалов;
- разработка методики испытаний и определение огнестойкости и огнестойкости слоистых алюмопестклопластиков;
- разработка нормативной документации применительно к слоистым алюмопестклопластикам нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности.

Научная новизна

1. Разработаны научно-технологические основы получения и созданы слоистые алюмопестклопластики СИАЛ нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и клееных препрегов с ровингом, обладающие пониженной на 8–10 % плотностью, повышенными на 9–11 % модулем упругости, на 12–16 % удельной прочностью и рабочей температурой до 120 °С по сравнению с алюмопестклопластиками на основе листов из дуралюминов.

2. Установлены особенности формирования структурно-фазового состояния в слитках и листах из алюминий-литиевого сплава 1441 в зависимости от режимов термической обработки, определены оптимальные технологические параметры, обеспечивающие получение методом холодной рулонной прокатки тонких листов толщиной 0,25 мм с требуемым для применения в СИАЛ уровнем механических и коррозионных свойств.

3. Показано, что при плотности распределения сферических композиционных частиц дисперсоидов (β' -фаза с оболочкой из δ' -фазы) не более $6,0 \cdot 10^{10}$ 1/мм³ при минимальном (менее 1 %) содержании первичных эвтектических фаз в слитке, достигаемых после двухступенчатой гомогенизации в интервале температур 400–530 °С, обеспечивается максимальная пластичность и низкое сопротивление деформации слитков из сплава 1441 с массовыми соотношениями основных легирующих элементов: Cu/Li \approx 1 (0,8–1,1); Mg/Li \approx 0,5 (0,35–0,6).

4. Обнаружено различие состава дисперсоида в литой и деформированной структуре сплава 1441: в гомогенизированных слитках в состав β' -фазы входят Al и Zr, а в деформированных листах – Al, Zr и Ti, причем соотношение атомов Zr:Ti в частицах может составлять от 1:1 до 3:1.

5. Установлено, что обеднение твердого раствора сплава 1441 магнием (от 0,8 до 0,22 % (по массе)) и медью (от 1,5 до 0,01 % (по массе)) за счет выделения в процессе медленного охлаждения с температуры смягчающего

отжига 420–440 °С частиц S-фазы (Al_2CuMg), преимущественно глобулярной формы со средним размером 0,5 мкм, приводит к возрастанию технологической пластичности, снижению сопротивления и повышению однородности деформации, что обеспечивает получение методом холодной рулонной прокатки листов толщиной до 0,25 мм.

6. Установлена взаимосвязь между характером распределения упрочняющих частиц S- и S'-фаз в структуре искусственно состаренных листов из сплава 1441 и их коррозионными свойствами. Снижение склонности к расслаивающей коррозии листов из сплава 1441 обусловлено формированием в процессе трехступенчатого режима старения частиц S'-фазы, закрепляющих дислокации в объеме зерен, дискретных глобулярных частиц S-фазы размером 100–300 нм на границах зерен, что способствует уменьшению электрохимической гетерогенности и снижению концентрации напряжений на границах зерен.

7. Разработана математическая модель расчета механических характеристик слоистых алюмо-стеклопластиков с учетом остаточных напряжений по границам слоев материалов с разными свойствами в структуре СИАЛ со сходимостью с экспериментальными данными 85–90 %.

8. Установлено, что огнестойкость слоистых алюмо-стеклопластиков обусловлена применением клеевого связующего ВСК-14МР и армирующего наполнителя в виде стеклоровинга в полимерных слоях алюмо-стеклопластиков, которые создают условия для возникновения абляционного эффекта за счет образования парогазовых продуктов и коксования слоев в процессе термодеструкции, что сдерживает прогорание СИАЛ при воздействии пламени с температурой 1100 °С в течение более 15 мин.

Практическая значимость

1. Разработаны и внедрены на самолетостроительном предприятии ПАО «ВАСО» технологии автоклавного формования алюмо-стеклопластиков СИАЛ нового поколения, а также гибридных конструкций с использованием СИАЛ на основе полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469.

2. Разработаны и внедрены на ОАО «КУМЗ» режим двухступенчатой гомогенизации слитков алюминий-литиевого сплава 1441, повышающий пластичность материала при изготовлении методом рулонной прокатки листов толщиной 0,25 мм, и режим упрочняющей термической обработки (трехступенчатый режим старения) для применения тонких листов в структуре алюмо-стеклопластиков.

3. Уточнен химический состав комбинированного электролита для подготовки поверхности листов из алюминий-литиевых сплавов методом анодного оксидирования, применение которого исключает использование в растворах токсичных соединений Cr^{6+} и обеспечивает повышение в 1,5 раза коррозионной стойкости и на 8–14 % адгезионных характеристик соединений листов и стеклопластиков.

4. Внедрено клеевое связующее с повышенными деформационными, теплопрочностными характеристиками и пониженной динамической вязкостью, которое обеспечивает равномерную пропитку стеклонаполнителя и позволяет исключить процесс нанесения клеевой пленки между слоями СИАЛ, применяемый при изготовлении алюмостеклопластиков за рубежом.

5. Подтверждена комплексом испытаний эффективность применения слоистых алюмостеклопластиков СИАЛ в пожароопасных зонах, что обусловлено увеличением в 10–15 раз времени прогорания конструкции при пожаре, по сравнению с листами из алюминиевых сплавов, поскольку огнестойкость СИАЛ при 1100 °С составляет не менее 15 мин, а также улучшением молниестойкости.

6. Применение разработанных СИАЛ марок СИАЛ-1-1Р, СИАЛ-3-1Р и гибридных конструкций на их основе обеспечило снижение массы на 9–15 %, а также повышение:

- трещиностойкости в 10 раз по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами;
- усталостной долговечности панели с обшивкой из СИАЛ в 2 раза по сравнению с панелью фюзеляжа из сплава 1163Т;
- несущей способности при сжатии панели с обшивкой из СИАЛ на 20 % по сравнению с панелью центроплана из сплава В95очТ2, что подтверждено испытаниями конструктивно-подобных образцов.

7. Разработана нормативная документация на изготовление, поставку, применение и конструирование деталей из слоистых алюмостеклопластиков, методики испытаний стандартных и конструктивно-подобных образцов (ТУ – 7 шт., ТР – 18 шт., ТИ – 3 шт., ММ – 1 шт., СТО – 1 шт.).

Основные направления в работе, выполненные лично автором и вынесенные на защиту

1. Разработка научно-технологических основ создания слоистых алюмостеклопластиков нового поколения с варьируемыми физико-механическими характеристиками с использованием листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 и стеклопластиков с клеевыми связующими и высокомолекулярными стеклонаполнителями.

2. Разработка технологических режимов изготовления тонких листов из сплава 1441, применяемых в составе СИАЛ, на основании результатов исследований влияния структурно-фазового состояния на механические и коррозионные свойства слитков при гомогенизации и листов при прокатке и искусственном старении.

3. Разработка математической модели расчета механических характеристик слоистых алюмостеклопластиков, учитывающей остаточные напряжения по границам слоев материалов с разными свойствами в структуре СИАЛ.

4. Разработка структур и технологии изготовления слоистых алюмостеклопластиков и гибридных конструкций методом автоклавного формования.

Личный вклад автора состоит в определении направлений исследований, обобщении и систематизации результатов экспериментальных исследований, решении задач по разработке с применением математического моделирования слоистых алюмопластиков нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности со стеклопластиками и конструктивно-подобных образцов и деталей с использованием СИАЛ.

Автором разработаны научно-технологические основы процессов получения листов толщиной 0,25 мм из алюминий-литиевого сплава 1441 и создания слоистых алюмопластиков с требуемыми физико-механическими свойствами.

Апробация результатов работы

Результаты и основные положения диссертационной работы представлены на научно-технических конференциях:

- International Conference on Aluminium Alloys ICAA-10 (2006), ICAA-11 (2008), ICAA-13 (2012);
- International Conference «Aluminium Two Thousand», Italy, 2007;
- International Conference ECAA-1, 7th World Congress, Italy, 2011;
- «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники», Москва, 2013;
- «Перспективные высокопрочные алюминиевые сплавы для изделий авиационной, ракетной и атомной техники», Москва, 2014;
- «Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов», Москва, 2015;
- «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», Москва, 2016;
- «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов», Москва, 2016;
- «Адгезионные материалы», Москва, 2016;
- «Прочность конструкций летательных аппаратов», Жуковский, 2016;
- «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России», Москва, 2017;
- «Современные достижения в области металловедения, технологий литья, деформации, термической обработки и антикоррозионной защиты легких сплавов», Москва, 2017;
- «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания клеев, клеевых связующих и клеевых препрегов», Москва, 2018;
- «Прочность конструкций летательных аппаратов», Жуковский, 2018;
- «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», Москва, 2019;
- «Климат-2019: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы», Геленджик, 2019;

- «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и антикоррозионной защиты легких сплавов», Москва, 2019;

- «Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», Москва, 2020.

Публикации

Результаты работы отражены в 51 публикации, из них 46 – в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, в том числе 10 статей, индексируемых базами Scopus и Web of Science, а также в 9 патентах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка используемых сокращений и обозначений, литературных источников из 229 наименований. Включает 327 страниц машинописного текста, 129 рисунков и 62 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи исследований и положения, выносимые на защиту, отражены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор отечественной и зарубежной литературы по конструкционным материалам, применяемым для изготовления деталей планера самолета. Проанализированы прочностные и технологические характеристики перспективных алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности, применение которых позволяет дополнительно снизить массу конструкций. Показаны свойства и структура освоенных в промышленном производстве алюминий-литиевых сплавов, в том числе ресурсного сплава 1441 и высокопрочного В-1469, в сравнении с традиционными алюминиевыми сплавами 1163 и В95оч.

Рассмотрены результаты исследований слоистых композиционных материалов с металлическими и полимерными слоями: АЛОР и АRALL – с арамидными волокнами, АЛКАР и САRALL – с углеродными волокнами, СИАЛ и GLARE – со стеклянными волокнами, которые обеспечивают повышенные весовую эффективность и служебные характеристики. Применение слоистых алюмопестклопластиков для деталей планера по сравнению с монолитными алюминиевыми материалами позволяет получить дополнительное снижение массы, повышение ресурсных характеристик, огнестойкости и коррозионной стойкости конструкций.

Показана необходимость разработки научно-технологических основ создания слоистых алюмопестклопластиков нового поколения с пониженной плотностью, повышенными прочностью, модулем упругости, характеристиками трещиностойкости.

Во второй главе приведено описание методик и объектов исследований. Исследования проводили на темплетях от плоских слитков сплава 1441, листах и прессованных профилях из сплавов 1441 и В-1469, клеевых связующих ВСК-14-2мР и ВСК-14-2м, клеевых препрегах

КМКС-2м.120.Т64.55, КМКС-2м.120.Т60.37 и КМКС-2мР.120.РВМПН.30, заготовках из слоистых алюмоплексостеклопластиков и конструктивно-подобных образцах. В главе дано описание методов проведения исследований и испытаний: дифференциальной сканирующей калориметрии, оптической и электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, методик оценки огнестойкости и огнестойкости алюмоплексостеклопластиков, определения реологических характеристик связующих, методов определения комплекса механических и коррозионных характеристик. Приведена также методика статистической обработки результатов испытаний.

Исследования проведены с использованием современного сертифицированного оборудования в соответствии с действующими стандартами и методиками Российской Федерации.

Третья глава посвящена оптимизации структурно-фазового состояния алюминий-литиевого сплава 1441, разработке режима двухступенчатого гомогенизирующего отжига слитков, технологии получения тонких листов толщиной 0,25 мм, многоступенчатого режима их упрочняющей термической обработки; исследованию влияния технологических параметров на физико-механические свойства листов из сплава 1441 для обеспечения стабильных технологических, механических и повышенных коррозионных свойств металлической составляющей слоистых алюмоплексостеклопластиков.

Разработка режима гомогенизации слитков сплава 1441. Для устранения структурной неоднородности промышленных слитков и повышения их технологической пластичности, проводят гомогенизационный отжиг (гомогенизацию) слитков.

С целью выбора температуры гомогенизации проведена оценка структурно-фазового состояния слитков в литом состоянии в интервале температур 20–600 °С методом компьютерного моделирования термодинамических процессов фазовых превращений в многокомпонентной системе Al–Li–Mg–Cu–Zr (с использованием программного комплекса Thermo-Calc) и методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) – в литом и гомогенизированном состояниях.

По результатам расчетов и исследований установлено, что максимальная растворимость легирующих элементов в твердом растворе слитков из сплава 1441 с минимальным и максимальным количеством легирующих элементов находится в интервале температур от 475 до 570 °С, при этом температура солидуса составляет от 555 до 570 °С.

В процессе гомогенизации слитков, наряду с растворением неравновесных эвтектических фаз, происходит гетерогенизация структуры за счет выделения из твердого раствора дисперсных частиц – алюминидов переходных металлов, нерастворимых при последующих нагревах под деформацию и при термической обработке. В сплаве 1441, содержащем цирконий как элемент-антирекристаллизатор, при гомогенизации происходит выделение из пересыщенного твердого раствора вторичных дисперсных частиц $\beta'(Al_3Zr)$. Размер и количество этих частиц оказывают существенное

влияние на структуру, технологические свойства и служебные характеристики листов.

На основании полученных результатов, а также с учетом имеющихся данных об эффективности двухступенчатых режимов гомогенизации для дальнейших исследований были выбраны температурно-временные параметры одноступенчатых и двухступенчатых режимов гомогенизации (таблица 1). Эффективность режима гомогенизации оценивали по изменению объемной доли эвтектических составляющих, не растворившихся после гомогенизационного отжига. В данной таблице и в последующих приведены средние значения характеристик после их статистической обработки.

Таблица 1 – Влияние режима гомогенизации на количество эвтектических фаз и дисперсоидов в слитке из сплава 1441

| Условный № режима | Режим гомогенизации | | Объемная доля эвтектических фаз (средние значения), % | Частицы β' -фазы (Al_3Zr) | |
|-------------------|--|--------------------|---|---|--|
| | температура, °С | выдержка, ч | | средний размер*, нм | плотность распределения, $1/\text{мм}^3$ |
| 1 | 400–450 | 4–8 | 3,95 | 5–10 | $0,6 \cdot 10^{10}$ |
| 2** | 500–550 | 14–20 | 1,10 | 25–32 (37) | $1,66 \cdot 10^{10}$ |
| 3 | 520–570 | 20–24 | 1,0 | 36–45 (44–50) | $12,1 \cdot 10^{10}$ |
| 4 | 1) 400–450 2) 500–550 | 4–8 ч + 14–20 ч | 0,9 | 23–30 (35) | $5,9 \cdot 10^{10}$ |
| 0 | Без гомогенизации (отжиг при 380–420 °С в течение 2 ч) | | 4,2 | - | - |

2 Примечания

* В скобках указан размер дисперсоида β' - Al_3Zr с оболочкой из фазы δ' - Al_3Li

** Серийный режим

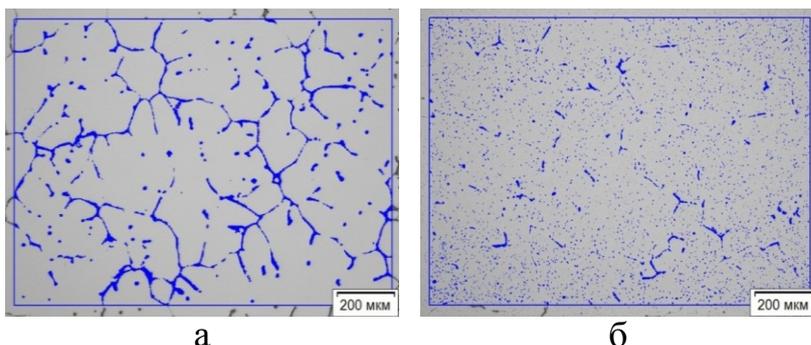


Рисунок 1 – Микроструктура слитка из сплава 1441: а – до гомогенизации; б – после гомогенизации по двухступенчатому режиму № 4 ступенчатому режиму № 4. Объемная доля избыточных фаз уменьшается с 4,2 % в негомогенизированном слитке до 0,9–1,1 % в гомогенизированных образцах.

При микрорентгеноспектральном анализе установлено, что в объеме дендритов негомогенизированного слитка из сплава 1441 наблюдаются в основном микрочастицы S-фазы (Al_2CuMg), цирконийсодержащий дисперсоид β' -фаза (Al_3Zr) не обнаружен (рисунок 2, а). По мере повышения

Из данных таблицы 1 и рисунка 1 следует, что наиболее полное растворение в слитке избыточных первичных эвтектических фаз, преимущественно расположенных в виде прослоек между ветвями дендритов, происходит при гомогенизации по режиму № 3 и двух-

температуры и продолжительности гомогенизации растет размер и увеличивается число частиц β' -фаз сферической формы (см. таблицу 1).

Характерной особенностью дисперсоидов в сплаве 1441 является их «композиционное» строение – сердцевина представляет собой β' -фазу, окруженную оболочкой из фазы δ' (см. рисунок 2, б).

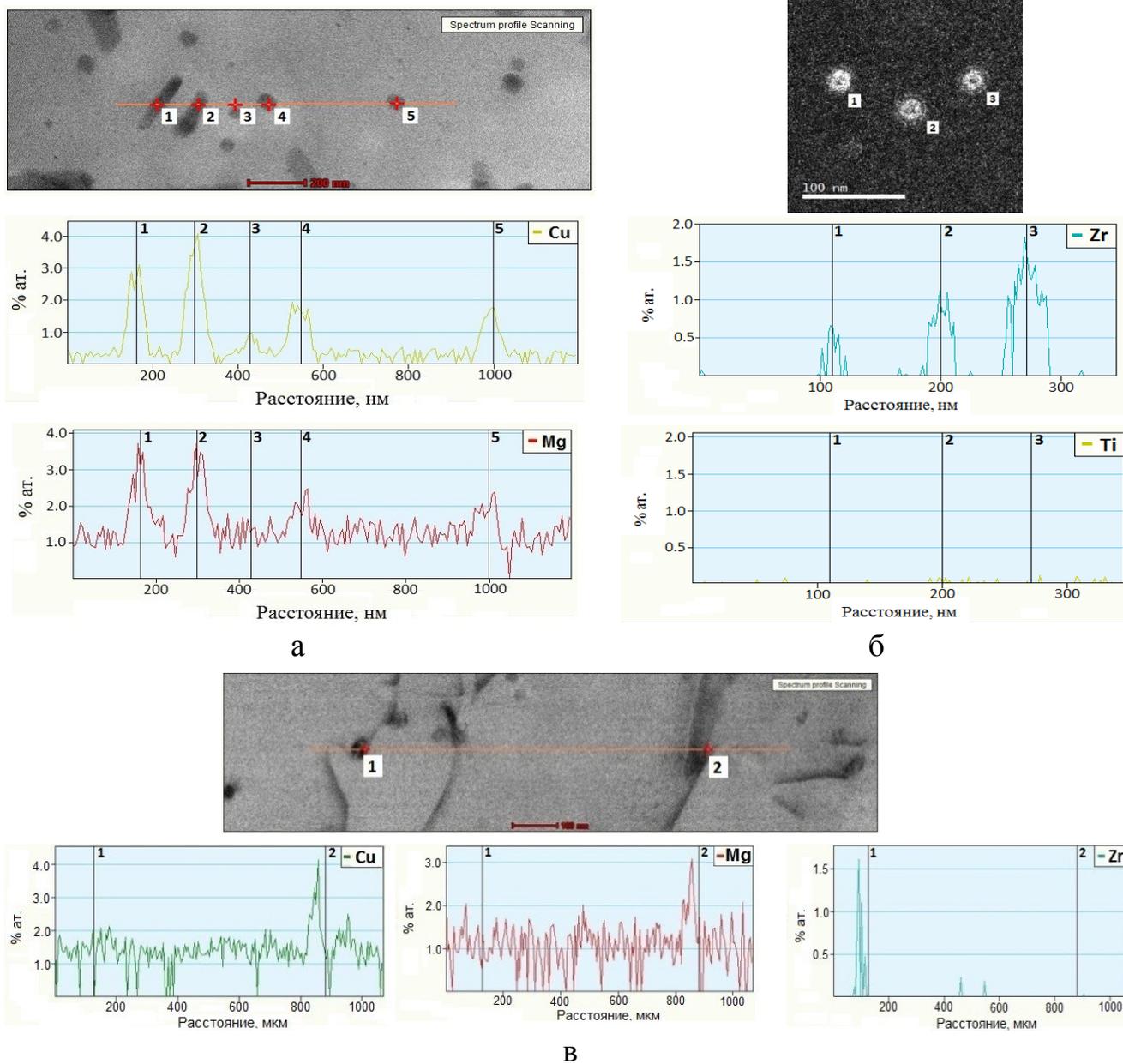


Рисунок 2 – Микроструктура слитков из сплава 1441 с профилями распределения элементов вдоль линии сканирования: а – светлопольное изображение S-фазы в негомогенизированном состоянии; б – темнопольное изображение β' -фазы (дисперсоиды) и δ' -фазы; в – светлопольное изображение частиц S' -фазы и β' -фазы после гомогенизации по двухступенчатому режиму № 4

Наиболее высокий уровень технологической пластичности слитка (относительного удлинения и сужения) в интервале температур 420–470 °С достигается после двухступенчатой гомогенизации по режиму № 4 и одноступенчатой гомогенизации по режиму № 3 (рисунок 3), имеющих наименьшую объемную долю первичных неравновесных эвтектических фаз.

Различия в структуре слитков по количеству и размеру дисперсоидов β' после гомогенизации по различным режимам (см. таблицу 1) оказали заметное влияние на пластичность и сопротивление горячей деформации слитка из сплава 1441 (в интервале температур 420–470 °С). Из данных рисунка 3, б следует, что увеличение количества дисперсоидов с $6,0 \cdot 10^{10}$ до $12,1 \cdot 10^{10}$ 1/мм³ после гомогенизации по режимам № 4 и № 3 соответственно приводит к росту на ~ (15–20) % сопротивления деформации (σ_B) и снижению пластичности (δ). Поскольку объемная доля первичных неравновесных эвтектических фаз в слитках после указанных режимов гомогенизации практически одинакова (рисунок 3, а), рост сопротивления горячей деформации и снижение пластичности слитка, гомогенизированного по режиму № 3, обусловлены увеличением количества и размера цирконийсодержащих дисперсных частиц.

Исследование влияния режима гомогенизации на механические свойства полученного в промышленных условиях горячекатаного подката (листов толщиной 6 мм) и холоднокатаного подката (листов толщиной 2,8 мм) подтвердили, что более высокую технологическую пластичность при холодной деформации имеют полуфабрикаты, полученные из слитков, гомогенизированных по двухступенчатому режиму № 4, по сравнению с одноступенчатым режимом № 3 (таблица 2).

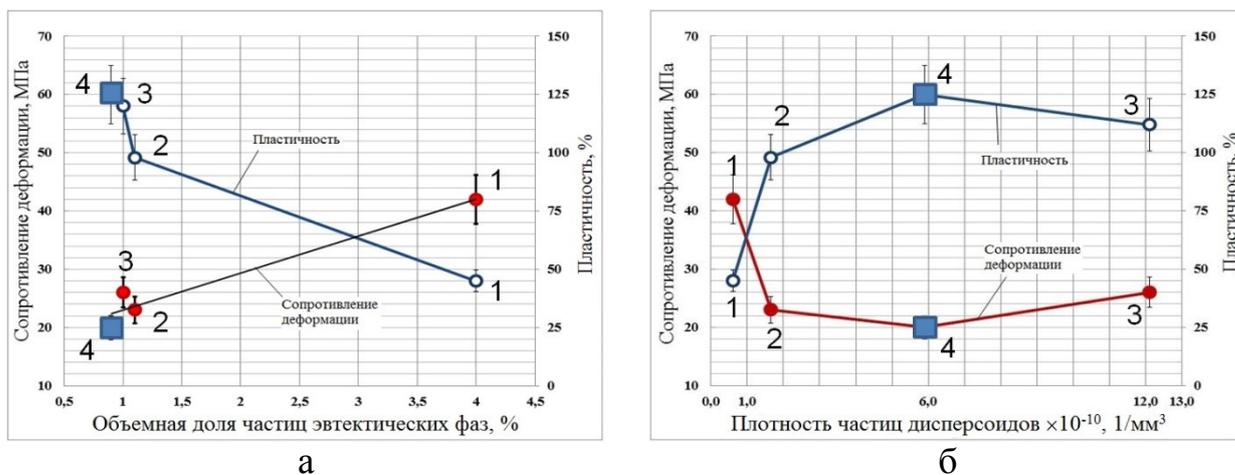


Рисунок 3 – Влияние структурных факторов (а – объемной доли частиц эвтектических фаз; б – плотности распределения частиц дисперсоидов) на сопротивление деформации и пластичность при горячей деформации при температуре 420–470 °С слитков, гомогенизированных по различным режимам (в соответствии с данными таблицы 1)

На основании полученных результатов разработан двухступенчатый режим гомогенизации: 400–450 °С, 4–8 ч + 500–550 °С, 14–20 ч, который по сравнению с одноступенчатыми режимами приводит к выделению более мелких частиц β' в виде метастабильных фаз на первой ступени гомогенизации, соответствующей температуре наименьшей устойчивости твердого раствора циркония в алюминии (350–430 °С) и способствует на второй высокотемпературной ступени ускорению процессов растворения

избыточных эвтектических фаз на границах дендритов. При этом обеспечивается повышение технологической пластичности ($\delta_5 > 120\%$) в интервале температур горячей прокатки слитков 420–470 °С, а также при холодной прокатке листов, за счет формирования структурно-фазового состояния слитка с плотностью распределения сферических композиционных частиц дисперсоидов не более $6,0 \cdot 10^{10}$ 1/мм³ при содержании первичных эвтектических фаз в слитке менее 1 %.

Таблица 2 – Влияние режима гомогенизации на механические свойства при комнатной температуре горяче- и холоднокатаных заготовок (подката) для холодной прокатки тонких листов из сплава 1441

| Режим гомогенизации | № листа | Толщина заготовок, мм | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ_5 , % |
|---|---------|-----------------------|------------------|----------------------|----------------|
| Режим № 4: 400–450 °С, 4–8 ч+ 500–550 °С, 14–20 ч | 1 | 6 | 255 | 155 | 19 |
| | 2 | 2,8* | 225 | 155 | 18 |
| Режим № 3: 520–570 °С, 20–24 ч | 3 | 6 | 265 | 170 | 16 |
| | 4 | 2,8* | 245 | 190 | 16 |

Примечание - Заготовки толщиной 2,8 мм испытаны после смягчающего отжига

Прокатку гомогенизированных слитков сечением 300×1100 мм из сплава 1441, отлитых в производственных условиях ОАО «КУМЗ», проводили по схеме обжатый, принятой для сплава Д16. С целью восстановления пластичности листов из сплава 1441, нагартованных в процессе холодной

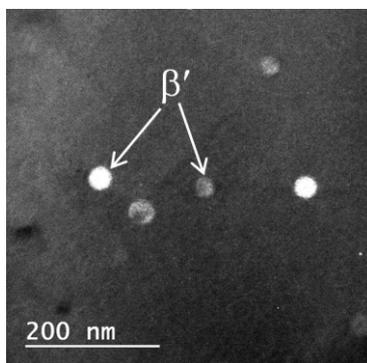
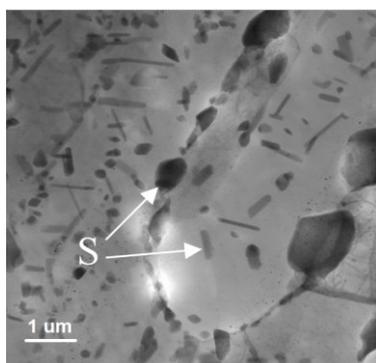


Рисунок 4 – Электронно-микроскопическое изображение структуры холоднокатаного листа толщиной 1,1 мм из сплава 1441 после промежуточного отжига с выделением частиц S- (а) и β'-фаз (б)

(рисунок 4), что сопровождается снижением концентрации меди и магния в алюминиевом твердом растворе.

Отсутствие в исследуемой структуре частиц δ'-фазы и других литийсодержащих фаз (T_1 , T_2) свидетельствует о растворении лития в обедненном медью и магнием твердом растворе алюминия, что также способствует повышению однородности деформации и пластичности листов при холодной прокатке.

прокатки, применяли смягчающий отжиг на толщинах 2,8 и 1,1 мм по режиму 420–440 °С, 1 ч. Повышение пластичности листового подката в результате отжига обусловлено не только изменением дислокационной структуры, но и формированием относительно крупных, особенно на границах зерен, частиц S-фазы (Al_2CuMg) протяженностью до 0,5 мкм

Разработка режима упрочняющей термической обработки листов из сплава 1441. Комплекс свойств полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов чувствителен к составу, количеству и размерам частиц упрочняющих фаз, характеру их распределения в объеме зерен, существенно зависящему от режимов термической обработки. С целью исследования влияния ступенчатых режимов старения на структуру, механические и коррозионные свойства, листы, закаленные ($T=535\text{ }^{\circ}\text{C}$) и правленные со степенью остаточной деформации $\sim 1,0\%$ в промышленных условиях, были состарены по различным режимам (таблица 3), в том числе по серийным – T1 и T11, которые не всегда обеспечивают для тонких листов требуемую стабильность свойств.

Основными упрочняющими фазами в состаренных листах из сплава 1441 являются фазы δ' (Al_3Li) и S' (Al_2CuMg) (рисунок 5).

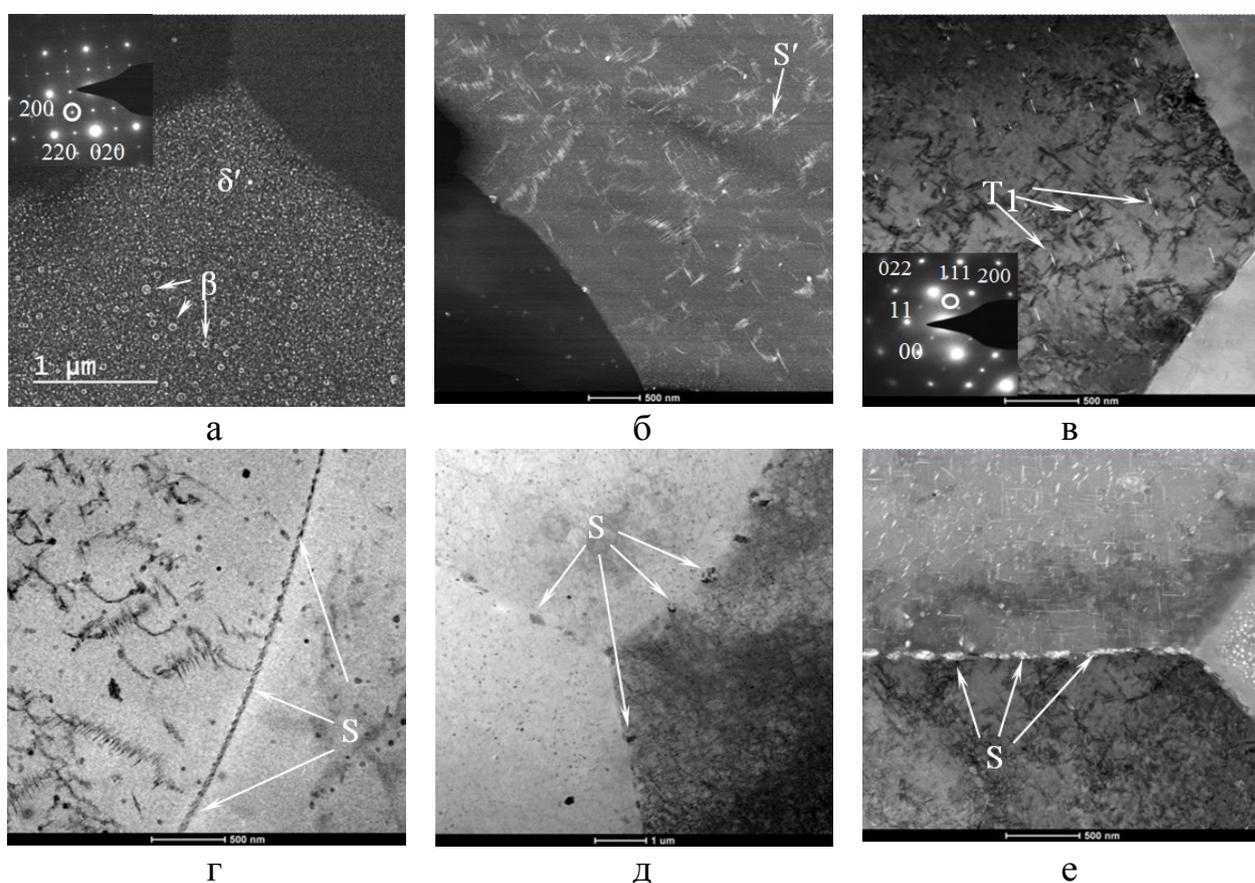


Рисунок 5 – Типичный вид темнопольных (а–в) и светлопольных (г–е) изображений выделений фаз в листах толщиной 0,25 мм из сплава 1441 после различных режимов старения в соответствии с данными таблицы 3:
 а – δ' и β' (режимы 1, 5–8); б – S' на дислокациях (режимы 2–5, 12);
 в – T1 (режимы 8, 10, 12); г – S (режим 5); д – S (режимы 7, 9–11);
 е – S (режим 8)

Таблица 3 – Механические и коррозионные свойства листов толщиной 0,25 мм из сплава 1441 после различных режимов старения

| Условный № режима | Режим старения | Механические свойства | | | РСК, балл |
|-------------------|--|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|-----------|
| | | Характеристика | Среднее значение* | Среднее квадратическое отклонение s | |
| 1 | Естественное старение (Т) | σ_B , МПа | 370 | 4,08 | 3 / 4 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 255 | 4,08 | |
| | | δ , % | 12,0 | 0,50 | |
| 2 | 150 °С, 30 ч (Т1) | σ_B , МПа | 435 | 5,99 | 5 / 6 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 315 | 1,58 | |
| | | δ , % | 13,0 | 0,55 | |
| 3 | 170 °С, 30 ч | σ_B , МПа | 405 | 4,71 | 2 / 3 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 300 | 3,16 | |
| | | δ , % | 13,0 | 0,21 | |
| 4 | 200 °С, 10 ч | σ_B , МПа | 415 | 5,99 | 4 / 4 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 320 | 1,58 | |
| | | δ , % | 10,0 | 0,48 | |
| 5 | 150 °С, 4 ч + 170 °С, 30 ч (Т11) | σ_B , МПа | 435 | 5,99 | 7 / 8 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 325 | 7,25 | |
| | | δ , % | 11,0 | 0,88 | |
| 6 | 150 °С, 4 ч + 200 °С, 15 ч | σ_B , МПа | 400 | 4,97 | 3 / 3 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 325 | 6,67 | |
| | | δ , % | 9,0 | 0,75 | |
| 7 | 150 °С, 15 ч + 200 °С, 15 ч | σ_B , МПа | 395 | 5,99 | 3 / 2 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 335 | 3,69 | |
| | | δ , % | 8,0 | 1,30 | |
| 8 | 170 °С, 20 ч + 200 °С, 10 ч | σ_B , МПа | 425 | 5,99 | 5 / 6 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 335 | 7,25 | |
| | | δ , % | 9,0 | 0,32 | |
| 9 | 200 °С, 15 ч + 150 °С, 15 ч | σ_B , МПа | 445 | 2,11 | 3 / 3 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 380 | 6,85 | |
| | | δ , % | 7,0 | 0,41 | |
| 10 | 200 °С, 10 ч + 170 °С, 8 ч | σ_B , МПа | 400 | 10,27 | 3 / 3 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 330 | 12,25 | |
| | | δ , % | 9,0 | 0,67 | |
| 11 | Интервал температур $T=150-200$ °С ($T_I > T_{II} < T_{III}$), суммарное время $\tau=25-30$ ч ($\tau_I < \tau_{II} > \tau_{III}$) | σ_B , МПа | 425 | 6,43 | 3 / 2 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 325 | 2,11 | |
| | | δ , % | 12,0 | 2,39 | |
| 12 | Интервал температур $T=150-200$ °С ($T_I > T_{II} < T_{III}$), суммарное время $\tau=35-40$ ч ($\tau_I < \tau_{II} > \tau_{III}$) | σ_B , МПа | 425 | 4,97 | 3 / 3 |
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | 345 | 7,45 | |
| | | δ , % | 9,0 | 0,41 | |

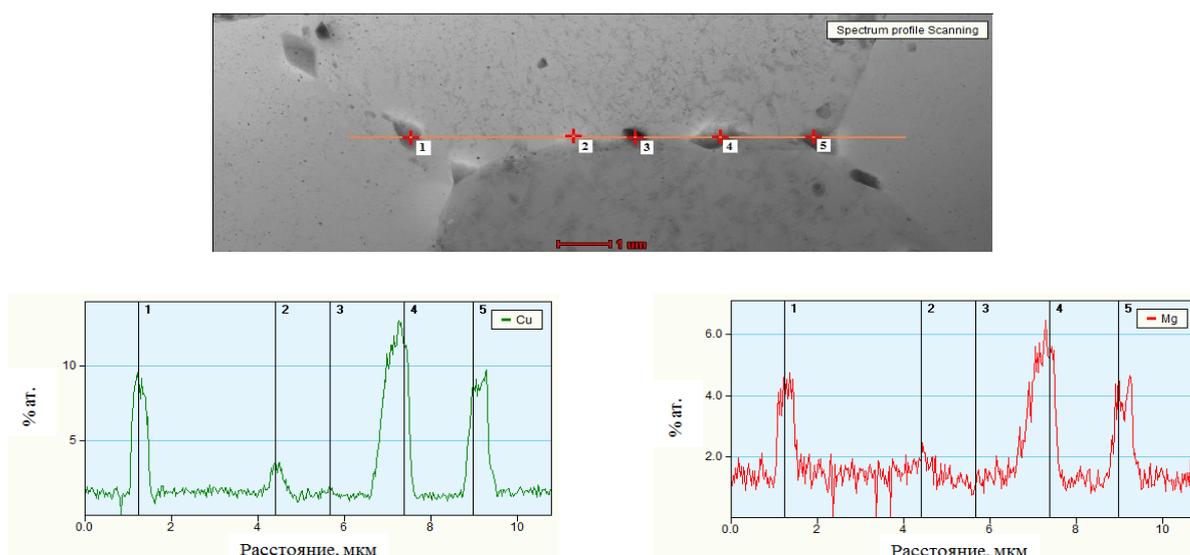
Примечание – Среднее значение определено по результатам испытаний десяти образцов на точку

Трехступенчатые режимы старения № 11 и № 12 обеспечивают выделение S'-фазы, закрепляющей дислокации в объеме зерна, снимая локальную концентрацию напряжений с границ, и образование дискретных глобулярных частиц S-фазы со средним размером 100–300 нм на границах зерен (рисунок 5, д и 6, а). Это способствует уменьшению электрохимической гетерогенности, снижению концентрации напряжений на границах зерен и, следовательно, повышению стойкости к расслаивающей коррозии. Наличие непрерывных цепочек частиц S-фазы на границах (рисунок 5, г, е) вызывает повышенную склонность листов к расслаивающей коррозии.

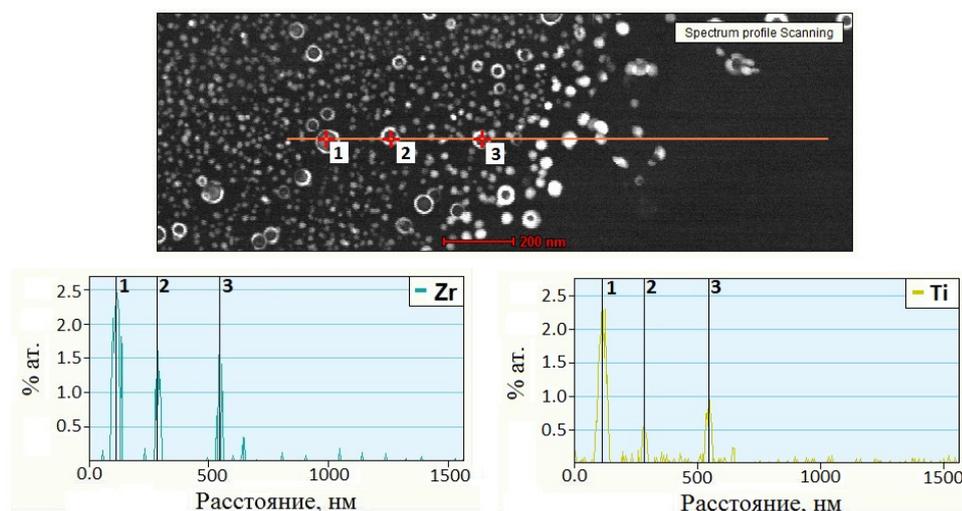
В ходе проведенного исследования установлено, что у листов из сплава 1441 в состав дисперсоидов (β' -фазы) входит кроме Al и Zr также и Ti – от 0,5 до 2,5 % (атомн.), причем соотношение атомов Zr:Ti может составлять от 1:1 до 3:1 (рисунок 6, б). По результатам ранее проведенного исследования в слитках, в отличие от листов, присутствуют дисперсоиды Al_3Zr (β' -фаза) (см. рисунок 2, б).

Изменение температурно-временных параметров исследованных режимов старения незначительно влияет на уровень прочностных характеристик ($\sigma_B=400\text{--}445$ МПа, $\sigma_{0,2}=300\text{--}345$ МПа) и заметно – на относительное удлинение ($\delta=7\text{--}13$ %) и склонность тонких листов из сплава 1441 к расслаивающей коррозии (РСК: 2/3–7/8 баллов).

Наилучшее сочетание прочностных свойств ($\sigma_B=405\text{--}435$ МПа, $\sigma_{0,2}=300\text{--}325$ МПа) и относительного удлинения ($\delta=11\text{--}13$ %) достигается у листов, в структуре которых размер δ' -фазы в объеме зерна составляет 10–25 нм, ЗСВ практически отсутствует или ее ширина не превышает 120 нм (режимы 2, 3, 5, 11).



а



б

Рисунок 6 – Выделения S-фазы на границах зерен и β' -фазы в объеме зерна в листах из сплава 1441, состаренных по трехступенчатым режимам № 11 и № 12, и профили распределения легирующих элементов вдоль линии сканирования: а – меди и магния; б – циркония и титана

На основании исследований для листов толщиной 0,25 мм из сплава 1441 разработан трехступенчатый режим старения (№ 11), которому присвоено обозначение T12 (температурный интервал $T=150-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_I > T_{II} < T_{III}$), суммарное время $\tau=25-30\text{ ч}$ ($\tau_I \ll \tau_{II} > \tau_{III}$)), обеспечивающий оптимальное сочетание механических (в продольном направлении) и коррозионных свойств: $\sigma_b=415-435\text{ МПа}$, $\sigma_{0,2}=320-325\text{ МПа}$, $\delta=8,5-14,5\%$, РСК 2–3 балл – для использования в составе слоистых алюмокомпозитов.

Установлена последовательность формирования структурного состояния в процессе разработанного трехступенчатого режима старения:

- на первой ступени происходит выделение на границах зерен дискретных частиц S-фазы размером около 100 нм, а в объеме зерна – метастабильных частиц S'-фазы на дислокациях и неоднородно распределенных по зерну частиц δ' -фазы размером 5–10 нм;

- вторая ступень не изменяет структуру границ зерен, сформировавшуюся на первой ступени, но обеспечивает укрупнение до 25 нм частиц δ' -фазы;

- на третьей ступени происходит дальнейший распад твердого раствора сплава с выделением S'-фазы как на дислокациях, так и гомогенно, а также укрупнение до 150–300 нм дискретных частиц S-фазы на границах зерна, у границ ЗСВ отмечается укрупнение частиц δ' -фазы.

По результатам проведенных исследований была разработана технология, позволяющая впервые в мире изготавливать методом рулонной прокатки тонкие листы толщиной 0,25 мм из алюминий-литиевого сплава 1441 для использования в качестве металлической составляющей слоистого алюмокомпозита СИАЛ.

Разработана нормативная документация ТР 1.2.2016–2008 и ТР 1.2.2667–2018 на изготовление листов, ТУ 1-804-407–2004 с изменением № 6, ТУ 1-804-516–2012 на поставку и ТР 1.2.2668–2018 на изготовление деталей из сплава 1441.

Четвертая глава посвящена разработке слоистых структур алюмоэпоксидных композитов на базе алюминий-литиевых сплавов и клеевых препрегов, армированных стекловолокном.

Подготовка поверхности алюминий-литиевых листов под склеивание. Показано, что при подготовке поверхности листов под склеивание, анодирование в комбинированном электролите, исключающем использование токсичных соединений Cr^{6+} , позволяет получать анодно-оксидное покрытие, обеспечивающее повышение коррозионной стойкости и высокие адгезионные характеристики клеевых соединений листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 со связующими в слоистых алюмоэпоксидных композитах. Разработана ТР 1.2.2404–2015 по анодному оксидированию алюминий-литиевого сплава в комбинированном электролите.

Выбор клеевого связующего для применения в клеевом препреге с армирующим наполнителем в виде ровинга. По результатам исследований деформационных, теплопрочностных характеристик и динамической вязкости клеевых связующих ВСК-14-2мР, ВСК-14-2м и ВСК-14-3 было выбрано клеевое связующее ВСК-14-2мР на основе смеси эпоксидных олигомеров (дианового хлорсодержащего и азотсодержащего) полисульфона и отвердителя ароматического типа, обладающее повышенными деформационными, теплопрочностными характеристиками и пониженной динамической вязкостью. Оптимальное соотношение между компонентами связующего позволило обеспечить достижение высоких значений реологических характеристик связующего в интервале температур 90–120 °С при переработке в клеевой препрег с обеспечением равномерного нанесения связующего менее 30 %. При этом достигнут максимальный уровень прочностных характеристик с получением высоких значений адгезионных свойств. Все это в целом обеспечивает высокий уровень механических характеристик слоистых алюмоэпоксидных композитов СИАЛ, что позволяет исключить нанесение дополнительных клеевых слоев в зоне контактов с анодированными поверхностями металлических слоев при совмещении процессов отверждения связующего в препреге и формообразования криволинейной поверхности за один технологический цикл при изготовлении деталей автоклавным методом.

Разработка технологических режимов изготовления алюмоэпоксидных композитов. Разработаны технологические режимы изготовления слоистых алюмоэпоксидных композитов СИАЛ на базе листов из алюминий-литиевого сплава 1441 и эпоксидных композитов: давление $P_{\text{ф}}$, температура $T_{\text{ф}}=170\text{--}180$ °С и выдержка при формовании $t_{\text{ф}}$, с обязательной стадией прогрева при температуре $T_1=90\text{--}120$ °С в течение времени t_1 . Приведена обобщенная схема совмещенных этапов формования автоклавным

методом деталей из слоистых металлополимерных композиционных материалов.

Разработана нормативная документация ТР 1.2.1796–2004, ТР 1.595-14-471–2004, ТИ 1.595-34-641–2014 и ТИ 1.595-34-665–2014 на изготовление слоистых алюмокомпозитов СИАЛ, обеспечивающие формообразование поверхности деталей при совмещении процесса отверждения клеевого связующего в препреге.

В связи с тем, что на данный момент алюминий-литиевые листы изготавливаются шириной до 1200 мм, для получения крупногабаритных элементов и конструкций из СИАЛ, в том числе с неравномерной толщиной, разработаны методы сращивания заготовок за счет конструктивно-технологических вставок (дублеров) из алюминий-литиевых листов в зонах сращивания (рисунок 7). В процессе выкладки швы сращивания должны быть разнесены по сечениям слоев материала. Габариты конструкции с применением СИАЛ ограничиваются размерами внутреннего пространства автоклава (габариты автоклава на ПАО «ВАСО» – ширина 3 м, длина 16 м).

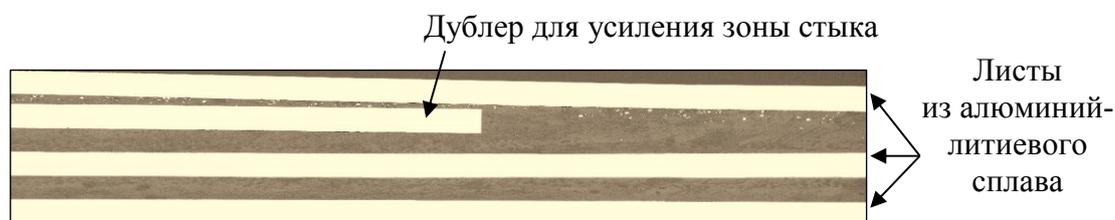


Рисунок 7 – Типовое сечение в зоне стыка листов в СИАЛ с использованием внутреннего межслойного дублера

Разработана ТИ 1.595-34-723–2014 на изготовление соединений слоистых алюмокомпозитов с применением методов сращивания для получения крупногабаритных элементов и конструкций.

Прогнозирование свойств алюмокомпозитов в зависимости от их строения. Предложена математическая модель для прогнозирования механических характеристик слоистых алюмокомпозитов, которая базируется на аналитических расчетах по модифицированному варианту классической модели слоистого композита с учетом упругопластических свойств алюминий-литиевых сплавов согласно билинейному закону. В модели используется условие пластичности по Мизесу для алюминиевых слоев и учитывается анизотропия слоев стеклопластика, для которых применен критерий прочности по максимальным напряжениям. Показана 85–90 % сходимость данных механических характеристик, рассчитанных с помощью аналитической математической модели, и экспериментальных данных испытаний.

Представлена последовательность разработки слоистых алюмокомпозитов применительно к типовым конструкциям деталей планера самолета с учетом конструктивно-технологических требований:

1 – выбор прототипа детали с учетом технологических возможностей изготовления по геометрическим параметрам, прочностным характеристикам и условиям нагружения;

2 – выбор материалов слоев для структуры СИАЛ с учетом прочностных, коррозионных и физических характеристик (марка сплава, толщина и количество металлических листов, вид стеклонаполнителя (ровинг, ткань), ориентация и количество слоев клевого препрега в стеклопластике);

3 – расчет физико-механических характеристик СИАЛ с применением математического моделирования для определения требуемых толщин и количества слоев с целью обеспечения прочностных характеристик ($E, \sigma_b, \sigma_{0,2}, \delta$);

4 – выбор технологических параметров изготовления конструктивно-подобных образцов деталей из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ, проведение контрольных испытаний на образцах-свидетелях;

5 – оценка сходимости расчетных характеристик и экспериментально полученных по результатам испытаний;

6 – изготовление конструктивно-подобных образцов и деталей.

Разработка структур алюмостеклопластиков. Применительно к обшивкам фюзеляжа и панелей крыла самолета, а также для противопожарных зон разработаны алюмостеклопластики различной структуры и схемы армирования (более 20) с применением алюминий-литиевых сплавов марок 1441 и В-1469. В качестве примера представлены структуры СИАЛ с характерными свойствами (таблицы 4 и 5).

Оптимальные композиции алюмостеклопластиков СИАЛ для изготовления деталей выбираются в зависимости от требований к конструкции по геометрическим параметрам, прочностным характеристикам и условиям нагружения. Структурная схема усиленного (гибридного) СИАЛ с распределением составляющих пакета по слоям представлена на рисунке 8 и включает в себя базовый СИАЛ и двухстороннее усиление.

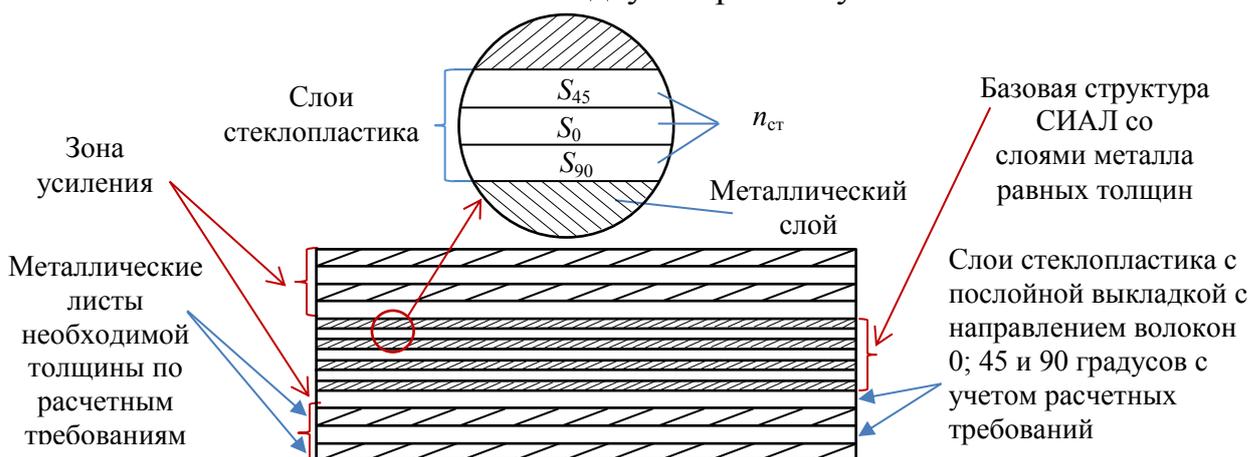


Рисунок 8 – Структурная схема усиленного (гибридного) СИАЛ

Принято следующее обозначение марок алюмостеклопластиков с различной структурой: маркировка материалов СИАЛ (Стеклопластик **И** **А**люминий) содержит цифровой код, в котором первая цифра соответствует схеме армирования стеклопластика: 1 – 100:0 % (однонаправленный); 2 – 70:30 % (изотропный); 3 – 50:50 % (равнопрочный); вторая цифра соответствует марке листов алюминиевого сплава: 1 – сплав 1441, 2 –

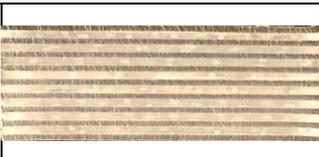
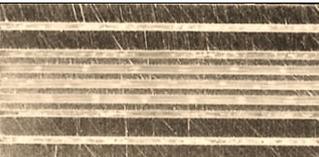
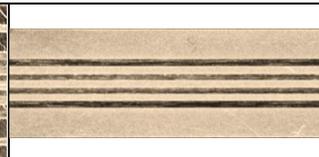
комбинация сплавов 1441+В-1469, 4 – сплав В-1469. В случае применения в структуре СИАЛ клеевого препрега, армированного стекловолокном, указывается буква Р.

Разработанные слоистые алюмостеклопластики нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 и стеклопластиков из клеевых препрегов с ровингом обладают улучшенными физико-механическими свойствами: модулем упругости $E=64-66$ ГПа, временным сопротивлением при растяжении $\sigma_b=600-1200$ МПа (варьируются в зависимости от схемы армирования стекловолокном и доли металлической составляющей в структуре СИАЛ), плотностью $d=2300-2400$ кг/м³ и повышенной температурой эксплуатации (от 80 до 120 °С) по сравнению с СИАЛ, изготовленными на базе листов традиционных сплавов Д16 (1163) с клеевыми препрегами со стеклонаполнителями в виде ткани.

СИАЛ имеют преимущества перед монолитными листами тех же толщин из традиционных алюминиевых сплавов: по прочностным и характеристикам сопротивления усталости на 28–30 и 12–15 % соответственно и более чем в 10 раз по трещиностойкости при циклическом нагружении.

Применительно к конструкции обшивок крыла разработаны структуры слоистых алюмостеклопластиков с варьируемыми свойствами с использованием листов разной толщины из алюминий-литиевых сплавов. Исходя из конструктивных и технологических особенностей конструкции обшивки крыла, подобраны толщины внешних листов (1,0–1,8 мм) с учетом постановки крепежа, для которого требуются определенные утолщения в зависимости от высоты закладной головки (таблица 4).

Таблица 4 – Примеры структур слоистых алюмостеклопластиков

| Сечение слоистого алюмостеклопластика |  |  |  |
|--|---|--|---|
| Обозначение структур и материалов | СИАЛ-1441 (9/8) | 1,0+1,0 мм 1441 + СИАЛ-1441 (4/3) + 1,0+1,0 мм 1441 | 1,5 мм В-1469 + СИАЛ-1441 (3/2) + 1,5 мм В-1469 |
| Толщина, мм | 5,34–5,36 | 6,87–6,89 | 4,97–4,99 |
| Содержание металлической составляющей, % (объемн.) | 47 | 68 | 76 |
| Содержание стекловолокна, % (объемн.) | 53 | 32 | 24 |

Выполнено моделирование структур слоистых алюмостеклопластиков с применением разработанной аналитической математической модели расчета их механических характеристик с учетом межслойных внутренних остаточных напряжений, возникающих в процессе формообразования СИАЛ.

Сходимость результатов расчетов механических свойств и экспериментально определенных механических характеристик при растяжении образцов из алюмоплекспластиков разных структур составляет 85–90 % (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнительные прочностные экспериментальные и расчетные механические свойства при растяжении образцов из слоистых алюмоплекспластиков

| Свойства | Направление вырезки образцов | Значения свойств структур слоистых материалов | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------------------|---|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|--|
| | | СИАЛ-1441 (9/8) | СИАЛ-В-1469 (7/6) | Лист В-1469 толщиной 1,8 мм + СИАЛ-1441 (4/3) + лист В-1469 толщиной 1,8 мм | Лист В-1469 толщиной 1,8 мм + СИАЛ-В-1469 (4/3) + лист В-1469 толщиной 1,8 мм | Лист В-1469 толщиной 1,8 мм + СИАЛ-1441 (4/3) + слой претерга + лист В-1469 толщиной 1,8 мм | Лист 1441 толщиной 1,0 мм + СИАЛ-1441 (4/3) + лист 1441 толщиной 1,0 мм | Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) + лист В-1469 толщиной 1,5 мм | Лист 1441 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) + лист 1441 толщиной 1,5 мм | Лист 1441 толщиной 0,25 мм + лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) + лист В-1469 толщиной 1,5 мм + лист 1441 толщиной 0,25 мм | Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) + с ровингом + лист В-1469 толщиной 1,5 мм |
| | | экспериментальные/расчетные | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| σ_B , МПа | Д | $\frac{970}{952}$ | $\frac{910}{903}$ | $\frac{675}{658}$ | $\frac{695}{680}$ | $\frac{680}{669}$ | $\frac{610}{602}$ | $\frac{700}{691}$ | $\frac{590}{569}$ | $\frac{650}{631}$ | $\frac{720}{708}$ |
| | П | $\frac{250}{239}$ | $\frac{365}{351}$ | $\frac{420}{412}$ | $\frac{430}{417}$ | $\frac{430}{419}$ | $\frac{290}{278}$ | $\frac{435}{422}$ | $\frac{300}{287}$ | $\frac{405}{392}$ | $\frac{450}{431}$ |
| $\sigma_{0,2}$, МПа | Д | $\frac{320}{308}$ | $\frac{430}{420}$ | $\frac{390}{371}$ | $\frac{440}{419}$ | $\frac{410}{397}$ | $\frac{370}{351}$ | $\frac{435}{421}$ | $\frac{370}{358}$ | $\frac{425}{412}$ | $\frac{435}{427}$ |
| | П | $\frac{230}{217}$ | $\frac{345}{332}$ | $\frac{360}{342}$ | $\frac{390}{372}$ | $\frac{380}{370}$ | $\frac{270}{249}$ | $\frac{390}{372}$ | $\frac{290}{281}$ | $\frac{365}{352}$ | $\frac{400}{389}$ |
| δ , % | Д | $\frac{3,4}{3,2}$ | $\frac{3,9}{3,7}$ | $\frac{3,7}{3,5}$ | $\frac{4,0}{3,8}$ | $\frac{3,5}{3,3}$ | $\frac{3,7}{3,6}$ | $\frac{4,1}{3,9}$ | $\frac{4,2}{4,0}$ | $\frac{4,0}{3,8}$ | $\frac{4,2}{4,0}$ |
| | П | $\frac{2,3}{2,4}$ | $\frac{2,4}{2,5}$ | $\frac{4,0}{3,9}$ | $\frac{4,0}{3,9}$ | $\frac{4,1}{4,0}$ | $\frac{4,2}{4,1}$ | $\frac{2,6}{2,4}$ | $\frac{2,5}{2,3}$ | $\frac{2,9}{2,7}$ | $\frac{2,9}{2,7}$ |
| E , ГПа | Д | $\frac{58}{60}$ | $\frac{64}{65}$ | $\frac{67}{69}$ | $\frac{63}{64}$ | $\frac{63}{64}$ | $\frac{59}{60}$ | $\frac{65}{66}$ | $\frac{63}{63}$ | $\frac{63}{64}$ | $\frac{70}{68}$ |
| | П | $\frac{45}{48}$ | $\frac{53}{55}$ | $\frac{60}{61}$ | $\frac{56}{57}$ | $\frac{62}{63}$ | $\frac{52}{53}$ | $\frac{62}{63}$ | $\frac{62}{62}$ | $\frac{59}{60}$ | $\frac{63}{64}$ |
| d^* , кг/м ³ | – | 2350 | 2420 | 2480 | 2500 | 2450 | 2390 | 2430 | 2370 | 2430 | 2450 |

Примечание – Значения плотности слоистых материалов по экспериментальным данным

Алюмоплекспластики на основе листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 паспортно оформлены (паспорта №№ 1774, 1909, 1926). Разработаны технические условия на поставку алюмоплекспластиков: ТУ 1-595-34-1832–2019, ТУ 149-0121–2015, ТУ 1-595-34-1537–2015, ТУ 1-595-34-1063–2008 и ТУ 1-595-34-892–2005.

Для замены монолитных алюминиевых конструктивных листов в обшивках фюзеляжа самолетов по заказу компании «Airbus» разработан слоистый металлополимерный материал 1441-GLARE на базе тонких (0,35 мм) листов из алюминий-литиевого сплава 1441Т11. Исследованы характеристики образцов из опытных слоистых панелей 1441-GLARE

(толщиной 1,65–1,69 мм) пятислойной (3/2) перекрестной (0/90 градусов) структуры с прослойками однонаправленного препрега со стекловолокнами S2 ($E = 85$ ГПа, $\sigma_b = 4800$ МПа).

Показано, что применение в структуре 1441-GLARE ($d=2350$ кг/м³, $E=62$ ГПа) листов из алюминий-литиевого сплава 1441 по сравнению со стандартными GLARE ($d=2480$ кг/м³, $E=56,4$ ГПа) на базе листов из традиционного сплава 2024Т3 (российский аналог сплава Д16Т) обеспечит повышение весовой эффективности и жесткости конструкций за счет пониженной плотности сплава 1441 ($d=2590$ кг/м³) и повышенного модуля упругости ($E=78–79$ ГПа).

В пятой главе приведены результаты исследований комплекса свойств алюмокомпозитов с различной структурой и схемой армирования.

Испытания при растяжении. Использование стеклопластика, армированного наполнителем из высокопрочных высокомодульных стеклянных волокон, позволяет увеличить прочность алюмокомпозитов. Значения σ_b для однонаправленных структур СИАЛ достигают 1000–1200 МПа в продольном направлении и для перекрестно-армированных структур: 600–700 МПа в обоих направлениях.

Типовые диаграммы «напряжение–деформация» при растяжении алюмокомпозита в сравнении с образцами из монолитного алюминиевого сплава 1163 и стеклопластика приведены на рисунке 9. При статическом растяжении образцов разрушение по слоям происходит неравномерно.

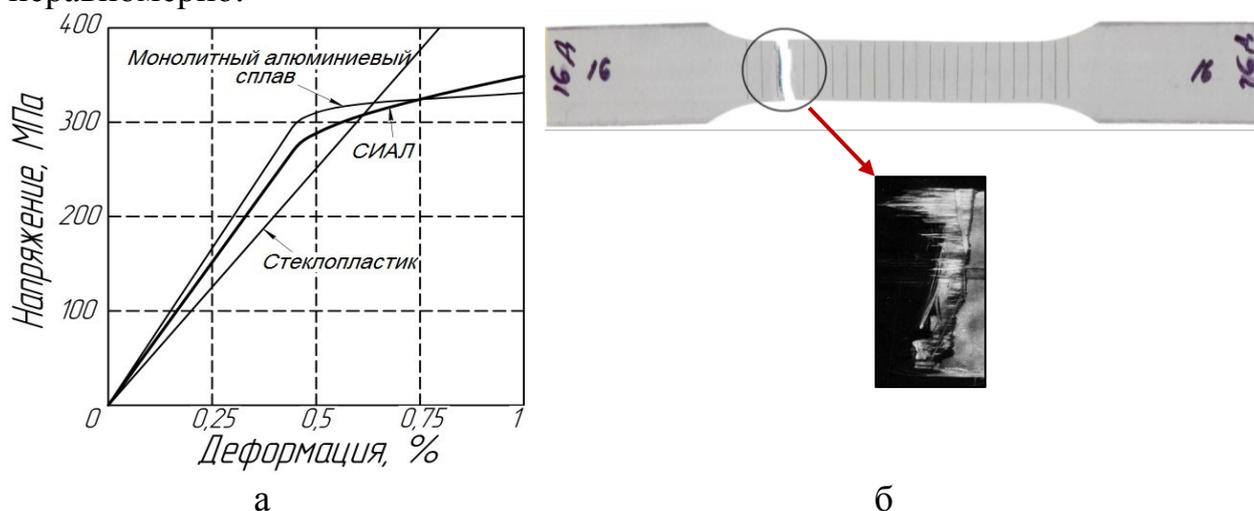


Рисунок 9 – Типовые диаграммы растяжения СИАЛ, листа из сплава 1163, стеклопластика (а) и разрушенный образец алюмокомпозита (б)

Оценены механические свойства при растяжении при 20 °С образцов однонаправленных алюмокомпозитов СИАЛ-1-1Р и СИАЛ-1-1 с различным объемным соотношением металл/стеклопластик и различным наполнением стеклопластика армирующими стекловолокнами – объемная доля стеклонеполнителя в стеклопластике ($V_{ст}$): 70 % – стеклоровинга, 55 % – стеклоткани. Показано, что чем больше содержание металлической составляющей в алюмокомпозите, тем меньше временное сопротивление при разрыве и больше модуль упругости:

- СИАЛ-1-1 (42 % (объемн.) листов из сплава 1441) – $\sigma_B=960$ МПа и $E=58$ ГПа, а для СИАЛ-1-1 (64 % (объемн.) листов из сплава 1441) – $\sigma_B=820$ МПа и $E=64$ ГПа;

- СИАЛ-1-1Р (61 % (объемн.) листов из сплава 1441) – $\sigma_B=1210$ МПа и $E=66$ ГПа, а для СИАЛ-1-1Р (70 % (объемн.) листов из сплава 1441) – $\sigma_B=950$ МПа и $E=75$ ГПа.

Исследования трещиностойкости. По результатам испытаний образцов экспериментальных слоистых структур разного состава и укладок слоев показана зависимость скорости роста трещины усталости (СРТУ) в слоистых алюмокомпозитах в сравнении с ростом трещины в

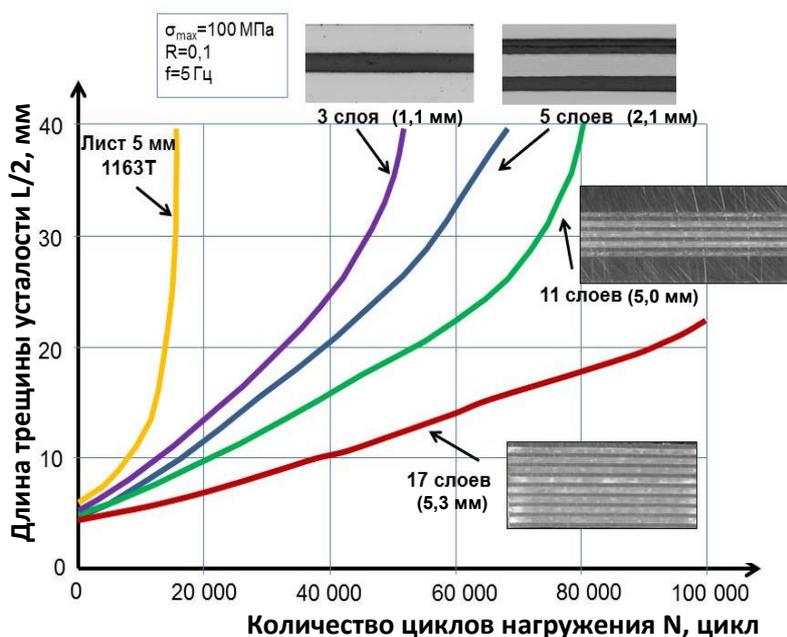


Рисунок 10 – Кривые роста трещины усталости в алюмокомпозитах толщиной до 5,3 мм с различным количеством слоев и в монолитном листе из сплава 1163

При испытаниях на СРТУ начало зарождения трещины в наружных металлических листах в СИАЛ происходит в алюмокомпозитах раньше, чем в монолитных алюминиевых листах – на стадии 20–30 % от числа циклов до полного разрушения образцов, за счет дальнейшего послойного торможения роста трещины в слоях стеклопластика, что препятствует лавинообразному разрушению материала.

Испытания на малоцикловую усталость. Показано, что уровень малоцикловой усталости (МЦУ) алюмокомпозитов зависит от укладки слоев стеклопластика и схем их армирования: на продольных образцах СИАЛ-1-1 с однонаправленной схемой армирования долговечность выше – среднее число циклов до разрушения $N_{cp}=147$ 000 циклов при напряжении

монолитных листах из алюминиевого сплава (рисунок 10). Показано, что снижение значений СРТУ в слоистых алюмокомпозитах более чем в 10 раз для $\Delta K=31$ МПа \cdot м^{1/2} ($dl/dN=0,05-0,20$ мм/цикл), по сравнению с листами из монолитных алюминиевых сплавов Д16 и 1163, обусловлено изменением траектории развития трещин в слоях стеклопластика, служащих стопперами роста трещины, развивающейся от концентратора напряжений – отверстия в образце (рисунок 11).

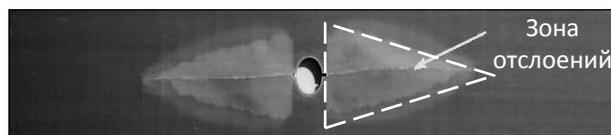


Рисунок 11 – Характер межслойных отслоений в зоне контакта металл/стеклопластик от концентратора напряжений

$\sigma_{\max}=157$ МПа, по сравнению с $N_{\text{ср}}=134\ 650$ циклов для образцов СИАЛ-3-1 с перекрестным армированием (рисунок 12).

С точки зрения повышения усталостной долговечности использование ровинга в СИАЛ более целесообразно, чем применение тканевого препрега, за счет более плотной укладки стекловолокна, сдерживающего разрушение внутренних металлических слоев.

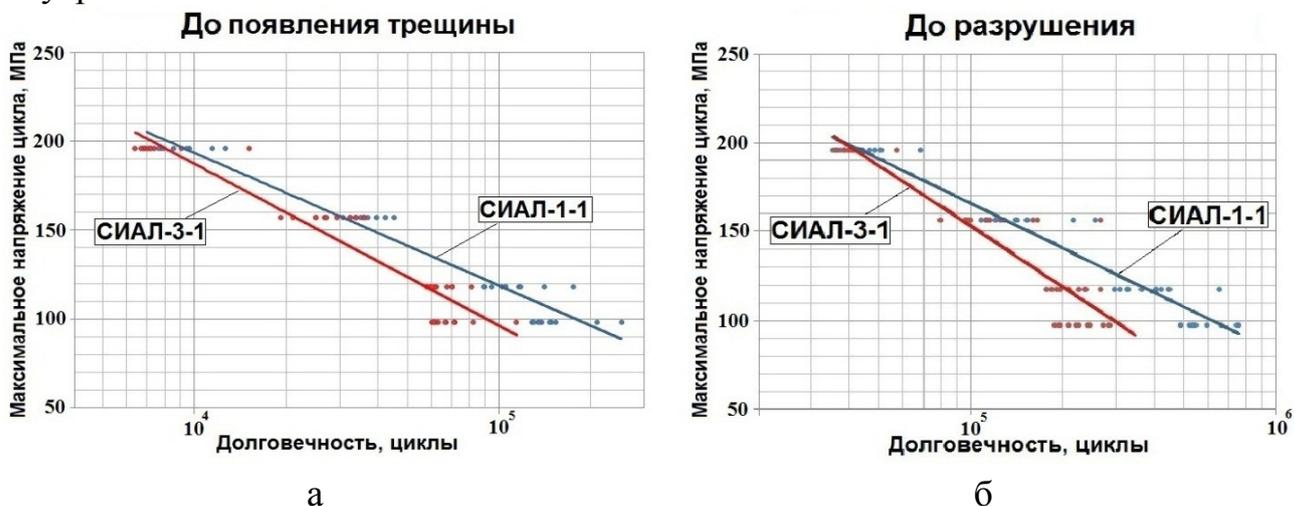


Рисунок 12 – Малоцикловая усталость СИАЛ-1-1 и СИАЛ-3-1 на основе листов 1441: а – долговечность до появления трещины, б – долговечность до разрушения

В процессе испытаний алюмостеклопластиков на МЦУ установлено, что зарождение усталостной трещины (на стадии 20–30 % от числа циклов до полного разрушения) в образцах начинается с поверхностных слоев из алюминий-литиевого сплава с дальнейшим развитием трещины с разрушением металлического листа. На продольных образцах СИАЛ-1-1 с однонаправленной схемой армирования долговечность существенно выше, чем на образцах СИАЛ-3-1 с перекрестным армированием. В области меньших нагрузок (98 и 118 МПа), характерных для обшивок фюзеляжа, зафиксирован бóльший разброс значений по характеристикам МЦУ, при высоком напряжении цикла нагружения разброс значений долговечности уменьшается.

Результаты усталостных испытаний образцов алюмостеклопластика СИАЛ-3-1 с перекрестным армированием показали, что характеристики МЦУ сравнимы с долговечностью монолитных материалов из ресурсных сплавов 1163 и 1441 (в зависимости от вида полуфабриката при $\sigma_{\max}=157$ МПа: $N_{\text{ср}}$ – от 110 000 до 152 000 и от 140 000 до 163 000 циклов соответственно).

Характер разрушения образцов из алюмостеклопластика при испытаниях на МЦУ с расположением волокна по направлению приложения нагрузки представлен на рисунке 13.

Во всех разрушенных образцах СИАЛ при испытаниях на МЦУ наблюдается вытягивание волокон длиной до 20–30 мм в слое стеклопластика. Это может быть связано с неравномерностью адгезии между волокном и связующим в слое стеклопластика (рисунок 13, а, б). При

разрушении в продольных образцах трещина на начальной стадии усталостного нагружения появляется во внешних алюминий-литиевых листах от отверстия и развивается послойно до окончательного разрушения слоев СИАЛ. При этом появляются вторичные очаги разрушения в образцах алюмостеклопластика, расположенные по границе «металл–стеклопластик» (рисунок 13, в).

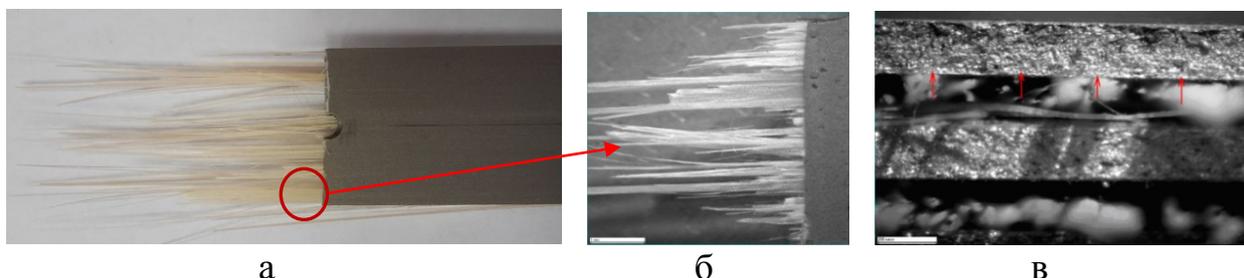


Рисунок 13 – Характер разрушения образцов из алюмостеклопластика при испытаниях на МЦУ: а – общий вид; б – стекловолокна в слое стеклопластика; в – вторичные очаги разрушения (указаны стрелками)

Исследование структуры алюмостеклопластиков. По результатам исследований показано, что в СИАЛ с использованием листов из сплава 1441 и клеевых препрегов с разным объемным содержанием клевого связующего (рисунок 14) распределение клевого связующего относительно равномерное. Содержание клевого связующего в стеклопластике составляет: от 36 до 42 % (объемн.) – у клевого препрега со стеклоровингом, от 55 до 62 % (объемн.) – у клевого препрега со стеклотканью.

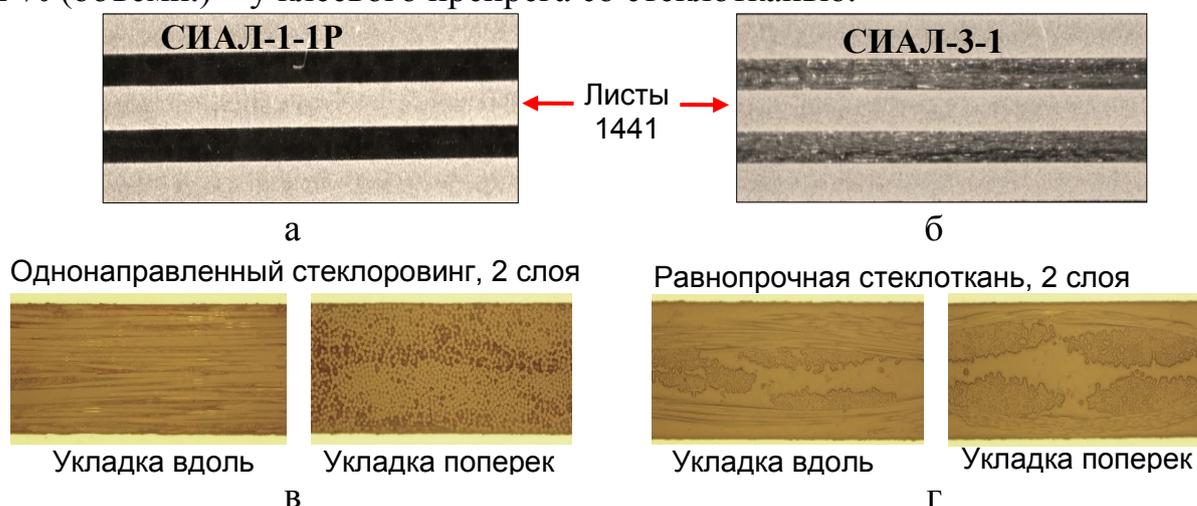


Рисунок 14 – Варианты укладки слоев при формировании алюмостеклопластиков: а – СИАЛ-1-1Р со стеклоровингом; б – СИАЛ-3-1 со стеклотканью; в, г – виды возможных укладок и направлений наполнителя в стеклопластике

Разработан ММ 1.2.085–2008 для исследований структуры, оценки механических и ударных свойств многослойного высокопрочного алюмостеклопластика типа СИАЛ.

Оценка огнестойкости и молниестойкости алюмостеклопластиков. Возможность использования слоистого алюмостеклопластика в пожароопасных зонах авиационных конструкций

оценивали по результатам квалификационных испытаний во ФГУП «ГосНИИ ГА» образцов СИАЛ-3-1Р пятислойной структуры и СИАЛ-2-1Р семислойной структуры с применением листов из сплава 1441 и стеклопластика КМКС-2мР.120РВМПН.30. Испытания проводили с учетом требований авиационных правил АП-25 и АП-33 для огнестойких и огнестойких материалов: воздействие на поверхность образца пламени с температурой $1100^{±38}$ °С в течение 5 и 15 мин стандартной аттестованной горелкой.

При анализе характера и последовательности разрушения образцов из алюмопластика при прямом воздействии пламени установлено, что внешний алюминиевый слой (0,25–0,5 мм) в составе СИАЛ (независимо от марки сплава) прогорает приблизительно через 15 с (температура плавления алюминиевых сплавов не более 700 °С), армирующие стеклянные волокна, имеющие температуру плавления ~ 1700 °С, представляют собой барьер для дальнейшего распространения пламени. При этом эпоксидное связующее в слое пластика подвергается термодеструкции с образованием парогазовых продуктов и коксованием слоя ($T_{\text{кокс}}=300–350$ °С), сдерживающих прогрев следующих слоев материала за счет абляционного эффекта. Увеличение количества монослоев препрега в слоях стеклопластика в СИАЛ увеличивает время прогорания слоистого алюмопластика.

На основании полученных данных показано, что слоистые алюмопластики обладают более высокой стойкостью при воздействии пламени. Огнестойкость СИАЛ при 1100 °С более чем в 10 раз (15 мин и более) выше по сравнению с листами из монолитных алюминиевых сплавов (1,5–2 мин), что позволяет рекомендовать СИАЛ для применения в пожароопасных зонах конструкции и зонах, подвергающихся нагревам, таких как противопожарные перегородки, зоны обшивки фюзеляжа, пола и багажно-грузовых отсеков.

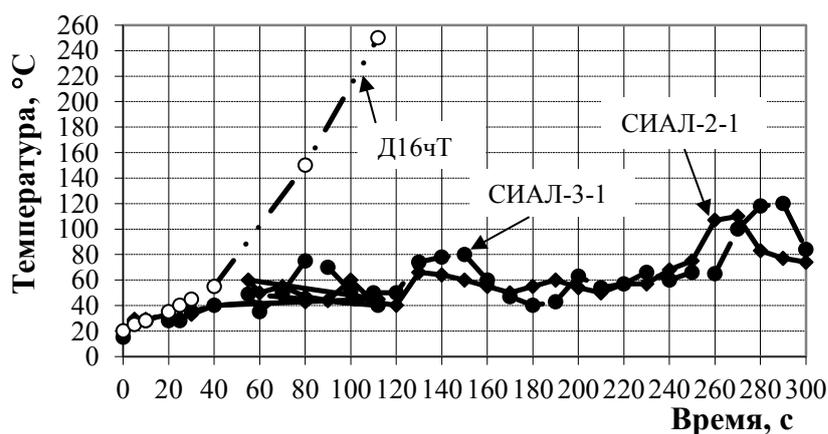


Рисунок 15 – Изменение температуры на расстоянии 100 мм с внешней стороны образцов листов СИАЛ и сплава Д16чТ при воздействии пламени 1100 °С

Зависимость изменения температуры на расстоянии 100 мм от поверхности образцов СИАЛ при воздействии пламени 1100 °С в течение 5 мин представлена на рисунке 15. Температура на тыльной стороне образцов СИАЛ-3-1Р и СИАЛ-1-1Р не превышала 205 °С.

По результатам проведенных работ разработан СТО 1-595-20-532–2017 для оценки огнестойкости и огнестойкости слоистых материалов, предназначенных для пожароопасных зон в авиационной технике.

Для оценки молниестойкости слоистого алюмокомпозитного пластика была выбрана верхняя панель топливного бака толщиной 2,5 мм самолета Бе-103.

Сравнительные испытания проводили на образцах толщиной 1,0–1,3 мм из материала СИАЛ трехслойной структуры с использованием в структуре листов сплава 1441 и композитного пластика с разными связующими и на образцах из монолитного листа толщиной 2,5 мм из сплава 1441.

В результате испытаний образцов из СИАЛ, изготовленных применительно к верхним панелям топливных баков, установлено, что при воздействии импульса тока, имитирующего разряд молнии, сквозной прожег отсутствовал. На внутренней стороне всех испытанных образцов имело место образование горячей точки с температурой, не превышающей 180 °С, что является безопасным с точки зрения воспламенения топливо-воздушной смеси (температура воспламенения ≥ 230 °С). Показано, что верхние панели топливных баков самолета Бе-103, выполненные из СИАЛ трехслойной структуры толщиной 1,0–1,3 мм, обеспечивают повышенную стойкость к удару молнии и эквивалентны по молниестойкости монолитным металлическим панелям толщиной 2,5 мм.

Исследование коррозионной стойкости алюмокомпозитных пластиков.

Алюмокомпозитные пластики обладают высокой коррозионной стойкостью в условиях агрессивного воздействия климатических факторов внешней среды, в том числе в условиях умеренно теплого климата приморской зоны.

По результатам металлографических исследований микрошлифов, вырезанных из мест локальных коррозионных повреждений образцов СИАЛ без антикоррозионных покрытий, было выявлено наличие межкристаллитной коррозии глубиной не более 0,15 мм для листов из сплава 1441Т12, образующих внешние поверхности алюмокомпозитного пластика (рисунок 16).

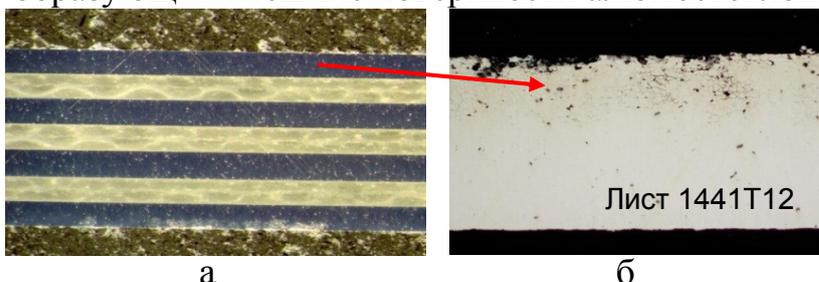


Рисунок 16 – Микроструктура алюмокомпозитного пластика после коррозионных испытаний: а – СИАЛ-3-1Р структуры 4/3, $\times 25$; б – следы межкристаллитной коррозии и язвенные коррозионные поражения внешних листов без антикоррозионной защиты, $\times 200$

Для оценки работы алюмокомпозитных пластиков с защитными покрытиями (грунт ЭП-0215 (2 слоя) с эмалью ВЭ-69 (2 слоя)) проведены испытания на четырехточечный изгиб образцов из СИАЛ-3-1, что имитирует деформацию с напряжениями растяжения в поверхностных слоях при эксплуатации.

При натурной экспозиции образцов в ГЦКИ ВИАМ в течение четырех месяцев при напряжении $\sigma = 150$ МПа ($0,5 \cdot \sigma_{0,2}$) дефектов защитных покрытий в виде растрескиваний и отслоений в СИАЛ не обнаружено.

Многослойная структура СИАЛ препятствует развитию коррозионных поражений по толщине образца. В случае нарушения антикоррозионной защиты коррозионному поражению могут быть подвержены только внешние

листы, что позволяет гарантировать сохранение высокого уровня прочностных характеристик СИАЛ при воздействии агрессивных факторов внешней среды в условиях эксплуатации.

Исследование влагонасыщения в алюмостеклопластиках. Ввиду того что сорбция влаги в алюмостеклопластиках может происходить через незащищенные торцы образцов, проведена оценка влагопоглощения материалов СИАЛ. Показано, что применение выбранного клевого связующего ВСК-14-2мР (СИАЛ-1-4Р, СИАЛ-3-2Р, СИАЛ-3-1Р) для клевого препрега с ровингом марки КМКС-2мР.120.РВМПН.30 обеспечивает менее интенсивную сорбцию влаги по сравнению с алюмостеклопластиком СИАЛ-3 на основе клевого препрега с тканью КМКС-1.80.Т60.37 с клевым связующим ВСК-14-1. Для однонаправленных структур (СИАЛ-1-4Р) интенсивность влагонасыщения более выражена по сравнению с равнопрочными структурами (СИАЛ-3-1Р) и зависит от направления вырезки образцов (рисунок 17).

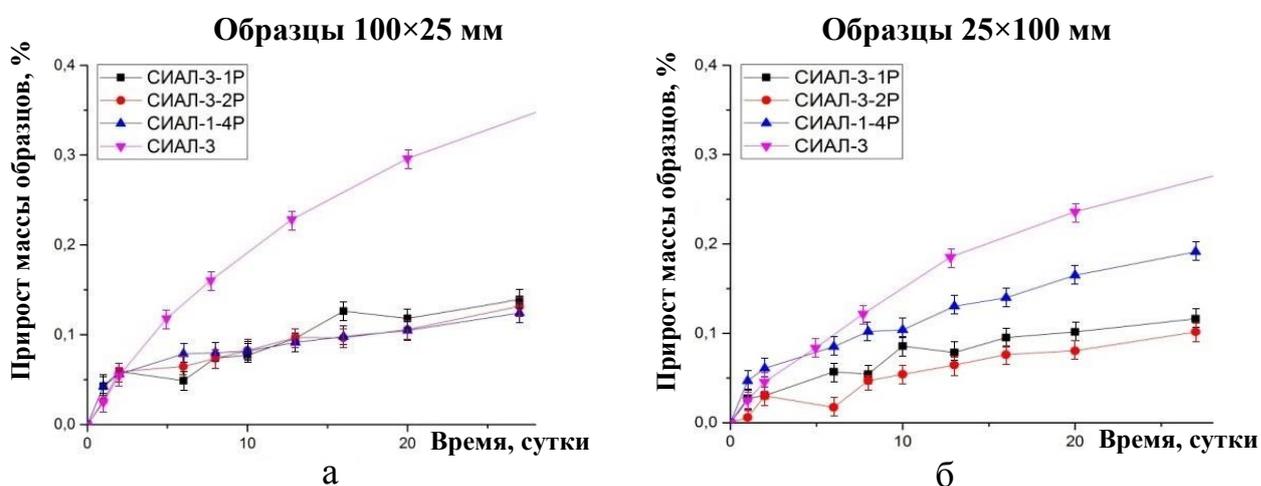


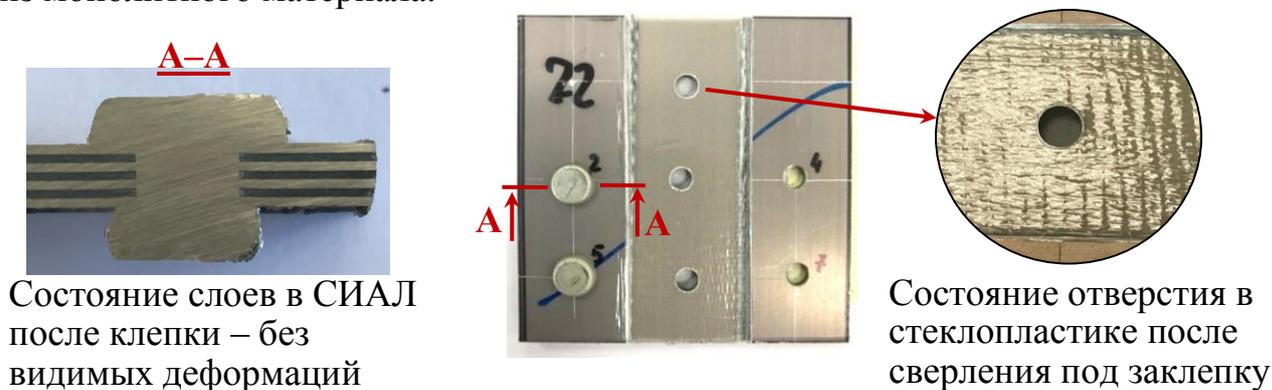
Рисунок 17 – Кинетика сорбции влаги в продольных (а) и поперечных (б) образцах алюмостеклопластиков

Шестая глава посвящена исследованиям влияния технологических процессов при изготовлении деталей с применением операций резки, формообразования, клепки, механообработки и др. на состояние слоев алюмостеклопластика.

Для этой цели впервые использованы образцы особой конфигурации, в которых предусмотрели зона искусственного непрочлея. С помощью таких образцов получены результаты поведения слоев в структуре материалов при воздействии разных типов операций.

Механическую обработку, включающую сверление отверстий в алюмостеклопластиках, рекомендовано проводить острозаточенными сверлами в два перехода (при предварительном сверлении диаметр отверстия на 0,5–1,5 мм меньше номинального) с использованием технологической опоры для обеспечения надежного прижима с целью исключения появления расслоений в зоне выхода сверла, заусенцев и других повреждений. В результате проведенных экспериментов отработаны режимы механической обработки алюмостеклопластиков с оценкой состояния слоев материала.

Исследованы **заклепочные соединения** с оценкой состояния слоев стеклопластика (рисунок 18). Установлено, что при стягивании пакета с учетом нормированных величин отсутствуют трещины в стеклопластике, а также деформации и расслоения по толщине СИАЛ. Качество поверхностей кромок, отверстий и их геометрические размеры, полученные при резке и сверлении алюмопластиков, не уступает качеству поверхности кромок из монолитного материала.



Состояние слоев в СИАЛ после клепки – без видимых деформаций

Состояние отверстия в стеклопластике после сверления под заклепку

Рисунок 18 – Состояние поверхностей в СИАЛ после технологических операций сверления и клепки

По результатам **холодного деформирования** листовых заготовок СИАЛ-3-1Р (4/3) толщиной 2,2 мм с оценкой состояния слоев материала определен минимально допустимый радиус гибки без нагрева для формообразования деталей из алюмопластиков, который составляет 50 мм (рисунок 19).



Рисунок 19 – Состояние поверхностей алюмопластика СИАЛ при формообразовании

С учетом отработанных технологических процессов на образцах СИАЛ разработаны технологические рекомендации на изготовление конструктивно-подобных образцов и оснастки по предварительно спроектированным электронным 3D-моделям. Изготовлены в промышленных условиях ПАО «ВАСО» элементы конструкции с обшивкой из слоистого алюмопластика на базе листов из алюминий-литиевых сплавов с учетом конструктивно-силовой схемы распределения нагрузок для слоистой гибридной панели крыла, выполненной совместно с ПАО «Туполев», и створки капота двигателя вертолета, разработанной совместно с АО «Камов».

Разработана нормативная документация ТР 1.2.2398–2015,
ТР 1.595-34-871–2009, ТР 1.595-34-772–2007, ТР 1.2.1882–2006,

ТР 1.2.1913–2006, ТР 1.2.1796–2004 и ТР 1.2.1789–2004 на изготовление конструктивных элементов из слоистых алюмокомпозитов СИАЛ, включая механическую обработку, соединение и контроль качества.

В седьмой главе представлены результаты испытаний конструктивно-подобных образцов с применением слоистых алюмокомпозитов на основе листов из алюминий-литиевых сплавов со стрингерным набором:

- панели отсека фюзеляжа самолета с обшивкой из алюмокомпозита СИАЛ-3-1Р;

- фрагмента гибридной панели крыла самолета Ту-204 с обшивкой из алюмокомпозита с использованием в структуре листов и профилей из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469;

- створки капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого материала СИАЛ-2-1Р (прототип створки капота двигателя вертолета Ка-226Т).

Конструктивно-подобный образец панели отсека фюзеляжа самолета с обшивкой из алюмокомпозита. Для оценки прочностных и технологических характеристик панели отсека фюзеляжа, долговечности и ресурса были проведены сравнительные испытания фрагментов верхних панелей отсека фюзеляжа самолета с обшивкой из алюмокомпозита СИАЛ-3-1Р толщиной 1,5 мм (КПО № 1, рисунок 20) и листов алюминиевого сплава 1163АТВ (КПО № 2) и стрингерами из профилей сплава Д16Т.

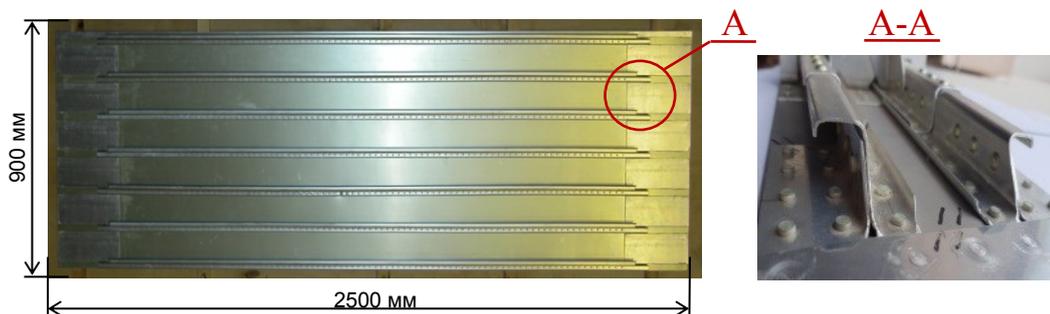


Рисунок 20 – Фрагмент верхней панели отсека фюзеляжа

На основании анализа результатов проведенных совместно с ФГУП «ЦАГИ» сравнительных испытаний с оценкой усталостных характеристик и скорости роста трещин сделаны следующие выводы:

- панель с обшивкой из алюмокомпозита СИАЛ-3-1Р имеет преимущество по снижению массы на 15 % по сравнению с панелью с обшивкой из листов 1163АТВ;

- долговечность панели с обшивкой из СИАЛ-3-1Р, разрушение которой произошло при $N_1=307\ 634$ циклов нагружения, выше в ~2 раза по сравнению с долговечностью панели с обшивкой из листов сплава 1163АТВ, разрушившейся при $N_2=159\ 435$ циклов нагружения.

Разработана ТР 1.2-2265–2012 на изготовление конструктивных элементов из СИАЛ.

Створка капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого алюмокомпозита. Применительно к конструкции капота двигателя вертолета была разработана огнестойкая структура слоистого

алюмостеклопластика СИАЛ-2-1Р и изготовлена по разработанной технологии створка капота вертолета Ка-226Т толщиной 1,2 мм (рисунок 21) взамен используемых в настоящее время листов из титанового сплава ОТ4-1, что дало снижение массы створки капота до 20 % и увеличение времени прогорания обшивки капота (более 15 мин) при воздействии пламени с температурой 1100 °С.

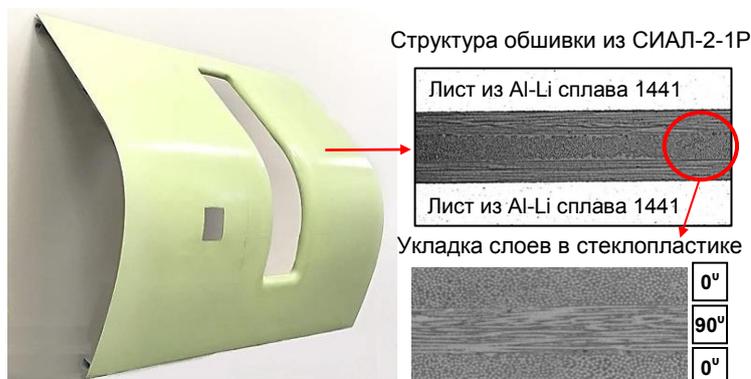


Рисунок 21 – Створка капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого материала СИАЛ-2-1Р



Рисунок 22 – Внешний вид образца:
а – со стороны воздействия пламени,
б – с противоположной стороны

лено отсутствие проникновения пламени на внешнюю сторону образцов (рисунок 22).

Конструктивно-подобный образец фрагмента гибридной панели крыла с обшивкой из алюмостеклопластика. По результатам всесторонних испытаний фрагмента слоистой гибридной панели центроплана самолета Ту-204, в том числе во ФГУП «ЦАГИ», показано, что благодаря многослойному строению и характеристикам исходных компонентов слоистые панели для обшивок крыла на базе листов разной толщины из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков обладают преимуществами перед монолитными панелями из алюминиевого сплава В950чГ2: по весовой эффективности конструкции – на 11,3 %, по сопротивлению росту трещины усталости – более чем в 10 раз, по несущей способности элементов конструкции при сжатии – на 20 %, что подтверждается актом от 16.07.2020 совместных работ ФГУП «ВИАМ» и ПАО «Туполев» о возможности применения в авиационных конструкциях слоистых

Получен акт № 053А-191115 от 15.11.2019 (АО «Вертолеты России») технологического опробования изготовления створки капота двигателя вертолета Ка-226Т из огнестойкого слоистого алюмостеклопластика СИАЛ.

Разработана ТР 1.2.2697–2018 на изготовление створки капота двигателя вертолета из материала марки СИАЛ-2-1Р. По результатам испытаний во ФГУП «ГосНИИ ГА» огнестойкости и огнестойкости при температуре 1100 °С образцов, вырезанных из створки капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого материала СИАЛ, установ-

алюмокомпозитов на базе листов из сплава 1441 и прессованных полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов.

Анализ полученных результатов определения несущей способности при сжатии четырехстрингерных конструктивно-подобных образцов панели центроплана с обшивкой из слоистого алюмокомпозита и силового набора из прессованных профилей, изготовленных на оборудовании ПАО «ВАСО», показал, что последовательное разрушение КПО происходило в результате потери устойчивости силовых элементов с дальнейшей деформацией обшивки (рисунок 23). В КПО напряжения местной потери устойчивости слоистой обшивки и напряжения потери несущей способности образцов составляли:

- образец № 1 – $\sigma_{\max 1} = \sigma_{\text{м.п.у. обш.1}} = 438,7$ МПа при нагрузке $P_{\max 1} = 1860$ кН;
- образец № 2 – $\sigma_{\max 2} = \sigma_{\text{м.п.у. обш.2}} = 437,2$ МПа при нагрузке $P_{\max 2} = 1875$ кН.

По диаграммам « $P-\Delta l$ » определены нагрузки $P_{\max 1}$ и $P_{\max 2}$, при которых произошла потеря устойчивости КПО (рисунок 23, в).

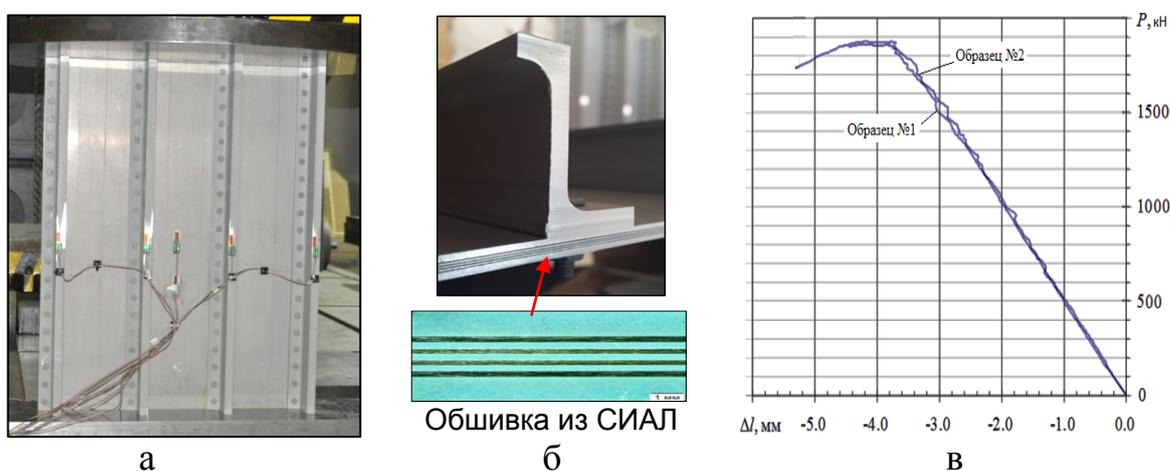


Рисунок 23 – Фрагмент гибридной панели крыла с обшивкой из слоистого алюмокомпозита: а – КПО на испытательном стенде; б – соединение обшивки со стрингером; в – диаграмма деформирования КПО « $P-\Delta l$ »

Разработана нормативная документация ТР 1.2-2403–2015, ТР 1.2.2157–2010, ТР 1.595-34-868–2009 и ТР 1.595-34-698–2006 на применение материалов СИАЛ в конструкциях.

Сравнение прочностных характеристик обшивки из слоистого алюмокомпозита на базе листов из алюминий-литиевых сплавов и монолитной обшивки из листов алюминиевого сплава В95очТ2 показало, что металлополимерный композиционный материал превосходит высокопрочный сплав В95очТ2 по удельной прочности, сопротивлению роста усталостной трещины и несущей способности (таблица 6).

По результатам всесторонних исследований и испытаний алюмокомпозитов на стандартных и конструктивно-подобных образцах рекомендовано применение в структуре СИАЛ листов из алюминий-литиевых сплавов, отличающихся пониженной плотностью и повышенным модулем упругости, высокими долговечностью, огнестойкостью и огнестойкостью.

Таблица 6 – Значения характеристик материалов для обшивок панелей крыла (продольное направление)

| Характеристики | Слоистый алюмокомпозит (экспериментальное (min – max) / расчетное значение) | Лист толщиной 5 мм из сплава В950чТ2 (экспериментальное (min – max) значение) |
|--|---|---|
| Плотность d , кг/м ³ | (2451–2452) / – | 2850 |
| Временное сопротивление σ_b , МПа | (710–730) / 708 | 510–520 |
| Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа | (450–460) / 431 | 430–440 |
| Относительное удлинение δ , % | (4,0–4,2) / 4,0 | 11,0–11,5 |
| Модуль упругости E , ГПа | (68–70) / 68 | 70–72 |
| Удельная прочность σ_b/d , км | (29,0–29,8) / 29,5 | 17,9–18,3 |
| СРТУ (d/dN), мм/цикл (при $\Delta K=31,0$ МПа·м ^{1/2}) | (0,15–0,20) / – | 2,3–2,7 |
| МЦУ: $N_{ср}$, цикл ($f=5$ Гц, $\sigma_{max}=157$ МПа) | (200–220) / – | 180–200 |
| Нагрузка потери устойчивости P_{max} , кг | Четырехстрингерный образец (445,5×600 мм) | |
| | 186 000–188 000* | 157 000** |

2 Примечания

* Экспериментальные значения, полученные при испытаниях двух конструктивно-подобных образцов из гибридной панели крыла, с расчетным значением нагрузки потери устойчивости $P_{max} = 186 000$ кг

** Расчетное значение для образца из монолитной панели сплава В950чТ2

Определены возможные области применения алюмокомпозитов на базе алюминий-литиевых сплавов в конструкциях авиационной техники, таких как обшивки панелей отсеков фюзеляжа, противопожарные перегородки, дублиеры обшивок в зонах иллюминаторов, стыковочные ленты соединений отсеков, стенки перегородок, дублиеры окантовок дверных проемов, обшивки панелей крыла.

На основании изучения закономерностей формирования структурно-фазового состояния алюминий-литиевого сплава 1441 в слитках при различных режимах гомогенизации и в листах при прокатке и термической обработке, разработки способа подготовки поверхности листов под склейку в комбинированном по составу электролите, исследований, в том числе с применением математического моделирования, влияния состава и структуры алюмокомпозитов на их физико-механические свойства, разработаны технологические процессы изготовления отдельных металлических и полимерных составляющих (тонких листов из сплава 1441, композитов с применением доработанного клеевого связующего в сочетании с высокомодульным стеклорвингом) и режимы автоклавного формования алюмокомпозитов с варьируемыми физико-механическими свойствами.

Полученный значительный объем научно обоснованных экспериментальных и расчетных данных позволяет трактовать результаты данной работы как научно-технологические основы создания слоистых алюмополимерных материалов.

Основные выводы по работе

1. Разработаны научно-технологические основы получения слоистых алюмопластиков СИАЛ нового поколения с варьируемыми физико-механическими характеристиками на базе листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков из клеевых препрегов, что позволило создать слоистые металлополимерные материалы, обладающие улучшенными физико-механическими свойствами: временным сопротивлением $\sigma_b=600-1200$ МПа, плотностью $d=2300-2400$ кг/м³, модулем упругости $E=65-72$ ГПа, низкой скоростью роста трещины усталости $dl/dN=0,15-0,20$ мм/цикл при $\Delta K=31,0$ МПа·м^{1/2} и обеспечивающие температуру эксплуатации до 120 °С.

2. Алюмопластики нового поколения превосходят:

- алюмопластики на базе листов сплава Д16 по плотности на 8–10 %, по модулю упругости на 9–11 %, по удельной прочности на 12–16 % и имеют повышенную на 40 °С температуру эксплуатации;

- монолитные листы тех же толщин из традиционных алюминиевых сплавов по прочностным и усталостным характеристикам на 28–30 % и 12–15 % соответственно и более чем в 10 раз по трещиностойкости.

3. Установлены особенности формирования структурно-фазового состояния в слитках и листах из алюминий-литиевого сплава 1441 в зависимости от режимов термической обработки, определены оптимальные технологические параметры, обеспечивающие получение на ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» методом холодной рулонной прокатки тонких листов толщиной 0,25 мм с требуемым для применения в СИАЛ уровнем механических и коррозионных свойств.

3.1. Исследовано влияние температурно-временных параметров гомогенизации и деформации на технологическую пластичность плоских слитков из сплава 1441. Разработан двухступенчатый режим гомогенизации (400–450 °С, 4–8 ч + 500–550 °С, 14–20 ч), обеспечивающий ускорение процессов растворения избыточных эвтектических фаз на границах дендритов и формирование оптимального структурно-фазового состояния слитка с плотностью распределения сферических композиционных частиц дисперсоидов (β' -фаза с оболочкой из δ' -фазы) не более $6,0 \cdot 10^{10}$ 1/мм³ при содержании первичных эвтектических фаз в слитке менее 1 %, что обеспечивает повышение технологической пластичности слитков ($\delta_5 > 120$ %) в интервале температур горячей прокатки 430–470 °С, а также при холодной прокатке листов.

3.2. Разработан трехступенчатый режим старения Т12: температурный интервал $T=150-200$ °С, суммарное время $\tau=25-30$ ч ($T_I > T_{II} < T_{III}$, $\tau_I < \tau_{II} > \tau_{III}$), обеспечивающий оптимальное сочетание механических и коррозионных свойств листов толщиной 0,25 мм из сплава 1441: $\sigma_b=415-435$ МПа, $\sigma_{0,2}=320-325$ МПа, $\delta=8,5-14,5$ % (в продольном направлении), РСК: 2–3 балла – для использования в составе алюмопластиков СИАЛ.

4. Уточнен химический состав комбинированного электролита для анодирования поверхности листов из алюминий-литиевых сплавов, не содержащий токсичные соединения Cr^{6+} , обеспечивающий повышенные на 8–14 % адгезионные и прочностные характеристики в клеевых соединениях

слоистых алюмокомпозитов за счет получения анодного слоя с более развитым рельефом.

5. Определено, что максимальные упруго-прочностные характеристики композита и адгезионные свойства по границам поверхностей «композит–металл» в СИАЛ достигаются при объемном содержании клеевого связующего в препреге 30–35 %.

6. Обосновано соотношение компонентов в рамках марочной рецептуры клеевого связующего на основе смеси эпоксидных олигомеров (дианового хлорсодержащего и азотсодержащего), полисульфона и отвердителя ароматического типа, обеспечивающее оптимальные значения динамической вязкости в интервале температур 90–120 °С, что при автоклавном формовании алюмокомпозитов при давлении P_{ϕ} , температуре $T_{\phi}=170–180$ °С и времени выдержки при формовании t_{ϕ} , с обязательной стадией прогрева, создает условия для полимеризации клеевых препрегов и не приводит к изменению структурно-фазового состояния и свойств листов из алюминий-литиевых сплавов, позволяя получить стабильные характеристики алюмокомпозитов.

7. Разработаны технологические режимы автоклавного формования, совмещающие процессы полимеризации клеевых связующих в препрегах алюмокомпозита СИАЛ и формообразования поверхности деталей, позволяющие изготавливать элемент конструкции за один технологический цикл с дальнейшей минимальной механической обработкой – фрезерованием по контуру. Внедрены на авиационном предприятии ПАО «ВАСО» технологии изготовления деталей из алюмокомпозитов методом автоклавного формования.

8. Разработана и подтверждена экспериментальными данными со сходимостью 85–90 % математическая модель расчета механических характеристик алюмокомпозитов СИАЛ, учитывающая межслойные внутренние остаточные напряжения, возникающие в процессе формования алюмокомпозитов.

9. Определены особенности распространения усталостных трещин в СИАЛ: начало зарождения трещин в наружных металлических листах алюмокомпозита происходит раньше, чем в монолитных алюминиевых листах – на стадии 20–30 % от числа циклов до полного разрушения образца, с дальнейшим послойным разрушением с существенным замедлением скорости развития трещин, обусловленным изменением их траектории в слоях композита. Скорость роста трещины усталости в слоистых алюмокомпозитах ниже более чем в 10 раз, по сравнению с листами из традиционных алюминиевых сплавов Д16 и 1163.

10. Показано, что выбранное клеевое связующее ВСК-14-2МР для клеевого препрега на ровинге обеспечивает снижение в 3 раза интенсивности сорбции влаги в алюмокомпозите по сравнению с ранее используемым клеевым связующим ВСК-14-1 в алюмокомпозитах на основе клеевого препрега на ткани.

11. Показано, что антикоррозионная защита внешних и торцевых поверхностей деталей из слоистых алюмокомпозитов СИАЛ по схеме «грунт + эмаль горячей сушки» обеспечивает высокую стойкость материалов

к воздействию атмосферных факторов, в том числе в условиях умеренно теплого климата приморской зоны, что подтверждено результатами натуральных коррозионных испытаний в ГЦКИ ВИАМ в течение 1 года.

12. При испытаниях по оценке огнестойкости и огнестойкости материалов в соответствии с разработанным СТО 1-595-20-532–2017 установлены преимущества алюмокомпозитов по огнестойкости в сравнении с традиционными конструкционными материалами: время прогорания СИАЛ увеличивается в 7–10 раз за счет возникновения абляционного эффекта с образованием парогазовых продуктов и коксованием слоев композита в процессе термодеструкции, что исключает прогорание СИАЛ при воздействии пламени с температурой 1100 °С в течение 15–30 мин и обеспечивает температуру на тыльной стороне алюмокомпозита 160–220 °С.

13. Показаны преимущества по молниестойкости образцов из СИАЛ применительно к верхним панелям топливных баков. Зоны поражений от удара молнией в алюмокомпозитах толщиной 1,0–1,3 мм ограничиваются повреждением только наружного металлического слоя и сопоставимы с молниестойкостью монолитных панелей из листов сплава 1441 толщиной 2,5 мм.

14. Установлены технологические параметры формообразования, гибки, механической обработки (резки, фрезерования, сверления отверстий) СИАЛ, позволяющие с использованием стандартного оборудования, применяемого для формообразования алюминиевых листов, изготавливать детали требуемой конфигурации из алюмокомпозитов при сохранении структуры и физико-механических характеристик материала.

15. Разработаны схемы сращивания металлических листов в алюмокомпозитах СИАЛ с обеспечением равнопрочных стыков, позволяющие изготавливать детали требуемых габаритов, ограничивающихся размерами внутреннего пространства автоклава (габариты автоклава на ПАО «ВАСО» – ширина 3 м, длина 16 м).

16. Стендовые сравнительные испытания конструктивно-подобных образцов, изготовленных с использованием слоистых алюмокомпозитов и традиционных материалов, с оценкой по весовым и ресурсным характеристикам показали:

- применение обшивки из алюмокомпозита СИАЛ-3-1Р в конструктивно-подобных образцах панели отсека фюзеляжа обеспечивает преимущества по усталостной долговечности в 2 раза по сравнению с панелью с обшивкой из листов 1163АТВ;

- применение обшивки из слоистого алюмокомпозита на базе листов из алюминий-литиевых сплавов в конструктивно-подобных образцах фрагмента гибридной панели крыла обеспечивает повышение весовой эффективности обшивки крыла на 11,3 % и увеличение несущей способности элементов конструкции при сжатии на 20 % по сравнению с КПО с обшивкой из листов алюминиевого сплава В950чТ2;

- применение огнестойкого легкого слоистого алюмокомпозита СИАЛ-2-1Р в конструктивно-подобных образцах прототипа створки капота двигателя вертолета обеспечивает снижение массы капота двигателя

на ~20 % по сравнению с конструкцией створки капота из титанового сплава ОТ4-1 и огнестойкость при 1100 °С в течение более 15 мин.

17. С учетом выявленных закономерностей влияния технологических режимов изготовления на структуру и свойства алюмокомпозитов, а также металлических и полимерных составляющих, разработана нормативная документация на изготовление и поставку материалов (листов сплава 1441 и алюмокомпозитов), рекомендации по применению и конструированию деталей из слоистых металлополимерных композиционных материалов, методики испытаний стандартных образцов и конструктивно-подобных образцов (ТУ – 7 шт., ТР – 18 шт., ТИ – 3 шт., ММ – 1 шт., СТО – 1 шт.). Получено 9 патентов.

Список публикаций по теме диссертации

1. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 45–53.

2. Антипов В.В., Оглодкова Ю.С., Селиванов А.А., Лукина Е.А., Зайцев Д.В. Влияние температурно-временных параметров ступенчатого старения на структуру, фазовый состав, механические и коррозионные свойства листов из сплава 1441 // Металлы. 2020. № 6. С. 12–21.

3. Solyaev Y., Lurie S., Prokudin O., Antipov V., Rabinskiy L., Serebrennikova N., Dobryanskiy V. Elasto-plastic behavior and failure of thick GLARE laminates under bending loading // Composites Part B: Engineering. 2020. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108302.

4. Антипов В.В., Коновалов А.Н., Серебренникова Н.Ю., Сомов А.В., Нефедова Ю.Н. Влияние структуры на огнестойкость и огнестойкость алюмокомпозитов класса СИАЛ и возможности применения данных материалов в авиастроении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. № 1 (73). Ст. 5. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2020) DOI: 18577/2307-6046-2019-0-1-40-46.

5. Антипов В.В., Прокудин О.А., Лурье С.А., Серебренникова Н.Ю., Соляев Ю.О., Коновалов А.Н. Оценка межслоевой прочности алюмокомпозита по результатам испытаний образцов на трехточечный изгиб // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 229–238.

6. Антипов В.В., Ткаченко Е.А., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Овсянников Б.В. Влияние режимов гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и механические свойства слитков из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. № 3 (75). Ст. 5. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52.

7. Антипов В.В., Курс М.Г., Гирш Р.И., Серебренникова Н.Ю. Натурные климатические испытания металлополимерных композиционных материалов типа СИАЛ в морском климате // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 56–64. DOI: 10.18577/2107-9140-2019-0-4-56-64.

8. Антипов В.В., Чесноков Д.В., Козлов И.А., Волков И.А., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевого сплава В-1469 перед применением в составе слоистого гибридного материала // Труды ВИАМ:

электрон. науч.-техн. журн. 2018. № 4 (64). Ст. 7. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.

9. Антипов В.В., Котова Е.В., Серебренникова Н.Ю., Петрова А.П. Клеевые связующие и клеевые препреги для алюмополимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. № 5 (65). Ст. 6. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 10.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-44-54.

10. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Козлова О.Ю., Пантелеев М.Д., Осипов Н.Н., Клычев А.В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. № 10. Ст. 3. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.

11. Антипов В.В., Добрянский В.Н., Короленко В.А., Лурье С.А., Серебренникова Н.Ю., Соляев Ю.О. Оценка эффективных механических характеристик слоистого алюмокомпозитного материала в условиях одноосного растяжения // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 221–229.

12. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.

13. Антипов В.В. Современные алюминиевые сплавы для авиакосмической техники // Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России: сб. докл. II Междунар. науч.-техн. конф. (посвящается 85-летию со дня основания ФГУП «ВИАМ» – ведущего материаловедческого центра страны). Москва. 2017. С. 1.

14. Betsofen S.Ya., Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Dolgova M.I., Kabanova Yu.A. Phase composition, texture, and anisotropy of the properties of Al–Cu–Li–Mg alloy sheets // Russian metallurgy (Metally). 2017. No. 10. P. 831–837.

15. Antipov V.V., Serebrennikova N.Y., Senatorova O.G., Morozova L.V., Lukina N.F., Nefedova Y.N. Hybrid laminated materials with slow fatigue-crack development // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. No. 3. P. 195–199.

16. Podzhivotov N.Y., Kablov E.N., Antipov V.V., Erasov V.S., Serebrennikova N.Y., Abdullin M.R., Limonin M.V. Laminated metal-polymeric materials in structural elements of aircraft // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. 8 (2). P. 211–221.

17. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-195-211.

18. 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: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-212-224.

19. Антипов В.В. Перспективы развития легких сплавов для изделий авиационно-космической техники // Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов: сб. докл. науч.-техн. конф. Москва. 2016. С. 1.

20. Антипов В.В., Сидельников В.В., Самохвалов С.В., Шестов В.В., Нефедова Ю.Н., Лялин А.А. Возможности применения слоистого

алюмокомпозитного пластика в обшивке фюзеляжа самолета // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1. С. 77–82.

21. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Сенаторова О.Г., Морозова Л.В., Лукина Н.Ф., Нефедова Ю.Н. Гибридные слоистые материалы с небольшой скоростью развития усталостной трещины // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 45–49.

22. Шестов В.В., Рябов Д.К., Антипов В.В. Коррозионная стойкость и механические свойства слоистого конструкционного материала на основе тонких листов алюминиевых сплавов и композитного пластика // Металлург. 2016. № 11. С. 81–85.

23. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые композиты на их основе // Цветные металлы. 2016. № 8 (884). С. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13

24. Шестов В.В., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н. Высокопрочный слоистый материал на основе листов из алюминий-литиевого сплава // Технология легких сплавов. 2016. № 1. С. 119–123.

25. Антипов В.В., Лукина Е.А., Сенаторова О.Г., Серебренникова Н.Ю., Сбитнева С.В. Влияние дополнительных нагревов на структуру и механические свойства листов из Al-Li сплава 1441, входящих в состав слоистых гибридных панелей // Технология легких сплавов. 2016. № 4. С. 35–40.

26. 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: 10.18577/2107-9140-2016-0-3-3-8.

27. Бецофен С.Я., Антипов В.В., Князев М.И. Сплавы систем Al–Cu–Li и Al–Mg–Li фазовый состав, текстура и анизотропия механических свойств (обзор) // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 11. С. 10–26.

28. Antipov V.V., Oreshko E.I., Erasov V.S., Serebrennikova N.Y. Hybrid laminates for application in north conditions // Mechanics of Composite Materials. 2016. Vol. 52. No 5. P. 687–698.

29. Betsofen S.Y., Grushin I.A., Knyazev M.I., Antipov V.V., Khokhlatova L.B., Alekseev A.A. Effect of the composition of al-li alloys on the quantitative relation between the $\delta'(Al_3Li)$, $S_1(Al_2MgLi)$, and $T_1(Al_2CuLi)$ phases // Russian metallurgy (Metally). 2015. No 1. P. 51–58.

30. Shestov V.V., Antipov V.V., Senatorova O.G., Sidelnikov V.V. Structural laminate aluminum-glass-fiber materials 1441-SIAL // Metal Science and Heat Treatment. 2014. Vol. 55. No. 9–10. P. 483–485.

31. Гречников Ф.В., Антипов В.В., Ерисов Я.А., Гречникова А.Ф. Повышение технологичности композитов путем формирования в листах из сплава В95 эффективной кристаллографической текстуры // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. № 6. С. 38–43.

32. Антипов В.В. Вклад Е.И. Кутайцевой в создание высокопрочных алюминиевых сплавов и научные задачи для разработки легких материалов нового поколения // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн. 2014. № 6. Ст. 8. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 12.11.2019).

33. Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Конструкционные слоистые алюмокомпозиты 1441-СИАЛ // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 9 (699). С. 28–31.
34. Скорняков В.И., Антипов В.В., Семовских С.В. Развитие металлургического производства каменск-уральского металлургического завода для полуфабрикатов из новых алюминиевых сплавов // *Цветные металлы*. 2013. № 9 (849). С. 30–33.
35. Антипов В.В., Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Сенаторова О.Г. Опыт применения Al-Li-сплава 1441 и слоистых материалов на его основе в гидросамолетах // *Цветные металлы*. 2013. № 9 (849). С. 46–50.
36. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и TU Delft // *Цветные металлы*. 2013. № 9 (849). С. 50–53.
37. Antipov V.V. Efficient aluminum-lithium alloys 1441 and layered hybrid composites based on it // *Metallurgist*. 2012. Vol. 56. No. 5-6. P. 342–346.
38. Антипов В.В., Старцев О.В., Сенаторова О.Г. Закономерности влагопереноса в СИАЛ // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. № 3. С. 13–18.
39. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Шестов В.В. Конструкционные слоистые материалы СИАЛ // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2012. № 6. С. 13–17.
40. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 226–230.
41. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 157–167.
42. Антипов В.В. Технологичный алюминий-литиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе // *Цветная металлургия*. 2012. № 5. С. 36.
43. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. № S2. С. 174–183.
44. Старцев О.В., Кротов А.С., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Антипов В.В., Гращенков Д.В. Сорбция и диффузия влаги в слоистых металлополимерных композиционных материалах типа «СИАЛ» // *Материаловедение*. 2011. № 12. С. 38–44.
45. Белов Н.А., Антипов В.В., Кайбышев Р.О., Эскин Д.Г. Итоги международной конференции ICAA12 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 9 (675). С. 3–5.
46. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование жаростойкости слоистых гибридных алюмокомпозитов класса СИАЛ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 3 (20). С. 36–41.
47. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Антипов В.В., Зайцев Д.В., Ключкова Ю.Ю. Применение диаграмм фазовых превращений при старении для оптимизации режимов старения в Al-Li-сплавах В-1469, 1441 // *Металлы*. 2009. № 6. С. 60–68.

48. Lukina E.A., Alekseev A.A., Antipov V.V., Zaitsev D.V., Klochkova Y.Y. Application of the diagrams of phase transformations during aging for optimizing the aging conditions for V-1469 and 1441 Al-Li alloys // Russian metallurgy (Metally). 2009. No. 6. P. 505–511.

49. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В., Митраков О.В., Попов В.И., Ершов А.С. Высокопрочные трещиностойкие лёгкие слоистые алюмокомпозиты класса СИАЛ - перспективный материал для авиационных конструкций // Технология легких сплавов. 2009. № 2. С. 28–31.

50. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминий-литиевые сплавы для самолетных конструкций // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 35–38.

51. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Антипов В.В., Сидельников В.В., Гриневиц А.В., Постнов В.И. Слоистые алюмополимерные материалы СИАЛ // Клеи. Герметики, Технологии. 2007. № 5. С. 15–17.

Патенты по теме диссертации:

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Сомов А.В., Сидельников В.В., Нефедова Ю.Н. Огнестойкий слоистый металлокерамический материал и изделие, выполненное из него. Патент 2676637 Рос. Федерация. Оpubл. 09.01.2019.

2. Антипов В.В., Каблов Е.Н., Серебренникова Н.Ю., Лукина Н.Ф., Сенаторова О.Г., Иванов А.Л. Слоистый гибридный композиционный материал и изделие, выполненное из него. Патент 2641744 Рос. Федерация. Оpubл. 22.01.2018.

3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Самохвалов С.В., Сидельников В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В., Нефедова Ю.Н. Способ получения слоистого металлокерамического материала. Патент 2618072 Рос. Федерация. Оpubл. 02.05.2017.

4. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Махсидов В.В., Шестов В.В., Иошин Д.В. Слоистый алюмокомпозит и изделие, выполненное из него. Патент 2600765 Рос. Федерация. Оpubл. 04.10.2016.

5. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Самохвалов С.В., Сенаторова О.Г., Шестов В.В., Сидельников В.В. Способ соединения слоистого алюмокомпозита. Патент 2570469 Рос. Федерация. Оpubл. 10.12.2015.

6. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Шестов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Попов Ю.О. Градиентный металлокерамический материал и изделие, выполненное из него. Патент 2565215 Рос. Федерация. Оpubл. 20.10.2015.

7. Фридляндер И.Н., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Федоренко Т.П., Попов В.И., Панченко П.В. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него. Патент 2349665 Рос. Федерация. Оpubл. 20.03.2009.

8. Каблов Е.Н., Фридляндер И.Н., Антипов В.В., Федоренко Т.П., Ланцова Л.П. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него. Патент 2278179 Рос. Федерация. Оpubл. 20.06.2006.

9. Фридляндер И.Н., Каблов Е.Н., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Каримова С.А., Лямин А.Б., Сидельников В.В. Слоистый композиционный материал и изделие, выполненное из него. Патент 2270098 Рос. Федерация. Оpubл. 20.02.2006.

Отпечатано 100 экз.
Исп. Антипов В.В.
Печ. Антипов В.В.

Автореферат Антипов В.В.

«Научно-технологические основы разработки слоистых алюмопластиков нового поколения с варьируемыми физико-механическими свойствами на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности»

по решению диссертационного совета Д 999.122.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» протокол № 2 от 01.02.2021 г.

Подписано в печать. 2021. Заказ.
Формат бумаги 60×90/16. Печ. л. 2,0. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «СамГТУ».
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.