ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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)

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 2020

Оглавление

Введение 5

Глава 1 Современные тенденции развития деформируемых алюминиевых сплавов и слоистых металлополимерных композиционных материалов на их основе для изделий авиационной техники 16

1.1 Традиционные алюминиевые сплавы 16

1.2 Конструкционные алюминий-литиевые сплавы 18

1.3 Металлополимерные слоистые материалы 26

1.3.1 Алюмоорганопластики 27

1.3.2 Алюмоуглепластики 31

1.3.3 Алюмостеклопластики 33

Выводы по главе 1 42

Глава 2 Объекты и методы исследований 45

2.1 Объекты исследований 45

2.2 Методы исследований 46

2.3 Методика испытания на сжатие фрагмента прототипа гибридной панели крыла с обшивкой из слоистого материала на базе листов из алюминий-литиевых сплавов В-1469 и 1441 56

2.4 Статистическая обработка данных 58

Глава 3 Исследование влияния технологических параметров процессов изготовления на физико-механические свойства металлической составляющей алюмостеклопластиков 60

3.1 Разработка температурно-временных параметров гомогенизации слитков и упрочняющей термической обработки тонких листов (0,25-0,5 мм) из алюминий-литиевого сплава 1441, используемых при изготовлении алюмостеклопластиков 60

3.1.1 Компьютерное моделирование термодинамических процессов фазовых превращений в сплаве 1441 с использованием программного комплекса Thermo-Calc 61

3.1.2 Экспериментальное исследование структуры, фазового состава и технологических характеристик слитков и листовых заготовок из сплава 1441 в зависимости от режимов гомогенизационного отжига 64

3.1.3 Исследование влияния температуры и продолжительности искусственного старения на структуру, механические и коррозионные свойства листов из сплава 1441, разработка режима старения 81

3.2 Структура, механические и коррозионные свойства тонких листов из сплава 1441, состаренных по различным режимам 85

3.3 Исследование влияния нагревов при изготовлении алюмостеклопластиков на структуру и механические свойства листов из алюминий-литиевых сплавов 106

Выводы по главе 3 111

Глава 4 Разработка слоистых структур алюмостеклопластиков на базе алюминий-литиевых сплавов и клеевых препрегов, армированных стекловолокном 115

4.1 Разработка математической модели для прогнозирования механических характеристик слоистых алюмостеклопластиков 115

4.2 Подготовка поверхности листов из алюминий-литиевых сплавов для повышения адгезионных свойств клеевых соединений при изготовлении алюмостеклопластиков 123

4.3 Выбор клеевых связующих и клеевых препрегов для применения в слоистом материале 129

4.4 Разработка технологических режимов изготовления алюмостеклопластиков методом автоклавного формования 143

4.5 Разработка технологии сращивания алюмостеклопластиков для получения крупногабаритных конструкций 147

4.6 Разработка слоистых структур алюмостеклопластиков с заданными требованиями с применением листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 и стеклопластиков 152

Выводы по главе 4 165

Глава 5 Исследование структуры и свойств алюмостеклопластиков 167

5.1 Механические характеристики при растяжении, сжатии и межслоевом сдвиге алюмостеклопластиков 167

5.2 Исследование влияния структуры алюмостеклопластиков на характеристики трещиностойкости и изучение характера разрушения алюмостеклопластиков в зависимости от условий нагружения 179

5.3 Исследование влияния структуры алюмостеклопластиков на их усталостную долговечность 185

5.4 Исследование структуры алюмостеклопластиков 190

5.5 Оценка стойкости слоистого алюмостеклопластика к ударным нагрузкам 192

5.6 Исследование огнестойкости, огненепроницаемости, молниестойкости алюмостеклопластиков 193

5.6.1 Оценка теплофизических характеристик алюмостеклопластиков 193

5.6.2 Оценка огнестойкости алюмостеклопластиков 194

5.6.3 Испытания на огнестойкость и огненепроницаемость слоистых материалов с различными типами клеевого препрега 203

5.6.4 Оценка молниестойкости алюмостеклопластиков 206

5.7 Влияние климатических факторов на влагопоглощение и служебные свойства алюмостеклопластиков 209

5.7.1 Стойкость алюмостеклопластиков к коррозионному воздействию атмосферных факторов 209

5.7.2 Исследование влагонасыщения алюмостеклопластиков 219

Выводы по главе 5 222
Глава 6 Исследование влияния технологических процессов при изготовлении и формообразовании конструктивных элементов на структуру и свойства алюмостеклопластиков 225
6.1 Оценка параметров резки, сверления и гибки листовых заготовок алюмостеклопластиков 225
6.2 Разработка силовой схемы распределения нагрузок слоистой гибридной панели, проектирование 3D модели и изготовление конструктивно-подобных образцов 237
Выводы по главе 6 243
Глава 7 Опробование алюмостеклопластиков в деталях и конструктивно-подобных образцах 244
7.1 Конструктивно-подобный образец панели отсека фюзеляжа самолета с обшивкой из алюмостеклопластика 245
7.2 Створка капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого алюмостеклопластика 246
7.3 Конструктивно-подобный образец фрагмента гибридной панели крыла с обшивкой из алюмостеклопластика 248
Выводы по главе 7 260
Основные выводы по работе 262
Разработанная нормативная документация 268
Список сокращений и условных обозначений 272
Нормативные ссылки 276
Список литературы 283

Введение

Проектирование современных конструкций авиационной техники требует разработки материалов и производственных технологий нового поколения. На основе анализа тенденций развития материаловедения в мире обобщено и спрогнозировано применение новых материалов во всех отраслях отечественной экономики и определены 18 стратегических направлений (включающих 71 научную комплексную проблему), предусматривающих развитие материалов с низкой плотностью и стабильными прогнозируемыми служебными характеристиками для создания перспективных изделий и сверхлегких авиационных конструкций [1, 2].

Эффективность разрабатываемых конструкций связана с прочностными, ресурсными и технологическими характеристиками материалов, их коррозионной стойкостью, обеспечивающими надежность и безопасность эксплуатации авиационных изделий.

Основными широко используемыми материалами в планере самолетов с первой половины прошлого столетия являются алюминиевые сплавы - их масса составляет до 70 % от суммарной массы конструкции планера. Алюминиевые сплавы, легированные литием, каждый процент которого снижает плотность алюминиевого материала в среднем до ~ 3 % и увеличивает модуль упругости ~ на 5 %, являются наиболее перспективными для применения в авиастроении [3, 4].

Разработан ряд алюминий-литиевых сплавов марок 1420, 1424, 1441, В-1469, обладающих уникальным сочетанием физико-механических и коррозионных характеристик: высокими удельной прочностью, модулем упругости и трещиностойкостью, пониженной плотностью, обеспечивающих высокую технологичность при производстве полуфабрикатов и изготовлении деталей.

Алюминий-литиевые сплавы нашли применение в конструкциях самолетов ТАНТК им. Г.М. Бериева, ОКБ им. А.С. Яковлева,

ПАО «Компания «Сухой», ПАО «Туполев», «РСК «МиГ», АНТК «Антонов». Зарубежными компаниями разработаны аналогичные сплавы с литием марок 2094, 2095, 2195, 2099, 2050.

В начале 21 века в силовых элементах планера заметно увеличилось использование неметаллических композиционных материалов, сочетающих пониженную плотность с высоким уровнем характеристик надежности и ресурса.

В России и за рубежом ведутся научные работы по исследованию слоистых металлополимерных композиционных материалов (МПКМ), которые по технологическим и механическим характеристикам сочетают в себе преимущества металлических листов и полимерных слоев, армированных высокопрочными высокомодульными волокнами (арамидными, углеродными, стеклянными).

Разработанные отечественные и зарубежные слоистые металлополимерные материалы, состоящие из чередующихся листов из алюминиевых сплавов и полимерных прослоек (АЛОР и ARALL с использованием арамидных волокон, АЛКАР и CARALL с углеродными волокнами, СИАЛ и GLARE со стеклянными волокнами), позволяют получить композиции, обладающие пониженными плотностью и скоростью развития усталостных трещин, повышенной прочностью по сравнению с монолитными алюминиевыми сплавами.

По ряду показателей (комплексу свойств, стоимости) наиболее перспективными среди МПКМ для применения в изделиях авиационной техники являются слоистые алюмостеклопластики СИАЛ, которые отвечают необходимым конструктивным требованиям и позволяют обеспечить высокую весовую эффективность в сочетании с высокими характеристиками трещиностойкости при безопасности эксплуатации.

За рубежом также большое внимание уделяется исследованию и применению слоистых материалов GLARE, в которых используются листы из алюминиевых сплавов, таких как 2024, 7075 (аналоги отечественных

сплавов Д16 (1163) и В95) и слои стеклопластика, формирующие пакет при изготовлении деталей автоклавным способом. Материалы GLARE используются компанией «Airbus» в конструкции самолета А-380 в качестве обшивок и соединительных лент панелей и отсеков фюзеляжа.

Для дополнительного снижения массы авиационных конструкций в представленной работе в качестве металлических слоев в составе слоистого материала СИАЛ предложено использование листов из алюминий-литиевых сплавов взамен листов из алюминиевых сплавов Д16, 1163, В95.

Разработка научных основ и создание слоистых металлополимерных материалов СИАЛ на базе листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469, сочетающих в себе технологические и механические характеристики металлического материала и стеклопластика, позволит обеспечить преимущества по прочностным, ресурсным и коррозионным характеристикам как перед традиционными монолитными материалами, используемыми в конструкции самолета, так и композиционными материалами на базе традиционных алюминиевых сплавов.

Выявленные на предварительных стадиях исследований преимущества слоистых металлополимерных материалов СИАЛ перед традиционными алюминиевыми сплавами подтверждают своевременность проведения данной работы, отвечающей современным требованиям, предъявляемым к материалам для новых изделий авиационной техники с улучшенными служебными характеристиками – повышенными надежностью и безопасностью эксплуатации, долговечностью и весовой эффективностью.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью разработки научно-технологических основ создания слоистых алюмостеклопластиков нового поколения.

Работа выполнена в соответствии со стратегическими направлениями развития материалов и технологий для авиационной промышленности до 2030 года - 6.2 «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» и 8 «Легкие, высокопрочные

коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения».

Цель работы

Разработка научно-технологических основ получения и создание слоистых алюмостеклопластиков 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 ~ 1 (0,8-1,1); Mg/Li ~ 0,5 (0,35-0,6) при суммарном легировании этими элементами 4,1-5,0 % путем варьирования температурно-временных параметров режимов гомогенизационного 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 алюмостеклопластиках;
- разработка слоистых алюмостеклопластиков 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 алюмостеклопластиков;
- повышение служебных характеристик слоистых алюмостеклопластиков за счет применения высокопрочного клеевого связующего с улучшенными адгезионными характеристиками;
- исследование изменения свойств алюмостеклопластиков после испытаний в натурных климатических условиях;
- разработка технологических режимов изготовления конструктивно-подобных образцов на основе алюмостеклопластиков;
- 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 огненепроницаемости слоистых алюмостеклопластиков;
- разработка нормативной документации применительно к слоистым алюмостеклопластикам нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности.

Научная новизна

1. Разработаны научно-технологические основы получения и созданы слоистые алюмостеклопластики СИАЛ нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и клеевых 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 алюмостеклопластиками 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 $6{,}0\times10^{10}$ 1/мм^3 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 ~ 1 (0,8-1,1); Mg/Li ~ 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, медью (от 0,8 % до 0,22 % Mg, от 1,5 % до 0,01 % Cu, 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 алюмостеклопластиков с учетом остаточных напряжений по границам слоев материалов с разными свойствами в структуре СИАЛ со сходимостью с экспериментальными данными 85-90 %.

8. Установлено, что огненепроницаемость слоистых алюмостеклопластиков обусловлена применением клеевого связующего ВСК-14мР и армирующего наполнителя в виде стеклоровинга в полимерных слоях алюмостеклопластиков, 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 минут.

Практическая значимость

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

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 огненепроницаемость 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 высокомодульными 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

Личный вклад автора состоит в определении направлений исследований, обобщении и систематизации результатов экспериментальных исследований, решении задач по разработке с применением математического моделирования слоистых алюмостеклопластиков нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности со стеклопластиками, 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 алюмостеклопластиков с требуемыми физико-механическими свойствами.

Апробация результатов работы

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

- International Conference on Aluminium Alloys ICAA10, Canada, Vancouver, 2006;
- International Conference «Aluminium Two Thousand», Italy, 2007;
- International Conference ICAA11, Aachen, Germany, 2008;
- International Conference ECAA-1, 7th World Congress, Italy, 2011;
- International Conference ICAA13, USA, Pittsburgh, 2012;
- «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2013;
- «Перспективные высокопрочные алюминиевые сплавы для изделий авиационной, ракетной и атомной техники», 2014;
- «Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2015;
- «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2016;
- «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2016;
- «Адгезионные материалы», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2016;

- «Прочность конструкций летательных аппаратов», г. Жуковский, ФГУП «ЦАГИ», 2016;

- «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2017;

- «Современные достижения в области металловедения, технологий литья, деформации, термической обработки и антикоррозионной защиты легких сплавов», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2017;

- «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания клеев, клеевых связующих и клеевых препрегов», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2018;

- «Прочность конструкций летательных аппаратов», г. Жуковский, ФГУП «ЦАГИ», 2018;

- «Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2019;

- «Климат-2019: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы», г. Геленджик, ГЦКИ, 2019;

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

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

Публикации

Результаты работы отражены в 51 публикации, из них 46 в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 6 статей в Scopus, 4 статьи в Web of Science, в 9 патентах.

Глава 1 Современные тенденции развития деформируемых алюминиевых сплавов и слоистых металлополимерных композиционных материалов на их основе для изделий авиационной техники

1.1 Традиционные алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы нашли широкое применение в авиационных конструкциях благодаря малой плотности, высоким прочностным и коррозионным характеристикам, хорошей технологичности при литье и обработке давлением, что позволяет изготавливать из них полуфабрикаты различной номенклатуры для дальнейшего изготовления деталей требуемых габаритов с необходимыми служебными свойствами [5-11].

В настоящее время имеется большое количество конструкционных алюминиевых сплавов различного назначения (высокопрочные, высокоресурсные, жаропрочные, коррозионностойкие, свариваемые и др.), выбор которых для применения в том или ином элементе конструкции летательного аппарата обусловлен техническими требованиями к комплексу служебных свойств конкретной детали [12-20].

Наиболее востребованными в конструкции планера современных самолетов являются созданные еще в середине прошлого века и впоследствии усовершенствованные сплавы традиционных систем легирования Al-Zn-Mg-Cu и Al-Cu-Mg: высокопрочный типа В95 (В95пч/оч) и высокоресурсный типа Д16 (Д16ч и 1163), изготавливаемые в виде листов, плит, прессованных и кованых полуфабрикатов [21-26].

По своим прочностным и коррозионным свойствам, характеристикам трещиностойкости и ресурса, эти отечественные сплавы и их зарубежные сплавы-аналоги близки между собой (таблица 1.1) [13, 27, 28].

Таблица 1.1 – Характеристики листов из отечественных и зарубежных алюминиевых сплавов-аналогов традиционных систем легирования [13, 27, 28].

Характеристики	Сплав и состояние термической обработки			
	В95очТ2 (РФ)	7475Т7651 (США)	1163Т (РФ)	2524Т351 (США)
Толщина, мм	0,5 – 2,0			
d, кг/м^3	2850	2810	2780	2780
E, ГПа	70	69	71	71
σ_B, МПа (П)	> 450	> 455	> 425	> 420
$\sigma_{0,2}$, МПа (П)	> 380	> 380	> 275	> 275
δ, % (П)	> 8,0^{*1}	> 9,0^{*2}	> 11,0^{*1}	> 15,0^{*2}
МЦУ: $N_{ср}$, кцикл (σ_{max}=157 МПа, f=5 Гц) (Д)	190-230	190-220	190-270	180-250
СРТУ (dl/dN), мм/кцикл, (ΔK=31 МПа·м$^{1/2}$) (ДП)	2,3-2,7	2,3-2,5	1,4-1,7	1,6-2,2

2 Примечания
1- δ на базе l_0=5d_0
2- δ на базе l_0=4d_0

Актуальной задачей перспективного авиастроения служит повышение весовой эффективности, ресурса и надежности планера новых самолетов.

Современными требованиями к конструктивно-технологическим и служебным характеристикам летательных аппаратов отвечают, прежде всего, материалы с низкой плотностью – алюминий-литиевые сплавы и новые композиционные материалы (в том числе, металлополимерные), так как снижение плотности материала вносит наиболее значительный вклад в повышение весовой эффективности конструкции по сравнению с другими характеристиками материалов (рисунок 1.1) [29-34].

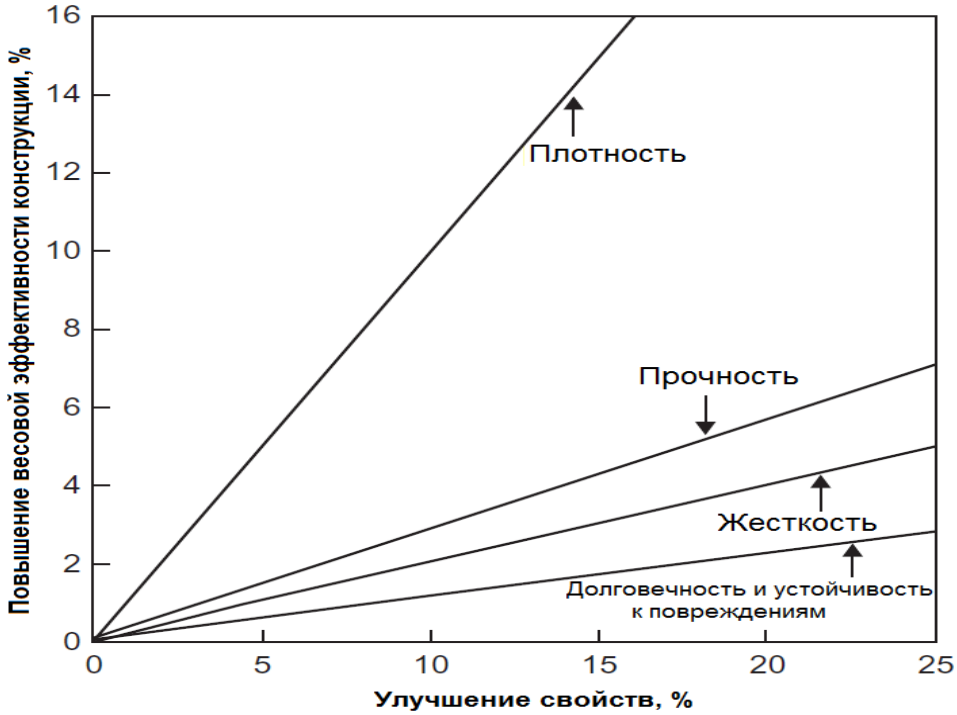


Рисунок 1.1 – Влияние повышения механических свойств и снижения плотности материала на весовую эффективность конструкции [29]

1.2 Конструкционные алюминий-литиевые сплавы

Алюминиевые сплавы, легированные литием, занимают особое положение среди алюминиевых сплавов благодаря их более высокому модулю упругости (E = 76-80 ГПа) и меньшей плотности (d~2470-2600 кг/м^3) по сравнению со сплавами на основе алюминия других систем легирования (E = 69-71 ГПа, d~2780-2880 кг/м^3) при сопоставимых значениях прочности, коррозионной стойкости и усталостной долговечности [14, 30-34]. Однако присутствие в сплавах лития, обладающего повышенной химической активностью, а также значительная насыщаемость водородом существенно ухудшают технологические свойства сплавов при плавке, литье и обработке давлением [35].

Открытие эффекта упрочнения в сплавах системы Al-Mg-Li после закалки и старения академиком Фридляндером И.Н. вместе с группой специалистов ФГУП «ВИАМ» [36, 37] послужило основой для разработки

алюминий-литиевых сплавов [38-44], отработки и освоения в производстве полуфабрикатов с использованием промышленного оборудования ОАО «КУМЗ» [45, 46].

В 1968 году был разработан первый свариваемый коррозионностойкий сплав 1420 (на основе системы Al-Mg-Li), отличающийся от традиционных алюминиевых сплавов пониженной на 13 % плотностью (d = 2470 кг/м^3), повышенным на 10 % модулем упругости (E = 76-80 ГПа) при средних значениях характеристик прочности и пластичности [47].

Сплав 1420 был внедрен в самолетах Як-36, Бе-103, Су-27, многолетняя успешная эксплуатация которых во всеклиматических условиях подтвердила хорошую коррозионную стойкость и преимущества по массе при применении алюминий-литиевых сплавов в летательных аппаратах. Использование сплава 1420 в клепаных конструкциях обеспечило снижение веса до 10-12 %, а в сварных конструкциях – до 20-24 % [10, 35], однако его применение было ограничено размерами листов, изготавливаемых карточной прокаткой.

В ходе дальнейшего развития и усовершенствования сплава 1420 были разработаны его модификации – сплавы второго поколения: 1421, 1424 (конец 90-х гг.) с улучшенными показателями прочности, свариваемости и пластичности [10, 41, 43].

На основе системы Al-Li-Cu-Mg с дополнительным легированием Zr и Ti были разработаны сплавы 1430, 1440 и 1441 с повышенными трещиностойкостью и ресурсными характеристиками наряду с низкой плотностью и повышенным модулем упругости [35, 48-53].

В этот же период в США (Alcoa), Великобритании (Alcan) и Франции (Pechiney) были разработаны алюминий-литиевые сплавы второго поколения: 2090 системы Al-Cu-Li, 8090, 2091, 2195 системы Al-Cu-Li-Mg [29, 30, 54, 55] для замены высокопрочных алюминиевых сплавов типа 7075. Однако эти сплавы не нашли широкого применения в конструкциях из-за

низкой вязкости разрушения и склонности к охрупчиванию под влиянием длительных низкотемпературных нагревов.

В 2001-2005 гг. были разработаны отечественные сплавы повышенной прочности системы Al-Cu-Li третьего поколения: В-1461 (содержащий добавки Mg, Zn, Zr и Sc) и В-1469 (с добавкам Zr, Sc, Mg и Ag) [55-62], а за рубежом сплавы 2050, 2099, 2295 [29, 30, 53, 55, 63]. Эти сплавы отличаются от сплавов предыдущих поколений сбалансированным комплексом свойств (вязкости разрушения, механических характеристик и коррозионной стойкости) за счет увеличения соотношения Cu/Li. Алюминий-литиевые сплавы повышенной прочности используются в высоконагруженных элементах конструкций планера самолетов компаний «Airbus», «Embraer», «Boeing», «Bombardier» [29, 63].

Для получения максимальной весовой эффективности при применении СИАЛ в конструкции необходимо использование тонких металлических листов толщиной ~ 0,25-0,5 мм в структуре алюмостеклопластиков. Необходимо учитывать, что получение рулонной прокаткой листов всей гаммы алюминий-литиевых сплавов представляет трудности [35, 64]. Исключение составляют сплавы 1441 и В-1469, обладающие наиболее приемлемым комплексом технологических свойств, что позволяет получать из них листы толщиной 0,25-0,5 мм методом рулонной прокатки.

Свойства традиционных алюминиевых сплавов, сплавов с литием (В-1461, В-1469 и 1441) [10, 14, 32, 40, 44, 53, 65] и их зарубежных аналогов (2199, 2195, 8090) [17, 27, 29] представлены в таблице 1.2. Следует отметить, что химический состав сплава 1441 с соотношением Cu/Li ~1 существенно отличается от сплава 8090 (соотношение Cu/Li ~0,4-0,7), чем должно быть обусловлено их различие по структуре, фазовому составу, а, следовательно, и по комплексу свойств, поэтому, вопреки мнению некоторых авторов, сплав 8090 не следует относить к аналогам сплава 1441.

Таблица 1.2 – Сравнительная оценка физико-механических характеристик листов из алюминиевых сплавов минимально возможных толщин [10, 14, 17, 27, 29, 32, 40, 44, 53, 65]

Марка сплава	Система легирования	Плотность, кг/м^3	Минимальная толщина листа, мм	Удельная прочность, км	Механические свойства (поперечное направление)			
					σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	E, ГПа
1163АТ	Al-Cu-Mg-Mn	2780	0,3	14,6	≥405	≥270	≥13	67,1
2524Т3 [1]		2780	0,8	14,6	≥407	≥267	≥15	71,0
В95пчАТ2	Al-Zn-Mg-Cu-Mn-Cr	2850	0,5	16,1	≥ 450	≥380	≥8	68,0
7475Т76 [1]		2810	1,0	16,2	≥455	≥380	≥9	69,0
1420ТГ1	Al-Mg-Li-Zr-Be	2470	1,2	17,0	≥412	≥255	≥8	74,8
1424БТГ1	Al-Mg-Li-Zn-Zr-Sc-Mn	2545	1,6	18,0	≥455	≥450	≥9	80,0
В-1461БТ1	Al-Cu-Li-Mg-Zn-Mn-Zr-Sc	2630	0,8	19,7	≥510	≥450	≥9	79,0
2199Т83 [1]		2640	3,0	16,0	≥430	≥340	≥8	78,0
В-1469Т1	Al-Li-Cu-Mg-Ag-Sc-Zr	2670	0,5	22,0	≥580	≥540	≥8	79,0
2195Т8Р78 [1]		2710	0,8	21,0	≥575	≥530	≥8	76,0
1441БТ11	Al-Li-Cu-Mg-Zr	2600	0,5	15,7	≥400	≥305	≥8	78,4
8090Т8Х51 [1]		2540	0,6	17,3	≥412	≥280	≥9	79,5

Примечание - Зарубежные сплавы-аналоги (по применению)

Наиболее приемлемым для использования в структурах СИАЛ является сплав 1441, обладающий по сравнительной оценке с алюминиевыми сплавами традиционных систем и другими алюминий-литиевыми сплавами, необходимым комплексом прочностных и технологических характеристик [10, 13, 65].

Усовершенствованный состав этого сплава и технологические параметры изготовления, позволяющие получать методом рулонной прокатки тонкие листы толщиной 0,25-0,50 мм, были разработаны при непосредственном участии диссертанта [65].

Детали из сплава 1441 в авиационных конструкциях могут быть изготовлены из листов в различных состояниях термической обработки при помощи различных операций формообразования (рисунок 1.2).

Штамповка и отбортовка

Гибка и отбортовка

Штамповка и гибка

Штамповка и гибка

Рисунок 1.2 – Примеры изготовления деталей из листов толщиной 1,0 мм алюминий-литиевого сплава 1441, полученных различными методами формообразования

В сравнении с другим более прочным сплавом В-1469 (с добавками серебра и скандия), для которого также освоена рулонная прокатка тонких листов (толщиной до ≥ 0,5 мм), сплав 1441 является более экономичным, т.к. не содержит добавки серебра и скандия.

Закономерности формирования структуры и свойств холоднокатаных листов толщиной 0,5-2,0 мм из высокопрочного высокомодульного с пониженной плотностью (d = 2670 кг/м^3) сплава В-1469 и исследования по разработке режимов гомогенизации слитков и упрочняющей термической обработки холоднокатаных листов подробно изучены и отражены в работах [60-62, 66-69], выполненных под руководством и при участии диссертанта. Показано, что наличие серебра усиливает выделение дисперсных упрочняющих фаз при искусственном старении для повышения статической прочности, а присутствие скандия и циркония в составе сплава обеспечивает получение мелкозернистой структуры [39, 57, 69]. Важным преимуществом сплава В-1469 перед другими высокопрочными сплавами является его повышенная жаропрочность и свариваемость.

Режим искусственного старения листов из сплава В-1469, разработанный в процессе исследований кинетики структурно-фазовых превращений при термической обработке, обеспечивает повышение трещиностойкости при незначительном снижении статической прочности, благодаря чему вязкость разрушения и скорость развития трещин усталости близки к уровню сплава 1163Т [57, 60-62]. Технологические характеристики сплава позволяют изготавливать листы толщиной не менее 0,5 мм в промышленных условиях ОАО «КУМЗ» [55, 59, 71].

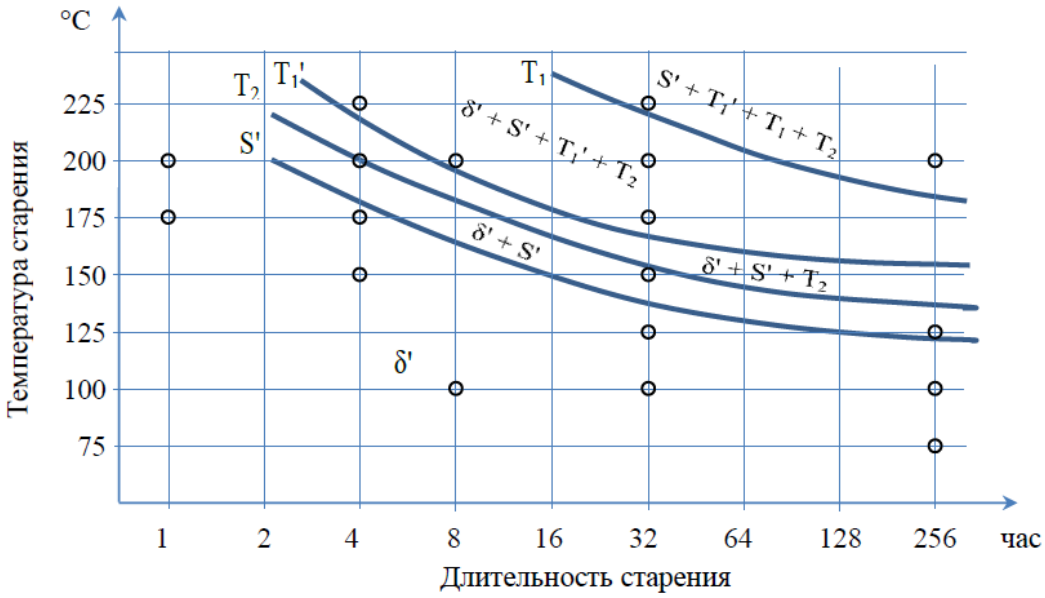
Полуфабрикаты из сплава В-1469 по комплексу коррозионных и прочностных свойств не уступают аналогам - зарубежным сплавам системы Al-Cu-Li (2195, 2098, 2198) [13, 29, 69].

Известно, что алюминий-литиевые сплавы отличаются сложностью структурных и фазовых превращений, проходящих в процессе

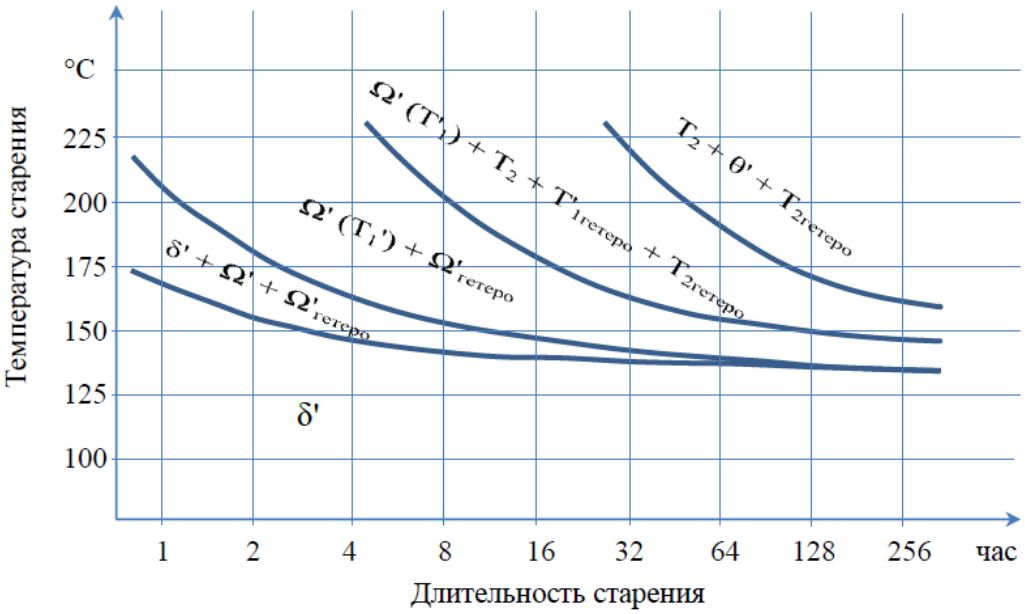
гомогенизации слитков, горячей деформации и термической обработки полуфабрикатов.

В многокомпонентных алюминий-литиевых сплавах, наряду с известными для традиционных систем Al-Cu и Al-Cu-Mg вторичными фазами θ′′, θ′ (Al_2Cu) и S′, S (Al_2CuMg), в процессе технологических нагревов и при термической обработке возникает целый ряд новых фаз: когерентная упорядоченная δ′ (Al_3Li), S_1 (Al_2MgLi), T_1 (Al_2CuLi), квазикристаллическая фаза T_2 (Al_6CuLi_3) [27, 31, 41, 66, 67, 70-72]. Во всех цирконийсодержащих сплавах при гомогенизации выделяется дисперсоид β′ (Al_3Zr), который является антирекристаллизатором в деформированных полуфабрикатах, а межфазная граница между β′ и матрицей служит местом зарождения δ′-фазы. Присутствие частиц дисперсоида содействует однородному скольжению дислокаций при деформации, а, следовательно, оказывает положительное влияние на однородность структуры и механические свойства полуфабриката [9, 72, 73].

Технологические, механические и коррозионные свойства полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов высокочувствительны к составу и количеству вышеуказанных интерметаллидных частиц, а также к их микроструктурным параметрам (размеру, морфологии, характеру распределения частиц в объеме зерен), существенно зависящим от режимов термической обработки, вида и габаритов полуфабриката. В связи с этим диаграммы фазовых превращений при старении (ДФПС), построенные по результатам ранее проведенного исследования кинетики одноступенчатого старения листов толщиной 2 мм (рисунок 1.3) [67, 72], не могут без существенных уточнений обеспечить выбор многоступенчатых режимов старения, позволяющих получить (по данным [27, 30]) требуемый комплекс свойств, и сократить продолжительность процесса старения.



а



б

Рисунок 1.3 – ДФПС сплавов 1441 (а) и В-1469 (б) [68]

Несмотря на высокую технологичность, по сравнению с другими алюминий-литиевыми сплавами, при холодной рулонной прокатке листов из сплава 1441 до толщины 0,25-0,3 мм возникали многочисленные поперечные разрывы кромок листов из-за неоднородности структуры и недостаточной пластичности материала.

Одной из важнейших задач для изготовления тонких листов из сплава 1441, решаемых в представленной работе, является повышение пластичности слитков за счет подбора режимов гомогенизации с получением оптимального структурно-фазового состояния.

1.3 Металлополимерные слоистые материалы

Для снижения плотности материалов с повышением характеристик трещиностойкости и ресурса в последние годы проводятся исследования слоистых металлополимерных композиционных материалов применительно к конструкциям деталей из листовых полуфабрикатов [74-82].

Слоистые МПКМ представляют собой материалы с чередованием металлических листов и полимерных слоев.

Аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы по слоистым алюмополимерным материалам показал, что применение слоистых материалов в изделиях авиационной техники позволит обеспечить снижение веса конструкции, повышение ресурса, увеличение межремонтного периода эксплуатации.

В пятидесятые годы прошлого века началось освоение технологий изготовления сложных клееных конструкций самолета F-27 Friendship компании «Fokker» из стеклопластиков (нервюры, носки, хвостовики крыла, законцовки) [83].

Главной задачей при разработке слоистых материалов было снижение веса, повышение технологичности и ресурсных характеристик конструкции. Снижение массы конструкции влияет на эксплуатационные и экономические характеристики самолета, обеспечивая увеличение дальности полетов и количество пассажиромест.

В России и за рубежом уделяется большое внимание разработке конструируемых композиционных материалов, обладающих широким диапазоном физико-механических характеристик, отработке

технологических режимов изготовления полуфабрикатов и деталей для использования в авиационных конструкциях.

1.3.1 Алюмоорганопластики

Композиционный материал ARALL (**AR**amid **AL**uminium **L**aminate) представляет собой слоистый материал с чередующимися алюминиевыми листами толщиной (0,2÷0,4) мм и однонаправленным или равнопрочным препрегом с органическими волокнами (рисунок 1.4). ARALL разработан специалистами Делфтского технологического университета в 1978 году [84-91].

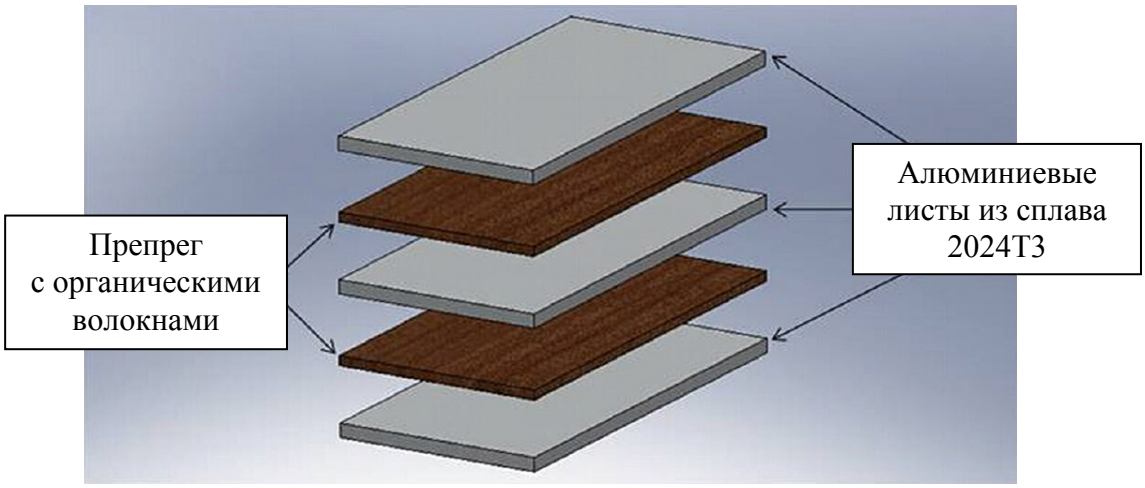


Рисунок 1.4 – Схема материала ARALL структуры 3/2: 3 листа алюминиевого сплава и 2 слоя препрега с органическими волокнами [84]

Известны два вида ARALL с органическими волокнами: ARALL 7075 и ARALL 2024 с применением алюминиевых листов из сплавов 7075Т6 и 2024Т3. В таблице 1.3 приведены сравнительные характеристики механических свойств слоистых ARALL и листов из конструкционных материалов.

Таблица 1.3 – Сравнительные характеристики механических свойств слоистых ARALL и листов из конструкционных материалов [84]

Прочностные и физические характеристики	Слоистый ARALL структуры 3/2 с применение листов из сплава		Лист из алюминиевого сплава	
	2024	7075	2024Т3	7075Т6
σ_B, МПа	590	735	470	560
$\sigma_{0,2}$, МПа	380	635	360	480
$\sigma_{0,2}^c$, МПа	255	355	270	480
E, ГПа	70	69	72	72
δ, %	2,4	1,9	17,0	11,0
d, кг/м^3	2450	2350	2780	2810

При изготовлении и испытании образцов и КПО были отмечены следующие недостатки материала ARALL [83, 85, 92]:

- сложности обработки резанием за счет высокой прочности и вязкости разрушения арамидных волокон;

- повышенное насыщение влагой материала ввиду пористой структуры органоволокон, приводящее к расслоениям и снижению коррозионной стойкости;

- при испытании образцов на сжатие наблюдались послойные расслоения по границам арамидных волокон, что ограничивает применение материала в деталях сложно-напряженного состояния;

- ограничение применения материала с использованием в структуре арамидных волокон ввиду более высокой стоимости по сравнению со стекловолокном.

Использование алюмоорганопластиков ARALL в опытных зарубежных самолетах Fokker 27, Fokker 100 и самолетах Boeing C-17, Boeing C-130 в обшивках отсеков фюзеляжа и крыльевых органов управления не нашли

перспективы из-за ряда отмеченных выше недостатков, включая экономические причины [83, 93].

В 70-х годах разработаны в ВИАМе российские слоистые МПКМ первого поколения АЛОР (**АЛ**юминий + **ОР**ганопластик), содержащие, аналогично материалам ARALL, прослойки органопластика с армирующими волокнами [81, 94]. Разработанные материалы АЛОР обладают повышенной прочностью и стойкостью к ударным нагрузкам, повышенными ресурсными характеристиками - пониженной в 5-20 раз скоростью роста усталостных трещин, повышенной в 1,2 раза усталостной долговечностью по сравнению с полуфабрикатами из алюминиевых сплавов (таблица 1.4) [81, 94].

Таблица 1.4 – Сравнительные характеристики физико-механических свойств материалов АЛОР и листов из алюминиевого сплава Д16чАТ [81, 94]

Физико-механические характеристики	АЛОР Д16/41Н (одно-направленный)	АЛОР Д16/41 (ортотропно-армированный)	Лист из сплава Д16чАТ
Плотность d, кг/м^3	2250	2350	2780
Временное сопротивление σ_B, МПа	700	450	415
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	500	350	275
Модуль упругости при растяжении E, ГПа	69	62	72
Малоцикловая усталость (МЦУ) при σ_{max} = 157 МПа, кцикл	Более 200	120	120
Скорость роста трещины усталости dl/dN, мм/кцикл (при ΔK=31 МПа·м$^{1/2}$)	0,1	0,2	2,0

1 Примечание – Свойства приведены для материалов АЛОР Д16/41 и АЛОР Д16/41Н с различным расположением арамидных волокон в слоях органопластика

По оценке воздействия климатических факторов на образцы из материалов АЛОР с герметизацией торцевых поверхностей при длительной выдержке в условиях теплого влажного климата, коррозионную стойкость АЛОР можно признать удовлетворительной, аналогично стойкости конструкционных алюминиевых сплавов.

Для оценки эксплуатационной стойкости листов АЛОР специалистами конструкторского бюро Антонова были использованы материалы АЛОР для обшивок передней кромки крыла самолета Ан-124, наиболее подверженных воздействию вибро- и акустических нагрузок (рисунок 1.5). Применение АЛОР с заменой листов из сплава Д16ч обеспечило снижение массы элементов конструкции до 10-15 % и повышение трещиностойкости в 10 раз за счет торможения развития трещины арамидными волокнами [94].

Рисунок 1.5 – Образец носовой части крыла самолета Ан-124
с обшивкой из листов АЛОР Д16/41 [81, 94, 98]

По результатам испытаний образцов и КПО были выявлены недостатки материалов АЛОР, ограничивающие их применение в авиационной технике. К таким недостаткам относятся:

- ограничение использования материала в конструкциях, работающих только на растяжение, в связи с послойным разрушением материала при сжатии;

- повышенная сорбция влаги органоволокнами в случае отсутствия или нарушения герметизации торцевых поверхностей деталей из АЛОР, которая может привести к расслоению материала и коррозионному поражению металлических листов;

- более высокая стоимость материала за счет стоимости органических волокон.

1.3.2 Алюмоуглепластики

Работы по снижению плотности материалов были продолжены не только в России, но и зарубежными компаниями, разрабатывающими новые слоистые материалы. Были предложены в качестве наполнителя полимерных слоев в композиционном материале углеродные волокна с высоким модулем упругости E ~ 140 ГПа и плотностью d ~ 1400 кг/м^3. Композиции из чередующихся металлических и полимерных слоев на основе углеродных волокон получили название в России АЛКАР (**АЛ**юминий + **КАР**бон) и в Европе - CARALL (**Ca**rbon **R**einforced **Al**uminium **L**aminate) [84, 95-97].

В структуру слоистого материала АЛКАР потребовалось ввести дополнительные разделительные прослойки из стеклопластика в качестве изолирующего материала для исключения контактной коррозии на границе углерод-алюминий (рисунок 1.6). Служебные характеристики такого материала могут варьироваться в зависимости от прочностных характеристик слоев: листов применяемого алюминиевого сплава, углепластика, стеклопластика, толщин слоев, направлений их укладки, видов и марок связующих и наполнителей.

Разработанный в ВИАМ слоистый алюмоуглепластик АЛКАР Д16/14-3 при испытании образцов показал следующий уровень механических характеристик: $\sigma_В$ = 850-910 МПа, $\sigma_{сж}$ = 690-720 МПа, E = 87-95 ГПа, превосходящий свойства высокопрочных алюминиевых сплавов. Материал может быть рекомендован для деталей силовых элементов авиационных

конструкций взамен высокопрочных конструкционных алюминиевых сплавов [98-103].

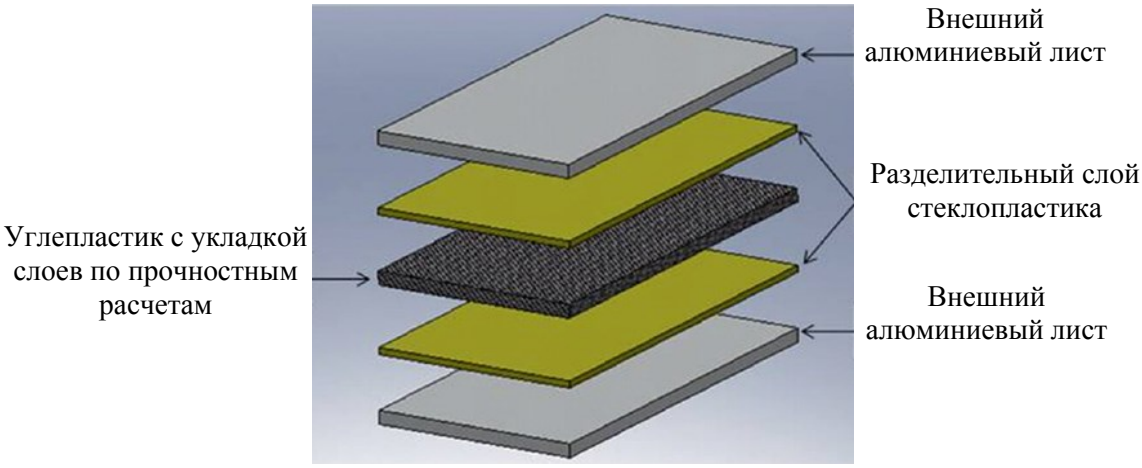


Рисунок 1.6 – Схема укладки слоев в структуре алюмоуглепластика [84]

За рубежом разработкой слоистых материалов CARALL с применением алюминиевых листов и углеродных наполнителей, оценкой возможностей использования этих материалов в самолетных конструкциях занимались специалисты австралийского University of Sydney и нидерландского Университета Delft University of Technology [95-97].

Проблема гальванической коррозии контакта алюминиевых листов с прослойками углепластика по плоскостям и в зонах постановки крепежа за счет разности электрических потенциалов была решена включением в структуру разделительных монослоев стеклопластика и герметизации зон сверления отверстий для постановки крепежа при сборочных и подгоночных работах. Результаты исследований материалов АЛКАР и CARALL отражены в работах [95-101].

К недостаткам алюмоуглепластиков можно отнести снижение статической и усталостной прочности из-за повышенных остаточных напряжений в материале, появляющихся при технологических операциях склеивания и полимеризации связующего в препрегах с учетом различных коэффициентов температурных расширений используемых материалов - алюминиевых сплавов и углепластиков.

1.3.3 Алюмостеклопластики

Учитывая недостатки и технологические сложности изготовления листов алюмоорганопластиков и углепластиков, были начаты в 80-е годы работы по созданию, исследованию и технологическому опробованию МПКМ второго поколения: в России алюмостеклопластиков СИАЛ (**С**теклопластик **И** **АЛ**юминий) [34,107-110] и в Европе - GLARE (**G**lass **L**aminate **A**luminium **R**einforced **E**poxy) [111-115]. В этих материалах использованы стеклопластики, выполненные из клеевых препрегов, армированных высокопрочными стеклонаполнителями.

Алюмостеклопластики представляют собой МПКМ слоистой структуры с последовательным распределением слоев по толщине материала – металлических листов малых толщин 0,25-0,50 мм и стеклопластика толщинами 0,20-0,50 мм в зависимости от схемы укладки клеевых препрегов. Для снижения внутренних напряжений, ведущих к деформации формируемого изделия, при конструировании структуры алюмостеклопластиков необходимо обеспечить требование нечетного количества слоев с симметричным расположением относительно нейтрального слоя по всем сечениям конструкции детали [116].

На схеме (рисунок 1.7) представлена симметричная структура пятислойного (3/2) алюмостеклопластика, состоящая из трех алюминиевых листов и двух слоев стеклопластика. Слои стеклопластика сформированы выкладкой из нескольких монослоев клеевого препрега. Уровень прочностных характеристик зависит от схемы выкладки, количества монослоев, вида стеклонаполнителя.

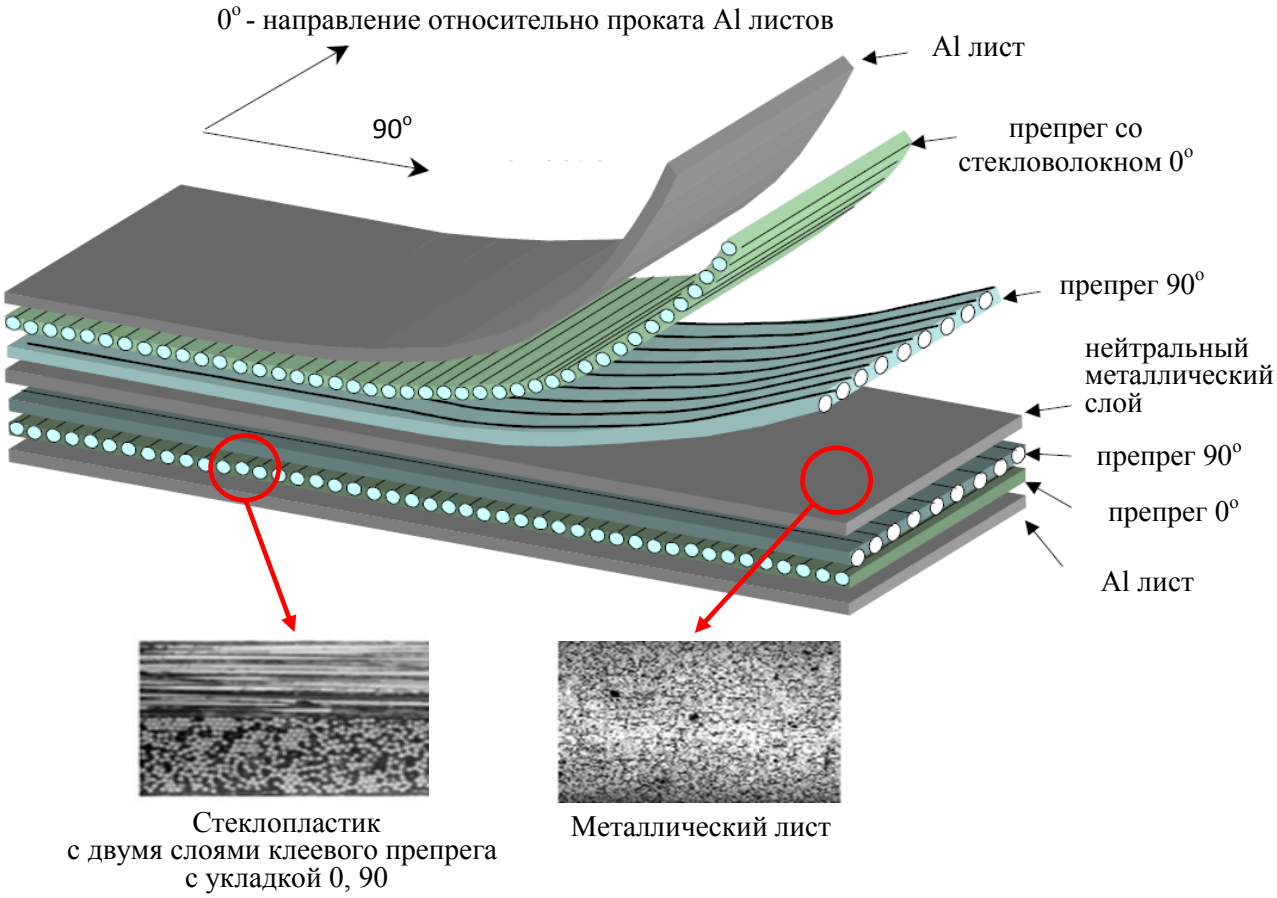


Рисунок 1.7 – Схема пятислойной структуры алюмостеклопластика

Первым разработчиком, испытателем и производителем слоистых МПКМ типа GLARE является компания «AKZO» (Нидерланды) [117]. Для оптимизации весовых характеристик обшивки фюзеляжа самолетов компании «Airbus» были разработаны слоистые материалы GLARE с применением листов из конструкционных алюминиевых сплавов 2024, 7075. Сравнительная оценка с алюминиевыми листами показала, что данные материалы обладают повышенными характеристиками усталости и пониженной плотностью [80, 118]. GLARE толщинами до 2,5 мм со структурой 6/5 (6 алюминиевых слоев и 5 слоев стеклопластика) применены в конструкции самолетов: в двух отсеках верхних панелей фюзеляжа самолета А-380, для передней кромки крыла самолета А340-500/-600, в элементах конструкции гермошпангоута, соединительных лент отсека фюзеляжа, обтекателей горизонтального и вертикального хвостового

оперения, а также для самолета Boeing 777 в качестве панелей пола грузового отсека [119]. Примеры применения алюмостеклопластиков GLARE в деталях конструкции самолета А-380 показаны на рисунках 1.8 - 1.11.

Применение в самолете А-380 слоистых материалов GLARE (3 % от общего веса) вместо конструкционных алюминиевых сплавов позволило снизить массу конструкции на ~ 500 кг [115, 120, 121].

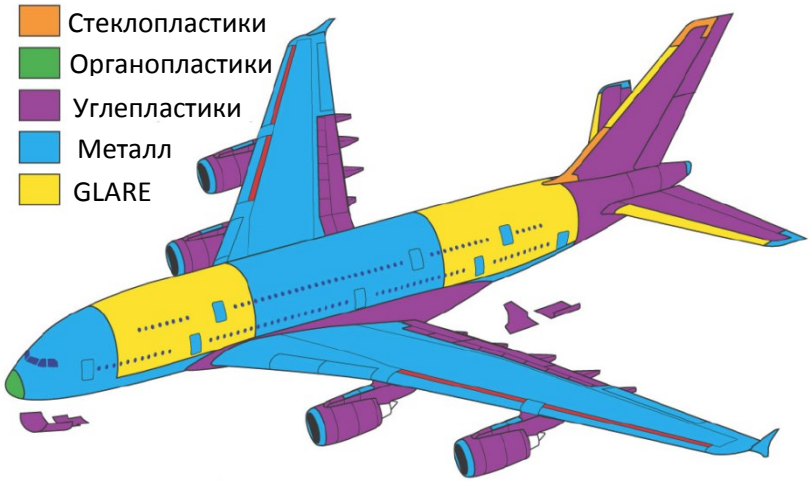


Рисунок 1.8 – Применение различных материалов в конструкции самолета компании «Airbus» А-380

Рисунок 1.9 – Обшивка фюзеляжа из материала GLARE

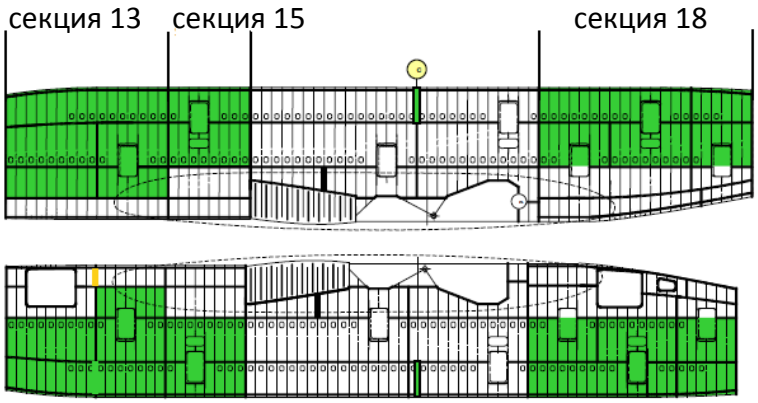


Рисунок 1.10 – Панели фюзеляжа из материала GLARE (зеленый цвет)

Рисунок 1.11 – Соединительная лента фюзеляжа из материала GLARE

Расположение и количество монослоев в материалах GLARE выбирается в зависимости от требований к конструкции. Алюмостеклопластик GLARE, примененный в самолете А-380, изготовлен из алюминиевого сплава 2024Т3 и однонаправленного препрега, армированного стекловолокнами марки S2, с использованием связующего на основе эпоксидных смол с температурой отверждения 120 ^{o}C. Содержание стекловолокон в клеевом препреге около 60 %, а номинальная толщина монослоя ~ 0,127 мм. Толщина алюминиевых листов ~ 0,3-0,4 мм. Общая объемная доля алюминиевых листов в GLARE варьируется в пределах 50-70 % [122-127].

Основные механические характеристики различных типов GLARE представлены в таблице 1.5 [117, 118, 128].

Таблица 1.5 – Механические свойства алюмостеклопластиков GLARE в зависимости от структуры

Характеристики	Варианты алюмостеклопластиков									
	GLARE 2A		GLARE 2B		GLARE 3		GLARE 4A		GLARE 4B	
	П	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П	Д
σ_B, МПа	360	895	1075	322	666	678	566	873	863	566
$\sigma_{0,2}$, МПа	239	344	312	242	260	287	229	299	271	257
E, ГПа	56,5	66,8	64,2	49,1	56,2	56,4	50,1	56,9	56,9	50,1
$\sigma_{0,2}^c$, МПа	271	347	387	218	298	292	271	317	336	253
E^c, ГПа	60,1	68,3	65,7	53,7	59,6	58,9	52,7	57,9	57,9	52,7
d, кг/м^3	2580		2490		2480		2420		2420	

В ВИАМ велись работы по созданию материалов СИАЛ с использованием слоев из традиционных алюминиевых листов. На момент начала выполнения настоящей работы разработаны алюмостеклопластики с использованием в структуре конструкционных алюминиевых листов из сплавов Д16ч, 1163 и слоев стеклопластика, выполненных из клеевых препрегов, армированных стеклоровингом или стеклотканью. В таблице 1.6 приведены характеристики разработанных алюмостеклопластиков на основе дуралюминов [34,107-110].

Таблица 1.6 – Механические характеристики и плотность алюмостеклопластиков на базе алюминиевых листов (продольное направление)

Марка	Структура	d, кг/м^3	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	E, ГПа
СИАЛ-1НТ	2/1, сплав Д16чАТ, стеклоткань, 2 монослоя, однонаправленный	2470	870	310	62,0
СИАЛ-1НР	2/1, сплав Д16чАТ, стеклоровинг, 1 слой, однонаправленный	2470	920	335	65,0
СИАЛ-2	3/2, сплав Д16чАТ, стеклоткань, армирование 70:30 об. % (3 слоя 0,90,0)	2450	790	275	55,0
СИАЛ-3	3/2, сплав Д16чАТ, стеклоткань, 2 слоя, перекрестное армирование	2470	610	255	56,0

При сравнительном анализе результатов испытаний алюмостеклопластиков с применением алюминиевых листов и монолитных листов из конструкционных алюминиевых сплавов можно утверждать, что листы СИАЛ имеют преимущества по трещиностойкости (dl/dN ~ 0,3 мм/кцикл при ΔK = 31 МПа·м$^{1/2}$), пониженной плотности на 8-10 %, повышенной прочности ($\sigma_в$ > 610 МПа), а также огнестойкости и удовлетворительной коррозионной стойкости. Однако, температура эксплуатации $T_{экс}$ алюмостеклопластиков с использованием алюминиевых сплавов не превышала 80 °С, что сдерживало дальнейшие разработки СИАЛ и применение в конструкции самолетов [116, 131, 132].

Из зарубежных источников (статей, материалов конференций, патентов) [121, 133-136] следует, что за рубежом ведутся разработки гибридных композиций материалов типа «Central» с использованием в структуре листов с варьированием толщин и стеклопластиков с разным сочетанием наполнителей. Проводятся работы в области разработки технологических процессов изготовления заготовок и деталей из слоистого материала с оценкой коррозионных и прочностных характеристик.

В научных работах компании «Alcoa» совместно с университетом TU Delft предложено использование перспективных материалов для слоистых обшивок панелей крыла взамен обшивок, изготовленных фрезерованием из плит алюминиевых сплавов 2524 и 7475. В конструкции гибридной панели в качестве обшивки использован слоистый металлополимерный материал, названый в зарубежной литературе «Central», с применением в структуре в центральной зоне по толщине материала GLARE и листов увеличенной толщины из алюминиевого сплава 2024 [134, 136]. При соединении обшивки из материала «Central» и стрингера с помощью механического крепежа в зонах контактов стрингер-панель использованы в качестве стопперов роста трещин прослойки волокнисто-металлического материала FML–GLARE-2 (рисунок 1.12) [133].

Зарубежными компаниями «Structural Laminates Industries» и «Aerostruc» был проведен ряд сравнительных исследований по оценке свойств полуфабрикатов из традиционных алюминиевых сплавов и слоистых материалов типа GLARE и с целью применения последних в обшивках фюзеляжа и панелях крыла. Полученные результаты показали преимущества по весовой эффективности до 30 % и ресурсным характеристикам до 40 % при использовании слоистых материалов в гибридных конструкциях обшивок панелей крыла [119, 137-139].

Результаты проведенных исследований зарубежных материалов GLARE и отечественных материалов СИАЛ [107, 108, 140-145] позволяют рассматривать возможность применения слоистых металлополимерных материалов для изготовления особо ответственных деталей авиационных конструкций, например для обшивок панелей крыла и фюзеляжа, дублеров в зонах проемов, что обеспечит снижение массы деталей самолета, повышение прочности, трещиностойкости и усталостной долговечности конструкции.

Анализ современных тенденций развития и применения слоистых металлополимерных композиционных материалов, с учетом данных по структурам, применяемым материалам, результатам механических и коррозионных испытаний стандартных и конструктивно-подобных образцов, показывает, что разработка и исследование новых композиций алюмостеклопластиков, отработка технологий изготовления слоистых материалов и их компонентов на авиационных и металлургических заводах, проектирование деталей и элементов гибридных конструкций из композиционных материалов являются актуальными задачами в неразрывной цепочке связей: «Материал – Технология – Оборудование – Конструкция» [146, 147].

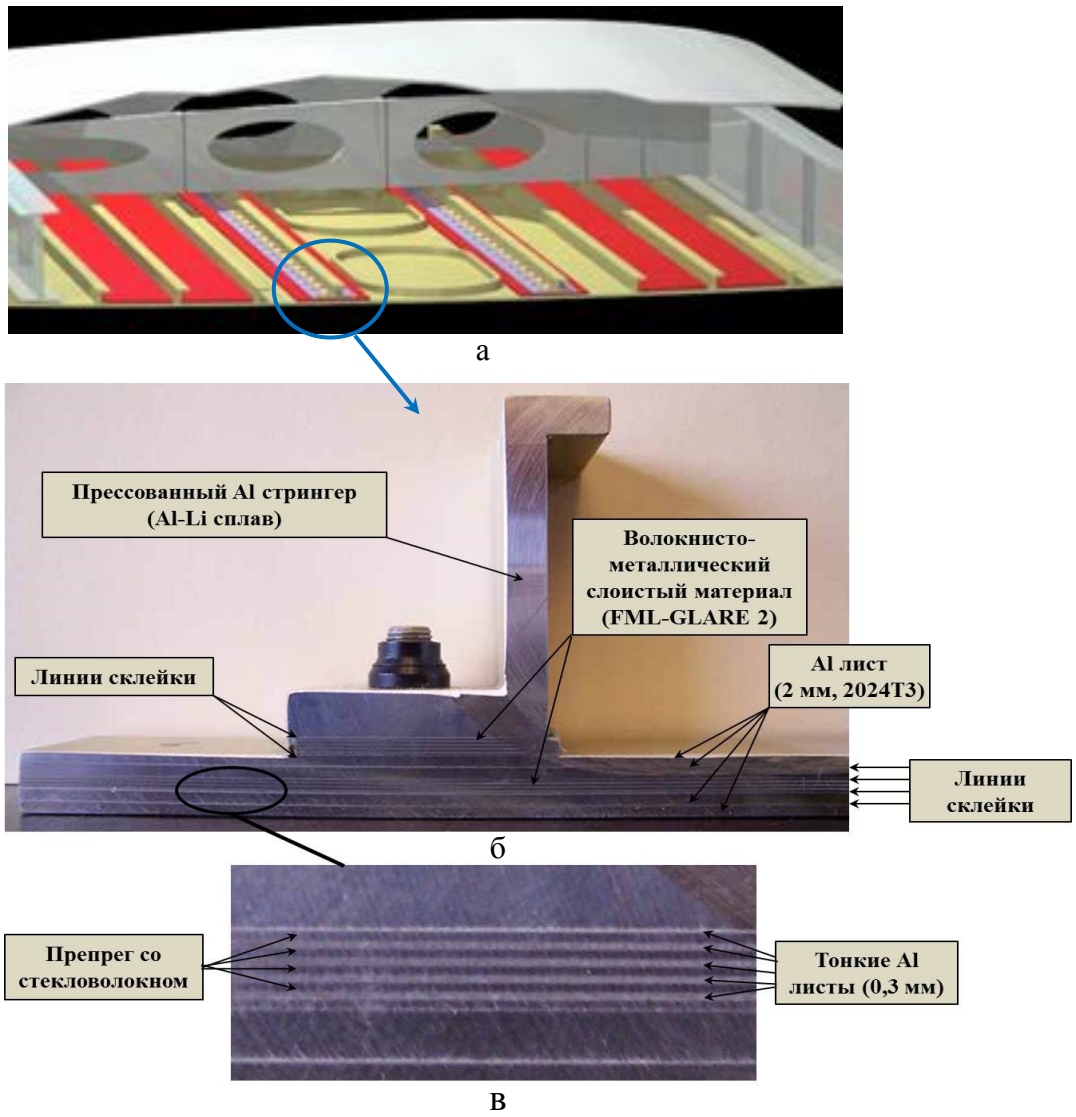


Рисунок 1.12 – Фрагмент зарубежной конструкции гибридной панели крыла [121, 133]: а – панель крыла в разрезе, б – крепление стрингера к обшивке, в – схема укладки слоев в обшивке

По своим технологическим и прочностным характеристикам алюмостеклопластики отвечают конструктивным требованиям при изготовлении деталей и могут найти применение в авиационных конструкциях для обшивок, усиления дверных проемов, в зонах иллюминаторов, настилов полов, перегородок в планере самолетов и вертолетов. Учитывая, что материалы СИАЛ обладают молниезащитными и повышенными противопожарными свойствами, они могут быть

использованы для молниезащитных элементов обшивки крыла, в пожароопасных зонах и противопожарных перегородках.

Необходима разработка научно-технологических основ создания слоистых алюмостеклопластиков нового поколения с пониженной плотностью, повышенными прочностью, модулем упругости, характеристиками трещиностойкости, включая:

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

- разработку 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;

- разработку 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 алюмостеклопластиках;

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

- разработку математической модели расчета механических характеристик слоистых алюмостеклопластиков;

- повышение служебных характеристик слоистых алюмостеклопластиков за счет применения высокопрочного клеевого связующего с повышенными адгезионными характеристиками;

- исследование изменения свойств алюмостеклопластиков после испытаний в натурных климатических условиях;

- разработку технологических режимов изготовления конструктивно-подобных образцов на основе алюмостеклопластиков;

- проведение испытаний и сравнительного анализа прочностных и ресурсных характеристик конструктивно-подобных образцов из традиционных алюминиевых сплавов и слоистых металлополимерных материалов;

- разработку методики испытаний и определение огнестойкости и огненепроницаемости слоистых алюмостеклопластиков;

- разработку нормативной документации применительно к слоистым алюмостеклопластикам нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности.

Задачи, поставленные в работе, и их решение представлены в структурной схеме на рисунке 1.13.

Выводы по главе 1

1. Проведен анализ тенденций развития исследований в области российских и зарубежных конструкционных алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов, слоистых металлополимерных композиционных материалов – алюмоорганопластиков, алюмоуглепластиков, алюмостеклопластиков, который показал, что дальнейшее снижение весовых характеристик слоистых МПКМ возможно при использовании листов из алюминий-литиевых сплавов в составе алюмостеклопластиков.

2. Для получения методом рулонной прокатки листов толщиной 0,25 мм из алюминий-литиевого сплава 1441 требуется разработать режим

гомогенизации, повышающий технологическую пластичность слитков, и режимы упрочняющей термической обработки для получения листов с необходимым уровнем механических и коррозионных свойств.

3. Расширение применения слоистых металлополимерных композиционных материалов на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков в конструкциях изделий авиационной техники является новым этапом развития перспективных материалов, обеспечивающих повышение весовой эффективности, ресурса и надежности конструкций благодаря улучшенным физико-механическим и конструктивно-технологическим характеристикам. Показана необходимость разработки научно-технологических основ создания слоистых алюмостеклопластиков нового поколения с варьируемым комплексом свойств: пониженной плотностью, повышенными прочностью, модулем упругости, характеристиками трещиностойкости.

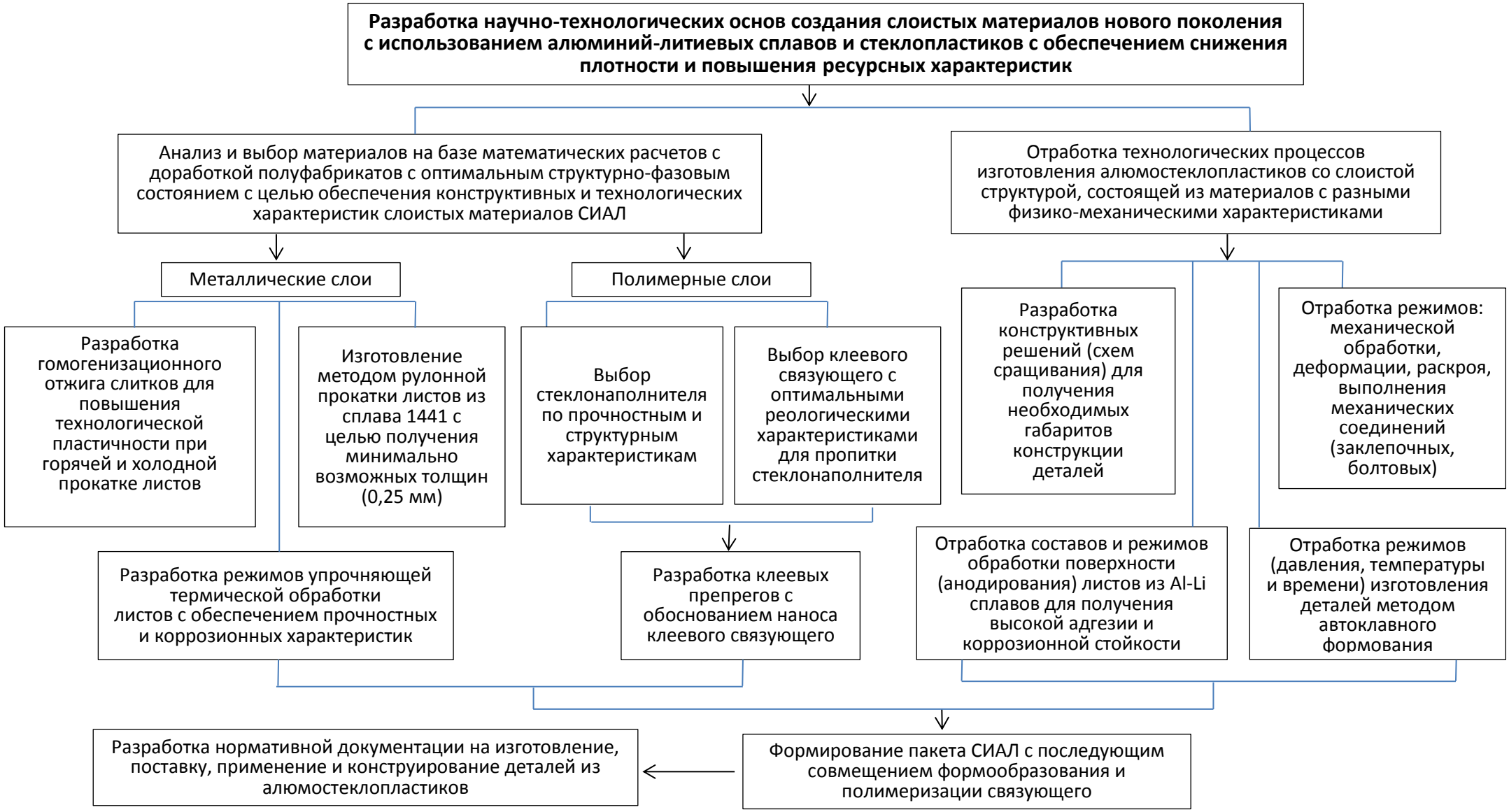


Рисунок 1.13 – Структурная схема научно-технологических основ создания слоистых материалов нового поколения с использованием алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков

Глава 2 Объекты и методы исследований

2.1 Объекты исследований

В качестве объектов исследований были использованы:

- плоские слитки габаритами 300×1100×3100 мм из алюминий-литиевого сплава 1441, отлитые в производственных условиях ОАО «КУМЗ» по действующей серийной технологии, негомогенизированные и подвергнутые гомогенизационному отжигу по различным режимам;
- листы из алюминий-литиевого сплава 1441 толщиной 0,25 мм, 1,0 мм и 1,5 мм производства ОАО «КУМЗ» (ТУ 1-804-407, ТУ 1-804-317) в исходном состоянии, закаленные и состаренные по серийным режимам Т1 и Т11, состаренные в лабораторных условиях по различным режимам, листы, состаренные по разработанному режиму Т12, а также листы после автоклавного формования;
- листы из алюминий-литиевого сплава В-1469 толщиной 0,5 и 1,0 мм закаленные и состаренные по режиму Т1 производства ОАО «КУМЗ» (ТУ 1-804-439) и листы после автоклавного формования;
- прессованные профили из сплава В-1469 закаленные и состаренные по режиму Т1 производства ОАО «КУМЗ» (ТУ 1-804-440);
- клеевые связующие ВСК-14-2мР и ВСК-14-2м;
- клеевые препреги КМКС-2м.120.Т64.55, КМКС-2м.120.Т60.37 и КМКС-2мР.120.РВМПН.30 с разным содержанием армирующего наполнителя;
- слоистые алюмостеклопластики различной структуры и схемы армирования;
- конструктивно-подобные образцы с применением обшивок из слоистых материалов на базе листов из сплавов 1441, В-1469 и силового набора из профилей, изготовленные в промышленных условиях самолетостроительного объединения ПАО «ВАСО».

2.2 Методы исследований

Исследования проводили на аттестованном оборудовании по действующим стандартам Российской Федерации.

Моделирование фазового состава алюминий-литиевого сплава 1441 проводили в программном комплексе Thermo-Calc 2017b.

Программа Thermo-Calc позволяет проводить термодинамический расчет равновесного фазового состояния металлических материалов. В основе расчетов Thermo-Calc лежит методика CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams), которая направлена на определение фазового состояния рассматриваемой системы из условий термодинамического равновесия многофазной системы при заданных параметрах. Имеющиеся в программе термодинамические базы данных (TCAL2, TTAL8) позволяют проводить расчеты фазового состояния алюминиевых сплавов различных систем легирования.

Исследование микроструктуры слитков, листов, профилей из алюминий-литиевых сплавов и алюмостеклопластиков проводили на микроскопе Olympus GX 51 по методикам ММ 1.2.028, МР 21-31 и ММ 1.2.085.

Количественный анализ фаз в слитках и определение среднего размера зерна в листах из сплава 1441 проводили при помощи программного обеспечения Stream Basic 1.8. При оценке объемных долей эвтектические фазы были выделены синим цветом.

Оценка качества поверхности отверстий для установки заклепок и после их удаления была проведена по МР 21-31 на оптическом и стереоскопическом микроскопах Olympus GX51 и SZ51, соответственно.

Оценку значений температур и теплоты фазовых превращений в слитках из сплава 1441, в том числе определение точки солидуса, осуществляли из анализа термограмм, полученных методом дифференциальной сканирующей калориметрии при дифференциальном термическом анализе по требованиям РТМ 1.2.032 на сканирующем

калориметре DSC 404 F1 при нагреве образцов со скоростью 10 К/мин до расплавления эвтектических фаз в среде аргона в интервале температур 30-550 °С.

Определение химического состава фазовых составляющих и электронно-микроскопические структурные исследования в слитках и листах проводили на фольгах на просвечивающем электронном микроскопе Tecnai G2 F20 S-TWIN, оснащенном сканирующей системой, светлопольными и темнопольными детекторами, а также энергодисперсионным анализатором X-Max80 в соответствии с ММ 1.595-17-344. Исследования структуры проводили с применением светлопольных и темнопольных дифракционных методик просвечивающей электронной микроскопии и в режиме сканирования, в том числе при анализе распределения химических элементов с локальностью до 2 нм. Поэлементный анализ проводили с помощью программного обеспечения TEM Imaging&Analysis. Фольги для исследований на просвечивающем электронном микроскопе изготавливали с применением электроэрозионной резки, механической шлифовки и электролитической полировки при температуре -38 ºС в спиртовом растворе азотной кислоты.

Точное определение химического состава осуществляется, если известны все параметры (состав и геометрия съемки, включая толщину фольги). При этом фольга должна соответствовать модели на схеме, приведенной на рисунке 2.1, т.е. поверхности фольги должны быть плоскопараллельны. Поскольку в большинстве экспериментальных случаев имеет место геометрическая неидеальность и химическая неоднородность образца, влияющие на поглощение и рассеяние рентгеновского излучения, данный метод позволяет получить полуколичественную оценку состава исследуемых структурных составляющих сплава.

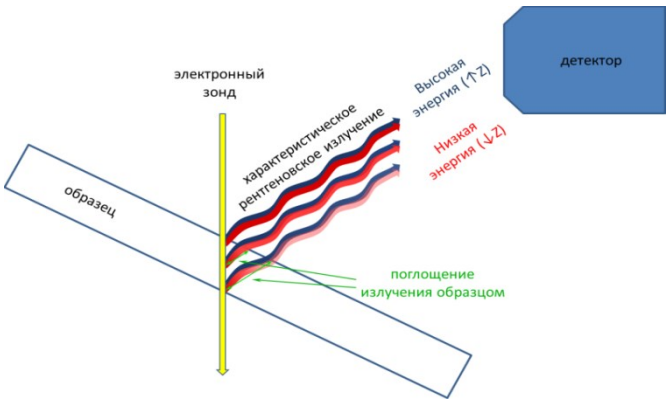


Рисунок 2.1 – Схема взаимодействия электронного пучка с фольгой

Механические свойства при растяжении (σ_B, $\sigma_{0,2}$, δ, E) при комнатной температуре листов сплавов 1441 и В-1469 и алюмостеклопластиков определяли на плоских образцах по ГОСТ 11701 и на образцах по эскизу (рисунок 2.2) по ГОСТ 1497 с использованием испытательных машин MTS.

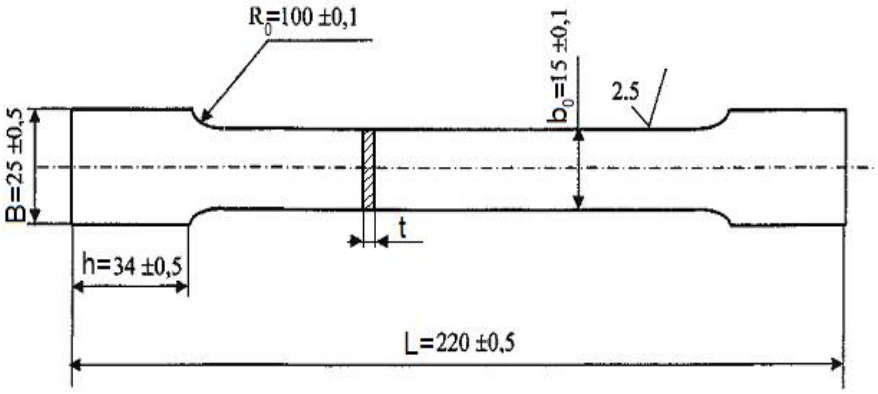


Рисунок 2.2 – Образец из СИАЛ с увеличенной рабочей частью для испытаний на растяжении (мм)

Механические свойства при растяжении (σ_B, δ, Ψ) при повышенных температурах определяли на испытательной машине MTS в соответствии с требованиями ГОСТ 9651.

Испытания на растяжение при отрицательных температурах (**минус 70 °С)** СИАЛ проводили по ГОСТ 11150 с использованием испытательной машины Zwick / Roell.

Изломы образцов листов из сплава 1441 после проведения испытаний на растяжение при комнатной температуре исследовали с помощью **фрактографического анализа** по требованиям РТМ 1.2А.096 на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV.

Определение склонности к **расслаивающей коррозии (РСК)** листов из сплава 1441 проводили по ГОСТ 9.904.

Для оценки адгезионных и коррозионных характеристик после различных видов электрохимической обработки листов алюминиевых сплавов 1441 и В-1469 проводили **исследования поверхностей** методом растровой микроскопии на электронном микроскопе JSM-6490LV в режимах вторичных (SEI) и обратноотраженных (BEC или COMPO) электронов, а **изучение морфологии поверхностей гальванических покрытий** проводили методом конфокальной и лазерной сканирующей микроскопии (CLSM) с использованием оптического профилометра S NEOX Sensofar-Tech.

Прочность при сдвиге в клеевых соединениях определяли в соответствии с ГОСТ 14759.

Коррозионную стойкость защитных покрытий и клеевых соединений определяли при **ускоренных коррозионных испытаниях в камере солевого тумана** (КСТ) Votsch VSC-100 при температуре 35 ºС с распылением 5 %-ного раствора NaCl по ГОСТ 9.308 и **испытаний образцов в условиях морской атмосферы** на стендах площадок ГЦКИ (г. Геленджик) по ГОСТ 9.909 и СТО 1-595-591-499.

Малоцикловую усталость (МЦУ) листов и слоистых алюмостеклопластиков при осевой нагрузке определяли в соответствии с ГОСТ 25.502 и ММ 1.2.002 при комнатной температуре на стандартных образцах с отверстием Ø=5 мм (K_t = 2,6). Параметры нагружения: σ_{max} в интервале от 98 МПа до 196 МПа, R=0,1, f =5 Гц.

Прочность при отслаивании ($S_{отсл}$) определяли в соответствии с РТМ 1.2А.015.

Температуру стеклования определяли на приборе динамического механического анализа DMA242 по ГОСТ Р 57739.

Содержание массовой доли летучих веществ по методике, описанной в ТУ 1-595-12-1475 и ТУ 1-595-14-1034, определяли по формуле по результатам трех измерений:

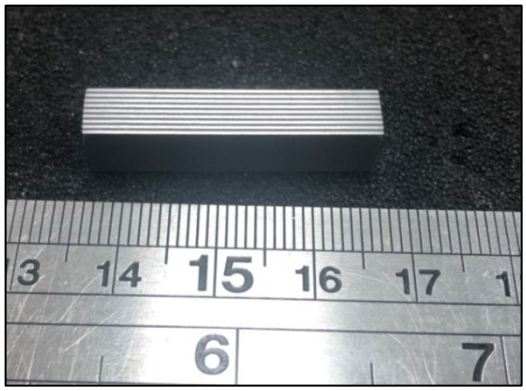
$$X = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100,$$

где X - содержание летучих веществ, %;

m_1, m_2, m_3 - масса фольги (г) исходная, с пленкой до и после термообработки, соответственно.

Статические механические свойства при сжатии ($\sigma_{-0,2}$, $E_{сж}$) образцов определяли на испытательных машинах MTS по ГОСТ 25.503.

Предел прочности при межслоевом сдвиге определяли по методу короткой балки (ГОСТ Р 57745) на образцах алюмостеклопластиков на базе листов из сплава 1441 (рисунок 2.3, а). Образцы имели следующие размеры 5,5×7×(20-170) мм (толщина, ширина, длина). Испытания проводили на установке Instron 5969 (диаметр торцов нижних опор - 5 мм, диаметр торца пуансона - 10 мм) (рисунок 2.3, б). Скорость перемещения пуансона при испытаниях составляла 1 мм/мин. Остановка испытаний определялась при фиксировании падении нагрузки более 50 % от максимальной разрушающей нагрузки.



а б

Рисунок 2.3 – Испытания образцов 17-слойного СИАЛ (а) по методу короткой балки (б)

Определение скорости роста трещины усталости СРТУ (dl/dN) проводили на испытательных машинах MTS на образцах шириной 100 мм из алюмостеклопластиков (σ_{max}=100 МПа, f=5 Гц, R=0,1) при ΔК от 15,5 до 31,0 МПа·м$^{1/2}$ в соответствии с требованиями ММ 1.2.003 и ГОСТ 25.506.

Испытания на ударную вязкость проводили по ГОСТ 9454 на маятниковом копре РН-25.

Оценку **стойкости к ударным нагрузкам** определяли по ГОСТ 33496.

Фрактографический анализ изломов листов в структуре алюмостеклопластиков проводили после испытаний образцов на СРТУ с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490 LV по ММ 1.595-30-148.

Ультразвуковой контроль после автоклавного формования заготовок и элементов деталей из алюмостеклопластиков проводили акустическим импедансным и ультразвуковым теневым методами с учетом требований ТР 1.2.1789.

Получение данных о **топографии поверхности образцов** алюмостеклопластиков **после сорбционных испытаний** проводили на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS3100 с оценкой характеристик рельефа и шероховатости поверхности в направлениях X, Y, Z. Компьютерную обработку данных планарной съемки поверхностей СИАЛ проводили с применением программы LEXT-OLS 3000.

Оценку **общей коррозии** образцов из алюмостеклопластиков проводили двумя способами натурных испытаний: на открытых площадках климатических станций в ГЦКИ (г. Геленджик) и в МЦКИ (г. Москва) с экспозицией 6 месяцев и методом ускоренных коррозионных испытаний в камере тепла и влаги (КТ) и камере солевого тумана (КСТ) с экспозицией 90 суток по методикам, предусмотренных ГОСТ 9.913 и ГОСТ 9.017. Контроль состояния образцов проводили по оценке изменения механических характеристик.

Оценку **коррозионной стойкости** к воздействию внешней среды проводили на стандартных образцах алюмостеклопластиков:

- анализ внешнего вида поверхности образцов с определением зоны коррозионных поражений и анализом изменения внешнего вида торцевых поверхностей образцов проводили с помощью стереомикроскопа Olympus SZX при 10-ти кратном увеличении;

- распространение межкристаллитной коррозии по глубине и характер коррозионных поражений определяли по ГОСТ 9.021 на микроскопе Olympus GX51 с точностью до 0,01 мм;

- глубину питтинговой коррозии определяли по ГОСТ 9.908 с помощью лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT с точностью до 0,001 мкм;

- фрактографические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе JSM-6490LV.

Характеристики динамической вязкости, динамического модуля упругости и модуля потерь определяли реометром Physica MCR 302 по методикам определения реологических характеристик связующих, предусмотренных в ТУ 1-595-14-1200 (контролируемое напряжение 2 Па, частота 1,6 Гц, диаметр рабочего узла 50 мм и зазор 0,6 мм). Образцы подвергали предварительному нагреву при заданной температуре до достижения температурного равновесия (скорость нагрева не более 4 К/мин, выдержка 10 мин) с дальнейшей компьютерной обработкой при помощи программного обеспечения RheoPlus.

Оценку **огнестойкости и огненепроницаемости** алюмостеклопластиков проводили на образцах размерами 220×220 мм в лабораторных условиях при одностороннем воздействии открытого пламени газовой горелки (рисунок 2.4, а) и в камере закрытого объема (рисунок 2.4, б) по методике СТО 1-595-20-532, разработанной с учетом требований ISO 2685 к конструкции испытательного оборудования и горелки (рисунок 2.4 в), температуре пламени и продолжительности испытаний.

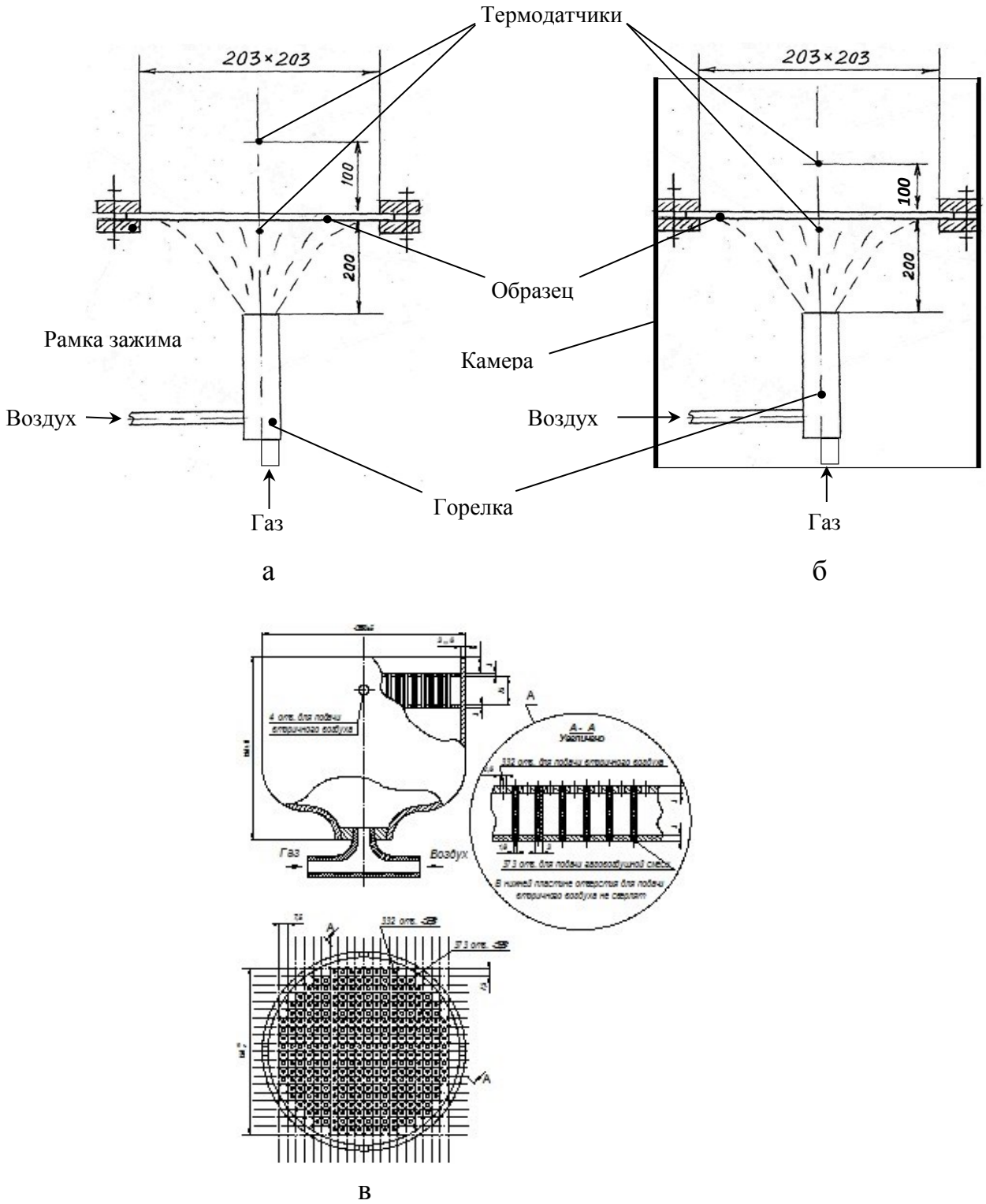


Рисунок 2.4 – Схемы установок для испытания листовых образцов на огнестойкость при одностороннем воздействии пламени:

а – открытое пламя; б – пламя в закрытой камере; в – конструкция горелки

Учитывая требования Авиационных правил АП-25, при испытаниях проводили регистрацию наличия сквозного прогорания образца, фиксацию температур над поверхностью образца в зоне контакта с пламенем, состояния

образца при воздействии пламени, деформации образцов и т.п. Сквозное прогорание образцов регистрировали визуально, также фиксировали температуру над тыльной поверхностью образца на расстоянии ~ 100 мм.

Квалификационные огневые испытания во ФГУП «ГосНИИ ГА» проводили на образцах алюмостеклопластика размером 610×510 мм при воздействии пламени на поверхность образцов с температурой $1100^{\pm 38}$ ºС в течение 5 и 15 мин стандартной аттестованной горелкой.

Плотность образцов определяли по ГОСТ 20018 методом гидростатического взвешивания на электронных весах GR-200.

Удельную теплоемкость определяли по ГОСТ Р 56754 при помощи дифференциального сканирующего калориметра DSC 204 F1.

Теплопроводность оценивали по методике МИ 1.2.031 на установке для автоматического и ручного измерения теплофизических величин твердых веществ TC-3000H/L.

Температурный коэффициент линейного расширения расчитывали по формулам в соответствии с МИ 1.2.023 на дилатометре DIL 402.

Температуропроводность определяли в соответствии с МИ 1.2.031 на установке TC-3000H/L.

Для оценки стойкости различных видов защитных покрытий проводили **коррозионные испытания под напряжением методом четырехточечного изгиба** на образцах СИАЛ размером 20×110 мм в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.5.

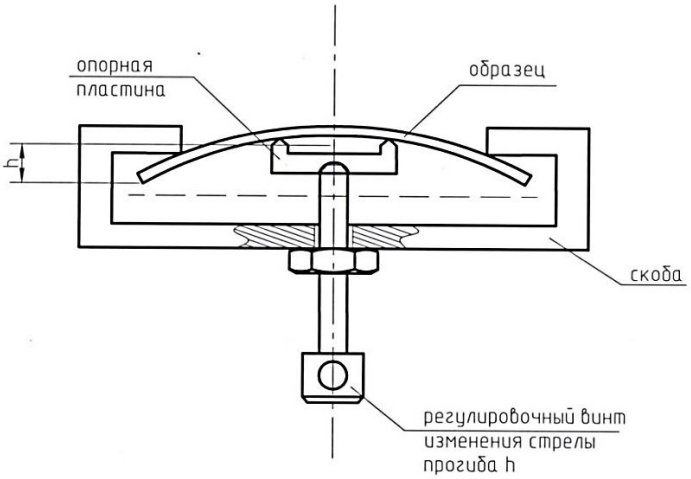


Рисунок 2.5 – Схема приспособления для закрепления образца при коррозионных испытаниях под напряжением

Сорбционный анализ

Процесс подготовки образцов алюмостеклопластиков для сорбционных испытаний состоял из высушивания при температуре 60 ºС до стабилизации массы образцов, взвешивания для определения исходной массы и увлажнения образцов до насыщения над поверхностью воды в эксикаторе с притёртой крышкой. Контроль массы и размеров образцов при испытаниях проводили после 1, 2, 3, 7, 9, 11, 14, 17, 21, 27 суток. Измерения ширины и длины проводили с использованием штангенциркуля с ценой деления 0,1 мм, толщины – с использованием микрометра с ценой деления 0,01 мм; взвешивание проводили на аналитических весах с погрешностью 0,1 мг.

Планарную съемку поверхности образцов проводили на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS3100. Съемку изображений проводили в двух режимах:

- в режиме оптического микроскопа – съемку с переменным фокусом;
- в режиме конфокального лазерного сканирования с переменным фокусом, что позволяет изучить рельеф поверхности.

Для **определения минимального радиуса гибки** (R_{min}) деформацию образцов проводили на гидравлическом прессе двойного действия «Looe

Shopper» усилием 75 тс в соответствии с ГОСТ 14019 и ПИ 1.2.343. Для определения минимального радиуса без разрушения слоев в материале СИАЛ образцы подвергали деформации в матрице с углом 90° с использованием пуансонов с радиусами закруглений R от 10 мм до 50 мм. На рисунке 2.6 приведена схема деформации заготовки пуансоном с основными значениями R.

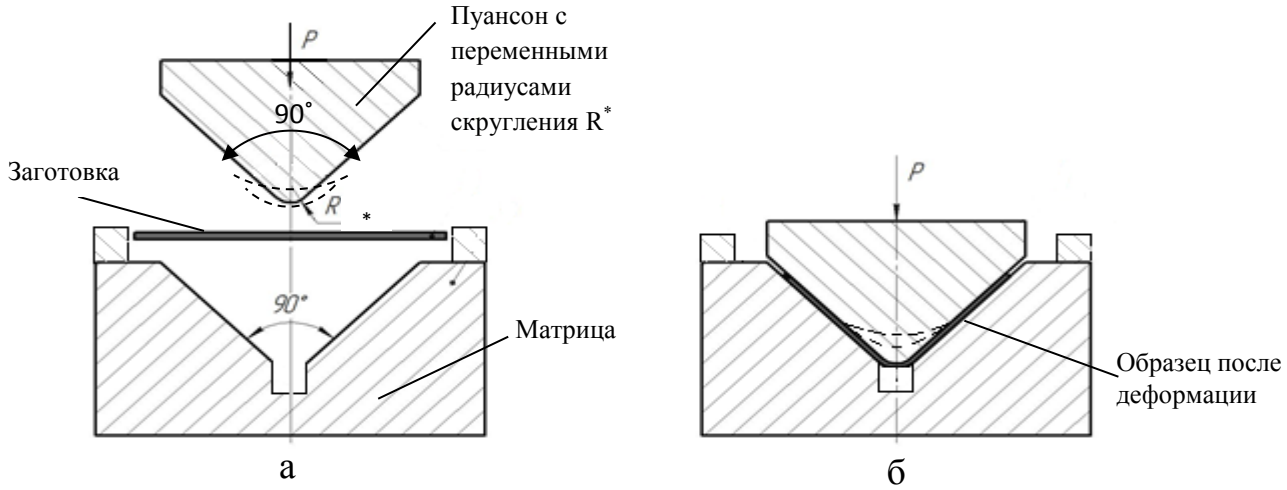


Рисунок 2.6 – Эскиз матрицы для испытаний образцов с определением минимального радиуса гибки: а – до деформации; б – после деформации

2.3 Методика испытания на сжатие фрагмента прототипа гибридной панели крыла с обшивкой из слоистого материала на базе листов из алюминий-литиевых сплавов В-1469 и 1441

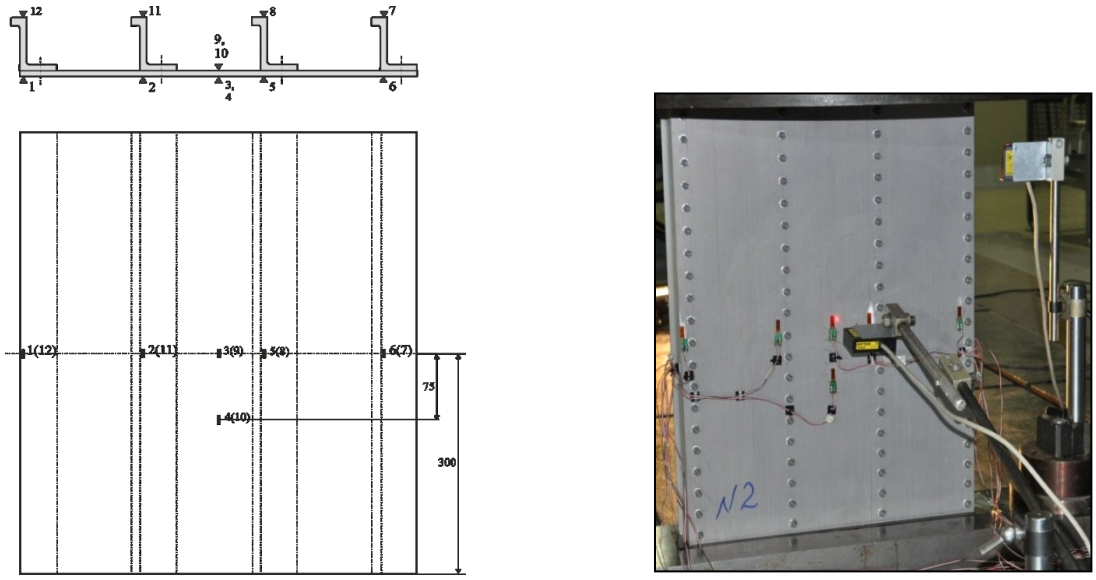
Испытания на сжатие четырехстрингерных конструктивно-подобных образцов из фрагмента слоистой гибридной панели крыла на базе листов из алюминий-литиевых сплавов В-1469 и 1441 проводили в соответствии с требованиями СТО 1-595-30-478 при изменении схемы и циклов нагружений. Конструктивно-подобный образец размерами 455,5×600 мм торцевыми плоскостями устанавливали на опорную плиту испытательной машины таким образом, чтобы центр жесткости сечения, приведенного по модулю упругости, совпадал с центральной силовой линией нагружающих плит испытательной машины; верхняя плита была снабжена регулируемой

шарнирной опорой. Допуск по плоскостности и параллельности кромок образца составлял не более 0,05 мм.

Испытания проводили на электромеханической испытательной машине RIEHLE-300 (максимальная нагрузка 3000 кН).

Контроль над возможным эксцентриситетом и равномерностью нагружения по ширине конструктивно-подобного образца осуществляли с помощью тензорезисторов, установленных по схеме (рисунок 2.7, а).

Проводили измерения осевых деформаций всей панели (P-Δl) и отклонений из плоскости (P-Δf) лазерными датчиками линейных перемещений, которые были установлены в центральном сечении образца (рисунок 2.7, б).



а б

Рисунок 2.7 – Схема установки тензорезисторов (а) и лазерных датчиков линейных перемещений (б) на четырехстрингерном конструктивно-подобном образце из фрагмента слоистой гибридной панели

Тензорезисторы и датчики линейных перемещений фиксировали начало искривления (местную потерю устойчивости) обшивки, ее развитие и потерю несущей способности конструктивно-подобного образца из слоистой гибридной панели в целом. Деформирование образца происходило под

действием непрерывно увеличивающейся равномерно-распределенной по их торцам сжимающей нагрузки с постоянной скоростью 1,25 мм/мин.

Нагружение конструктивно-подобного образца осуществляли до исчерпания его несущей способности. Образец нагружали сжимающим усилием в несколько этапов (300 кН, 1000 кН, 1500 кН) с последующей разгрузкой до нуля после каждого этапа нагружения, с анализом тензометрии и визуальным осмотром испытываемого образца.

2.4 Статистическая обработка данных

Статистическая обработка полученных результатов испытаний выполнялась в соответствии со стандартной методикой. Определены среднее значение ($\overline{X}$), дисперсия (s^2), среднее квадратическое отклонение (s), коэффициент вариации (V) и доверительный интервал для среднего значения ($\overline{X}_p$) комплекса свойств.

При представлении показателей статистической обработки результатов испытаниий использовали округление значений механических характеристик согласно ГОСТ 1497. При оценке усталостных характеристик принят нормальный закон распределения логарифмов числа циклов нагружения разрушаемых образцов.

Выборочное среднее $\overline{X}$ – среднее значение всех величин в выборке, вычисляется как:

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$$

Выборочная дисперсия – сумма квадратов отклонений от выборочного среднего, деленная на n-1, вычисляется как:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}{n-1}$$

Выборочное среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение) вычисляется как корень квадратный из выборочной дисперсии $s = \sqrt{s^2}$.

Коэффициент вариации вычисляется как отношение среднего квадратического отклонения к средней арифметической, выраженное в процентах:

$$V = \frac{s}{\overline{X}} 100$$

Доверительный интервал для среднего значения определяется:

$$\overline{X}_P = \overline{X} \pm \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\alpha,k},$$

где $t_{\alpha,k}$ – критерий Стьюдента,

α – уровень значимости,

$k = n - 1$ – число степеней свободы.

Глава 3 Исследование влияния технологических параметров процессов изготовления на физико-механические свойства металлической составляющей алюмостеклопластиков

3.1 Разработка температурно-временных параметров гомогенизации слитков и упрочняющей термической обработки тонких листов (0,25-0,5 мм) из алюминий-литиевого сплава 1441, используемых при изготовлении алюмостеклопластиков

Как отмечено в главе 1, сплав 1441 имеет преимущества по комплексу технологических, физико-механических свойств перед другими алюминиевыми сплавами, что позволяет применять его в виде тонких листов, полученных методом рулонной прокатки, в качестве металлической структурной составляющей слоистого металлополимерного композиционного материала СИАЛ.

Несмотря на более высокую технологичность при деформировании слитков из сплава 1441 в сравнении с другими алюминий-литиевыми сплавами, при холодной рулонной прокатке листов на толщину 0,3-0,5 мм возникали разрывы листов и надрывы кромок ввиду неоднородности структуры слитков и недостаточной пластичности материала.

Для изготовления тонких холоднокатаных листов из сплава 1441 с требуемым комплексом механических и коррозионных свойств методом рулонной прокатки было необходимо повысить пластичность материала за счет получения оптимального структурно-фазового состояния при гомогенизации, а также разработать режимы упрочняющей термической обработки листов. С этой целью были проведены дополнительные комплексные исследования:

- компьютерное моделирование термодинамических процессов фазовых превращений в слитках из сплава 1441 системы Al-Li-Mg-Cu-Zr при различных температурах;

- определение методом дифференциальной сканирующей калориметрии температур фазовых превращений, в том числе определение точки солидуса в слитке из сплава 1441;

- исследование структуры, фазового состава и технологической пластичности слитков из сплава 1441 в зависимости от температурно-временных параметров гомогенизации и разработка режима гомогенизации, обеспечивающего повышенную технологическую пластичность;

- оптимизация температурного интервала горячей деформации плоских слитков при прокатке;

- исследование влияния различных режимов термической обработки (закалки и старения) на структурно-фазовое состояние и обусловленный им комплекс механических и коррозионных свойств холоднокатаных листов толщиной 0,25-0,5 мм из сплава 1441 с целью разработки режима старения, обеспечивающего получение комплекса свойств, необходимых для использования листов в качестве структурного элемента в СИАЛ.

3.1.1 Компьютерное моделирование термодинамических процессов фазовых превращений в сплаве 1441 с использованием программного комплекса Thermo-Calc

Для оценки структурно-фазового состояния негомогенизированных слитков в диапазоне от температуры кристаллизации до комнатной с целью последующего выбора режимов их гомогенизации было проведено моделирование термодинамических процессов фазовых превращений при различных температурах в многокомпонентной системе алюминия с литием, магнием, медью и цирконием с использованием «Thermo-Calc». Моделирование проводили для сплавов двух составов в рамках марочного состава сплава 1441 (таблица 3.1): состав № 1 – близкий к минимальному содержанию легирующих элементов и состав № 2 – с максимальным содержанием легирующих элементов.

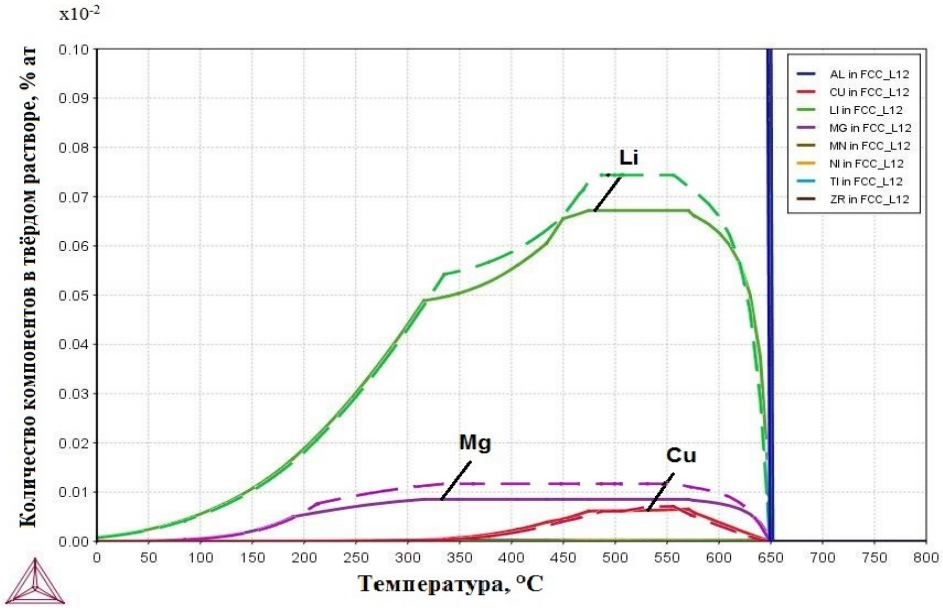
Таблица 3.1 – Массовая доля химических элементов в составе слитков из сплава 1441 для проведения компьютерного моделирования и экспериментальных исследований

Массовая доля в %												
Номер состава	Li	Cu	Mg	Zr	Be	Ti	Ni	Mn	Na	Ga	Fe	Si
1	1,8	1,7	0,8	0,11	0,04	0,05	0,06	0,05	0,001	0,001	0,04	0,02
2	2,0	1,9	1,1	0,16	0,04	0,07	0,1	0,01	0,001	0,001	0,12	0,08
Марочный состав по ТУ	1,8-2,0	1,6-1,9	0,7-1,1	0,04-0,16	0,02-0,20	0,01-0,07	0,02-0,10	0,001-0,100	0,0005-0,001	0,001-0,05	Не более	
											0,12	0,08

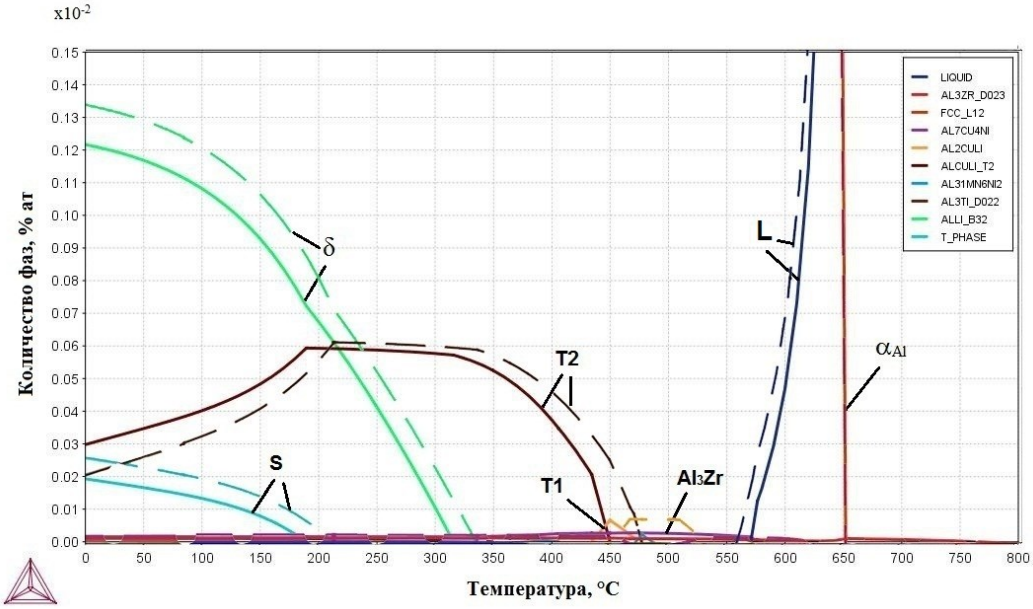
1 Примечание - Алюминий – основа, прочие примеси - менее 0,05 % (каждая в отдельности) и менее 0,15 % (в сумме)

В сплавах выбранных составов равновесная кристаллизация протекает в температурном интервале 650-550 °С (рисунок 3.1). Повышение содержания основных легирующих компонентов (Li, Cu, Mg) в сплаве 1441 до верхнего предела приводит к сужению температурного интервала максимальной суммарной растворимости легирующих компонентов в алюминиевом твердом растворе от 475-570 °С до 500-555 °С (рисунок 3.1, а).

Согласно моделированию по программе Thermo-Calc (для равновесных условий), наиболее высокая доля алюминиевого твердого раствора (более 0,99) в структуре рассматриваемых сплавов достигается в интервале 450-550 °С. При этих температурах в слитке присутствует практически единственная фаза - алюминиевый α- твердый раствор с незначительным количеством дисперсных включений фаз, содержащих цирконий, титан, марганец, никель, железо. Снижение растворимости основных легирующих компонентов в твердом растворе по мере понижения температуры слитка сопровождается выделением эвтектических составляющих – фаз T_2 ,T_1, при температурах ниже 450-470 °С и фаз δ (Al_3Li), S (Al_2CuMg) при температурах ниже 310-330 °С.



а



б

Рисунок 3.1 – Политермические диаграммы изменения содержания элементов в твердом растворе (а) и фазовых превращений (б) в интервале атомных концентраций от 0 до 15 % в сплаве 1441 системы Al-Li-Mg-Cu-Zr, сплошная линия – состав 1, штриховая линия – состав 2

При комнатной температуре равновесная массовая доля фаз в слитке (при пересчете из атомных процентов) составляет: α_{Al} ~84,9 %, δ (AlLi) ~7,8 %, T_2 (Al_6CuLi) ~4,2 %, S (Al_2CuMg) ~1,9 %, Al_3Zr ~0,3 %,

Al_3Ti ~0,15 %, $Al_{13}Fe_4$ ~0,4 %, прочие фазы, содержащие Ni, Mn ~0,35 %. При этом в α_{Al}- твердом растворе содержится по массе 0,33 % Li, 0,22 % Mg, 0,005 % Cu и менее десятитысячных долей процента Zr и Ti. В отличие от равновесных условий кристаллизации при охлаждения слитка в промышленных (неравновесных) условиях непрерывного литья количество эвтектических фаз уменьшается, а состав твердого раствора остается более насыщенным легирующими элементами.

Из расчетов (рисунок 3.1 б) следует, что максимальная растворимость легирующих элементов в твердом растворе слитков из сплава 1441 находится при температурах 475-570 °С, а температура солидуса составляет 555-570 °С.

Получение наиболее однородной структуры слитка 1441, согласно расчетам по программе Thermo-Calc, обеспечивается при температуре гомогенизации в интервале 500-550 °С с достижением преимущественно однофазного состояния сплава.

3.1.2 Экспериментальное исследование структуры, фазового состава и технологических характеристик слитков и листовых заготовок из сплава 1441 в зависимости от режимов гомогенизационного отжига

В ходе экспериментальных исследований влияния температурно-временных факторов при гомогенизации на степень растворения избыточных эвтектических фаз и устранение внутрикристаллитной ликвации были уточнены выводы и результаты, предварительно полученные при компьютерном моделировании (температура солидуса и температурный интервал гомогенизации, фазовый состав).

Принимали также во внимание, что в процессе гомогенизации, наряду с растворением неравновесных эвтектик, происходит гетерогенизация структуры с выделением из твердого раствора дисперсных частиц - алюминидов переходных металлов, стабильных при последующих

технологических нагревах (горячая деформация, термическая обработка). При высокотемпературных нагревах в сплаве 1441 может происходить выделение из пересыщенного твердого раствора вторичных дисперсных частиц Al_3Zr. Размер и количество этих частиц оказывают существенное влияние на структуру, технологические свойства при деформации слитков и служебные свойства катаных листов после упрочняющей термической обработки [9, 73, 149].

Исследования проводили на плоских слитках размером 300x1100x3100 мм из сплава 1441 состава 1 (см. таблицу 3.1), полученных по действующей серийной технологии на ОАО «КУМЗ».

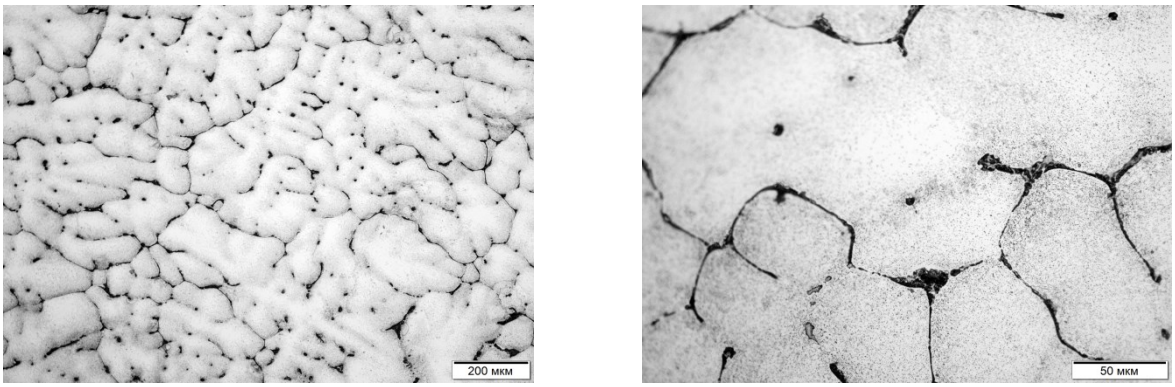
Непосредственно после отливки проводили двухчасовой отжиг слитков при температуре 380-420 °С для снижения внутренних напряжений с целью исключения образования холодных трещин и разрушения слитков при дальнейшей резке.

Структура исследованных промышленных слитков из сплава 1441 (см. таблицу 3.1) неоднородна ввиду неравновесных условий кристаллизации (рисунок 3.2), что существенно снижает их пластичность и затрудняет деформирование [8, 64].

С целью разработки режима гомогенизации слитков сплава 1441, обеспечивающего более высокую технологическую пластичность по сравнению с серийным режимом, была проведена в лабораторных условиях гомогенизация образцов, отобранных из промышленных слитков. Ввиду того, что процессы растворения эвтектических фаз в крупногабаритных слитках начинаются уже в ходе нагрева до температуры гомогенизации, для приближения условий нагрева литых образцов при экспериментальных исследованиях к реальным скоростям нагрева в условиях серийного производства скорость нагрева образцов до температуры гомогенизации составляла ~50 °С/ч.

При выборе экспериментального двухступенчатого режима гомогенизации были проанализированы данные работ [27, 30, 149] о

положительном влиянии двухступенчатых режимов гомогенизации на скорость растворения частиц неравновесных эвтектических фаз на высокотемпературной ступени благодаря формированию оптимальной морфологии и плотности распределения выделений вторичных частиц «дисперсоидов» β′ (Al_3Zr) на первой низкотемпературной ступени гомогенизации.



а б

Рисунок 3.2 – Микроструктура слитка из сплава 1441 после двухчасового отжига при температуре 380-420 °С:
а – увеличение х100, б – увеличение х500

Для выбора эффективного режима гомогенизации, обеспечивающего наиболее полное растворение междендритных прослоек неравновесных эвтектик в слитке, была проведена оценка объемной доли частиц, не растворившихся в слитке при гомогенизационных отжигах по режимам, представленным в таблице 3.2.

Ввиду того, что при медленном (с печью) охлаждении с температуры гомогенизации происходит распад твердого раствора слитка с выделением вторичных фаз, затрудняющих подсчет объемной доли первичных эвтектических фаз, не растворившихся при гомогенизации, образцы №№ 1, 2, 3 и 5 с температуры гомогенизации были охлаждены с высокой скоростью в воде, что предотвратило распад твердого раствора и сохранило при

комнатной температуре структурное состояние образцов, сформированное при температуре гомогенизации.

Таблица 3.2 – Температурно-временные параметры экспериментальных режимов гомогенизации образцов из слитков сплава 1441

<table>
<tr><th>№ обр.</th><th>Темпера-тура гомогени-зации, °С</th><th>Время выдержки, ч</th><th>Скорость нагрева от 200 °С до температуры гомогенизации</th><th>Условия охлаждения с температуры гомогенизации</th></tr>
<tr><td>1</td><td>400-450</td><td>4-8</td><td rowspan="4">Не более 50 °С/ч</td><td rowspan="3">В воде,
t воды до 40 °С</td></tr>
<tr><td>2*[1]</td><td>500-550</td><td>14-20</td></tr>
<tr><td>3</td><td>520-570</td><td>20-24</td></tr>
<tr><td>4</td><td>520-570</td><td>20-24</td><td>С печью
до t=200 °С,
далее на воздухе</td></tr>
<tr><td colspan="5">Двухступенчатая гомогенизация</td></tr>
<tr><td>5</td><td rowspan="2">1 ступень
400-450
2 ступень
500-550</td><td rowspan="2">1 ступень
4-8 ч
2 ступень
14-20 ч</td><td rowspan="2">Не более
50 °С/ч до температуры 1-ой ступени, выдержка, нагрев с печью до температуры 2-ой ступени</td><td>В воде,
t воды до 40°С</td></tr>
<tr><td>6</td><td>С печью
до t = 200 °С,
далее на воздухе</td></tr>
<tr><td>0</td><td colspan="2">Литое состояние</td><td>-</td><td>-</td></tr>
</table>

1 Примечание – Серийный режим

Определение температур фазовых превращений, в том числе точки солидуса, в слитке из сплава 1441 осуществляли по термограммам (рисунок 3.3), полученным в процессе нагрева образцов методом дифференциальной сканирующей калориметрии при термическом анализе.

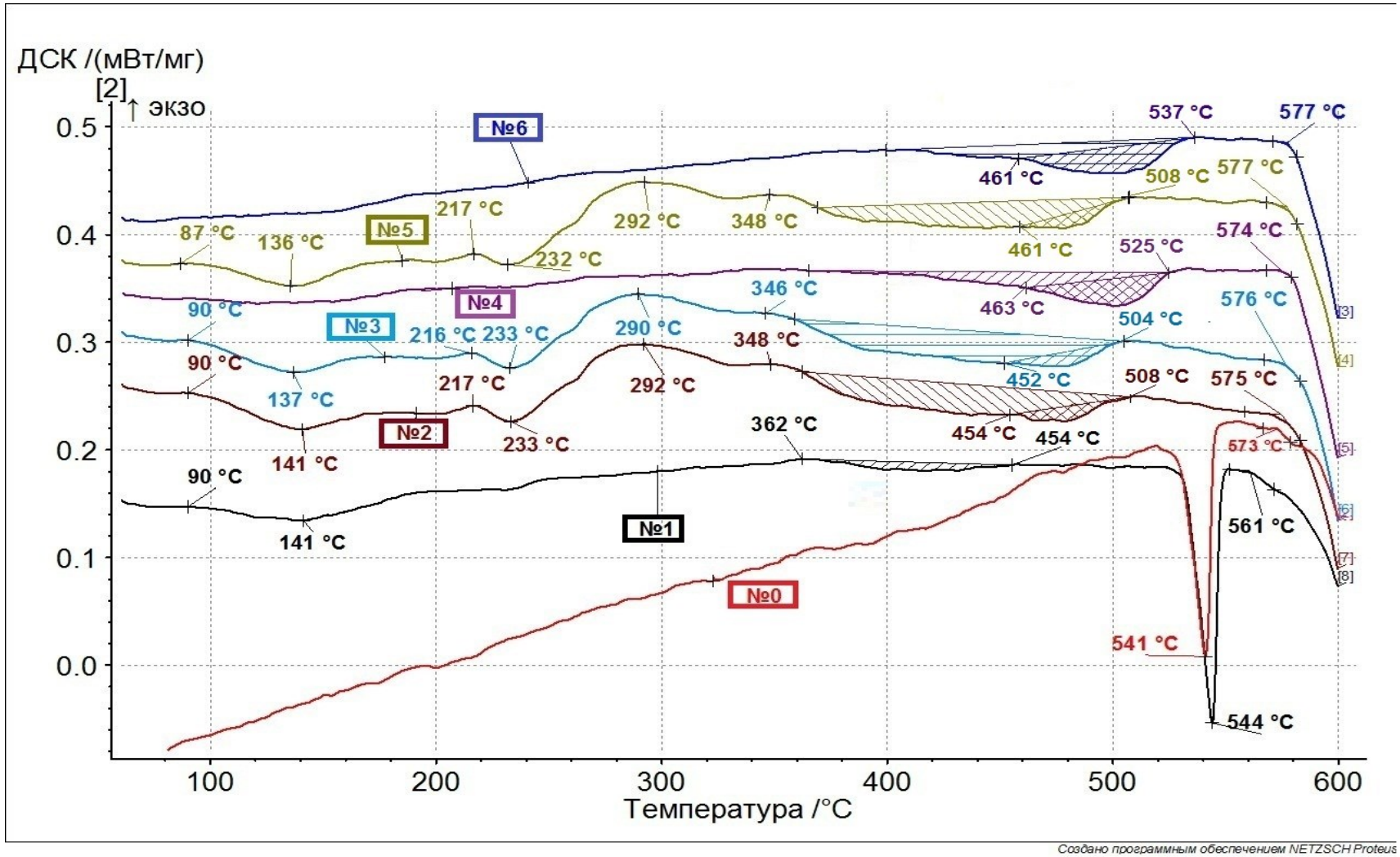


Рисунок 3.3 – Термограммы слитков сплава 1441 при нагреве образцов со скоростью 10 К/мин в среде гелия: режимы гомогенизации для кривых №№ 0-6 приведены в таблице 3.2

Идентификацию фазовых превращений при ДТА осуществляли на основании данных, полученных при моделировании с помощью программы Thermo-Calc, а также данных экспериментальных исследований методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [66-68, 71, 72].

В таблице 3.3 представлена трактовка характера изменения термограмм ДСК в исследуемом диапазоне температур.

Таблица 3.3 – Фазовые превращения в гомогенизированных по различным режимам образцах из слитков сплава 1441

№ п/п	Наименование температуры, характеризующей изменение фазового состояния	Номер режима гомогенизации (таблица 3.2)						
		0	1	2	3	4	5	6
		Температура фазового превращения, ^{O}C						
1	Температура выделения зон ГП (δ' и S'- фаз),°C	-	90	90	90	-	87	-
2	Растворение зон ГП	-	141	141	137	-	136	-
3	Выделение метастабильных δ' и S'- фаз	-	-	217	216	-	217	-
4	Растворение метастабильных δ' и S'- фаз	-	-	233	233	-	232	-
5	Выделение фаз T_1 и T_2	-	-	292-348	290-346	-	292-348	-
6	Выделение β'-фазы	362	362	-	-	-	-	-
7	Растворение фазы T_1	-	372-455	360-505	365-505	400-515	370-505	400-530
8	Растворение фазы T_2	-	-	455-505	455-505	455-520	460-505	460-530
9	Температура растворения эвтектических фаз на границах дендритов T,°C	541	544	-	-	-	-	-
10	Температура солидуса T_s,°C	573	561	575	576	574	577	577

Из термограммы «0», полученной на образце, не подвергавшемся гомогенизации, была установлена точка солидуса 573 °C - температура начала оплавления сплава. Для исключения появления «пережога» в структуре слитков из сплава 1441, с учетом технических характеристик

имеющихся на российских металлургических заводах печей гомогеннизации (погрешность определения температуры по объему печи ± 10 °С), максимальная температура гомогенизационного отжига была ограничена 550 °С. Указанная температура не противоречит приведенным выше результатам моделирования с использованием программы Thermo-Calc.

На термограммах образцов №№ 2, 3, 5, охлаждение которых с температуры гомогенизации проводили в холодной воде, зафиксированы заметные тепловые эффекты, связанные с выделением и растворением из пересыщенного твердого раствора в процессе динамического нагрева в низкотемпературном диапазоне (90-230 °С) частиц, аналогичных выделяющимся в закаленных образцах при старении упрочняющим фазам - δ′ и S′, а в температурном интервале 292-515°С – фаз T_1 и T_2.

Тепловой эффект на термограммах №0 и №1 в районе температуры 362°С связан с выделением дисперсоида - β'-фазы. В слитках, гомогенизированных по режимам №№ 2, 3, 4, 5, 6, тепловые эффекты от выделения β'-фазы при ДТА не обнаружены в связи с тем, что ее выделение произошло ранее, в процессе гомогенизации по указанным режимам. При последующих нагревах до температуры гомогенизации (520-570°С) растворения частиц β'-фазы не наблюдается, что подтверждается нижеприведенными результатами исследований структуры слитков методами просвечивающей электронной микроскопии.

В интервале температур 450-515 °С на термограммах выделены штриховкой участки, соответствующие температурным диапазонам растворения вторичных эвтектических фаз T_1 и T_2.

В образцах № 0 (литом), № 1 (после низкотемпературной гомогенизации) и №№ 4, 6 (охлажденных с печью с температуры гомогенизации) тепловые эффекты в интервале температур 90-530°С выражены гораздо слабее, чем в образцах №№ 2, 3, 5. Это обусловлено обеднением твердого раствора легирующими компонентами ввиду присутствия на границах и в теле дендритов первичных (образцы №№ 0, 1) и

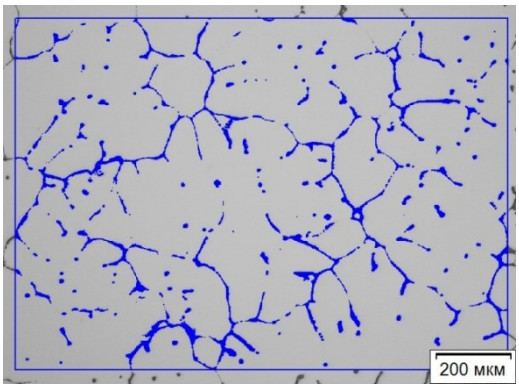
вторичных (образцы №№ 4, 6) частиц эвтектических составляющих, сформировавшихся при литье и в процессе медленного охлаждения с печью. Заметный тепловой эффект - эндотермический пик на термограммах № 0 и № 1 в интервале температур 530-550 °С обусловлен интенсивным растворением первичных неравновесных эвтектик на границах дендритных ячеек.

Следует отметить, что некоторые расхождения по температурам фазовых превращений, определенным методами компьютерного моделирования и методом ДТА (см. рисунки 3.1, 3.3 и таблицу 3.3) вызваны тем, что расчет по программе Thermo-Calc выполнен для равновесных условий (с медленными скоростями нагрева или охлаждения), а экспериментальные определения температур методом ДТА проведено в термокинетических условиях нагрева образцов до температуры плавления со скоростью 10 К/мин. Экспериментально установленные температуры фазовых превращений в сплаве 1441 в термокинетических условиях (см. таблицу 3.3) превышают на 30-50 °С температуры, полученные при компьютерном моделировании для равновесных условий (см. рисунок 3.1).

С целью оценки эффективности различных режимов гомогенизации была определена объемная доля эвтектических частиц, присутствующих в гомогенизированных слитках. Для автоматизированного определения эвтектические фазы (а также и вторичные фазы, выделившиеся в процессе медленного охлаждения с температуры гомогенизации) на фотографиях микроструктуры (рисунки 3.4 и 3.5) окрашены в синий цвет. На этих же рисунках приведены средние значения объемной доли нерастворившихся эвтектических фаз и вторичных фаз, присутствующих в образцах, гомогенизированных по различным режимам.

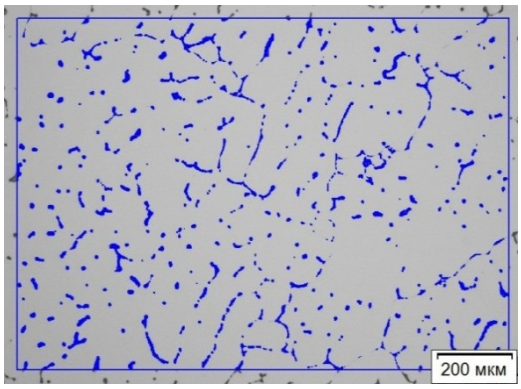
Из рисунка 3.4 следует, что режим № 3 (520-570 °С, 20-24 ч) и двухступенчатый режим № 5 (400-450 °С, 4-8 ч+ 500-550 °С, 14-20 ч) обеспечивают наиболее значительное уменьшение в слитке объемной доли первичных эвтектических неравновесных фаз, расположенных, главным

образом, на границах дендритов: с 4,2 % в негомогенизированном слитке до 0,9-1,1 % в гомогенизированных образцах.



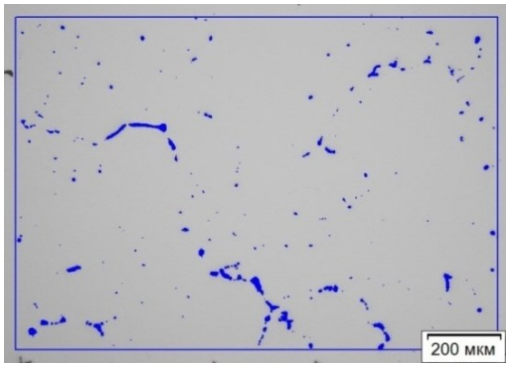
а

Литое состояние (без гомогенизации)



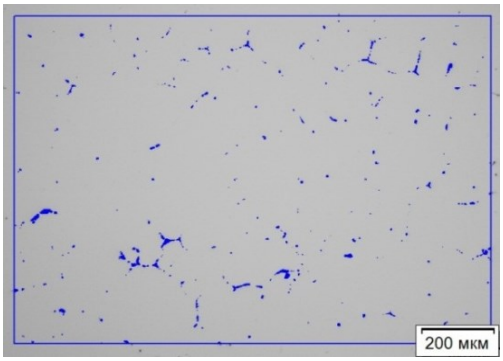
б

400-450 °С, 6 ч



в

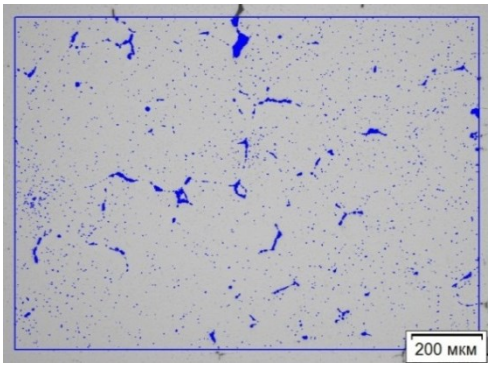
520-570 °С, 24 ч



г

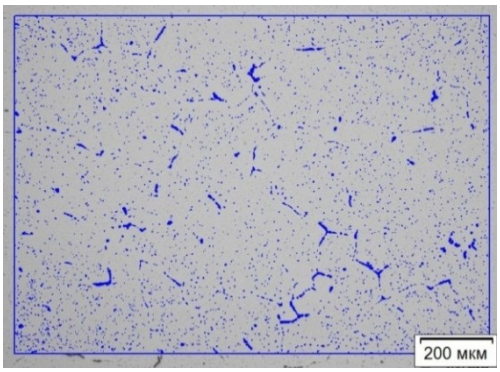
400-450 °С, 6 ч + 500-550 °С, 18 ч

Рисунок 3.4 – Влияние режимов гомогенизации слитка из сплава 1441 на объемную долю эвтектических фаз после охлаждения с температуры гомогенизации в воде: а – 4,2 %, б – 3,95 %, в – 1,0 %, г – 0,9 %



а

520-570 °С, 24 ч



б

400-450 °С, 6 ч + 500-550 °С, 18 ч

Рисунок 3.5 – Влияние режимов гомогенизации слитка из сплава 1441 на объемную долю эвтектических фаз после охлаждения с температуры гомогенизации с печью: а – 1,25 %; б – 1,9 %

В условиях промышленного производства в процессе медленного (с печью) охлаждения слитков с температуры гомогенизации происходит распад пересыщенного легирующими элементами твердого раствора с образованием дисперсных частиц вторичных фаз. В слитке, гомогенизированном по двухступенчатому режиму, степень пересыщения тердого раствора более высокая ввиду наиболее полного растворения первичных эвтектических фаз (рисунок 3.4 г), поэтому при распаде пересыщенного твердого раствора в процессе медленного охлаждении с температуры гомогенизации наблюдается выделение б*о*льшего количества вторичных частиц, по сравнению со слитком, гомогенизированным по одноступенчатому режиму (рисунок 3.5). Однако эти вторичные частицы растворяются в твердом растворе гомогенизированного слитка при нагреве до температуры деформации и не оказывают влияние на его технологическую пластичность.

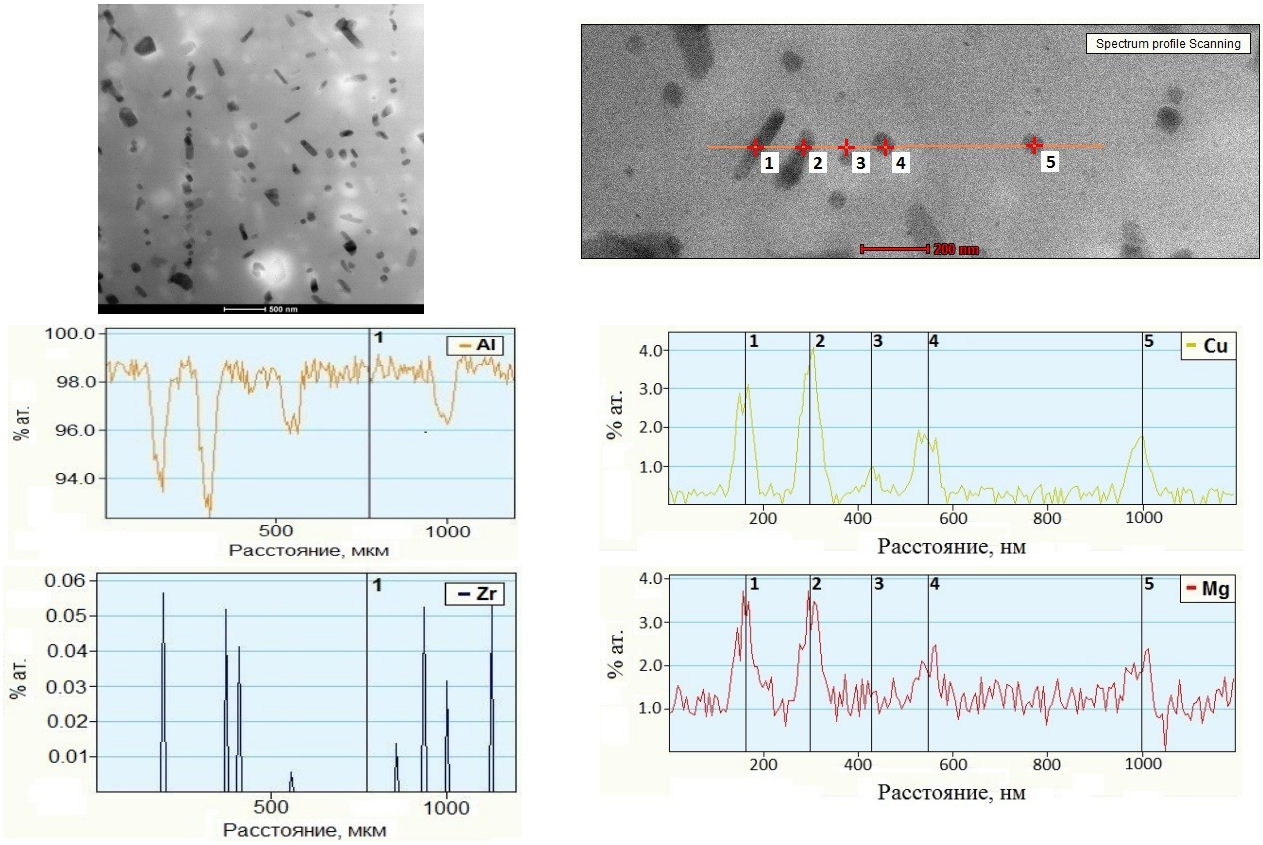
Фазовый состав слитков, гомогенизированных по различным режимам, исследовали на фольгах методом просвечивающей электронной микроскопии. На рисунках 3.6-3.9 приведены полученные изображения выделений дисперсоидов β'-фазы ($ZrAl_3$) и частиц δ′-фазы и S′-фазы.

Установлено, что в гомогенизированных слитках из сплава 1441, имеются вторичные выделения фаз: β' (Al_3Zr), δ' (Al_3Li) и S' (Al_2CuMg), размеры которых изменяются от 5 до 50 нм в зависимости от режима гомогенизации.

В структуре литого слитка (без гомогенизации) присутствуют, в основном, микрочастицы S-фазы. При гомогенизации из твердого раствора слитка выделяется цирконийсодержащий дисперсоид (β'-фаза), размер и количество частиц которого увеличиваются по мере повышения температуры и продолжительности гомогенизации (см. рисунки 3.6-3.9, таблица 3.4).

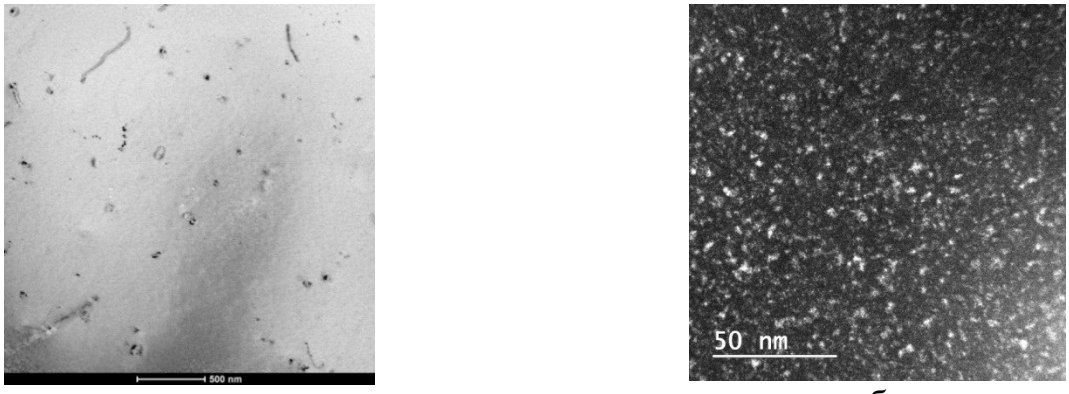
Дисперсоид в сплаве 1441 имеет сферическую форму и «композиционное» строение: сердцевина – фаза Al_3Zr, оболочка представляет

собой фазу δ', что по данным работ [29, 30] наблюдается и в других алюминий-литиевых сплавах (см. рисунки 3.8, в - 3.9, в).



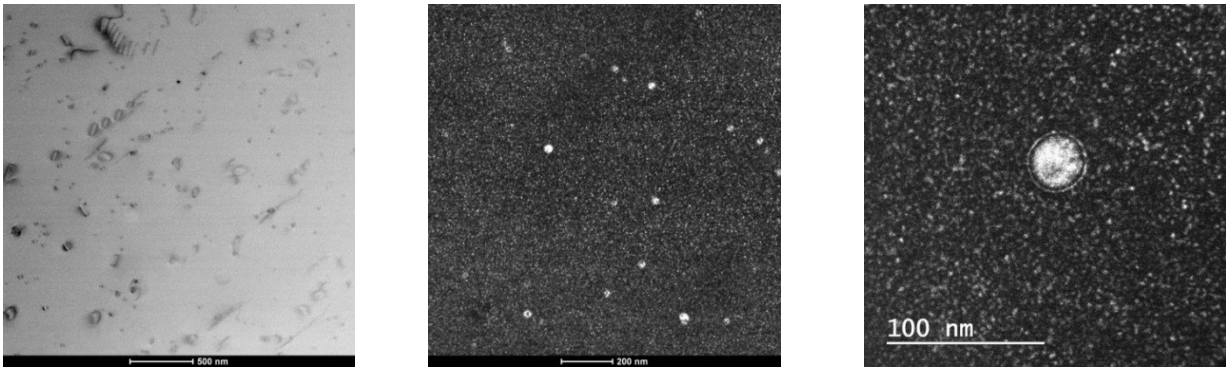
а б

Рисунок 3.6 – Светлопольное изображение микроструктуры слитка из сплава 1441 в литом состоянии (без гомогенизации): а – общий вид; б – вид микрочастиц S-фаз с профилями распределения элементов вдоль линии сканирования



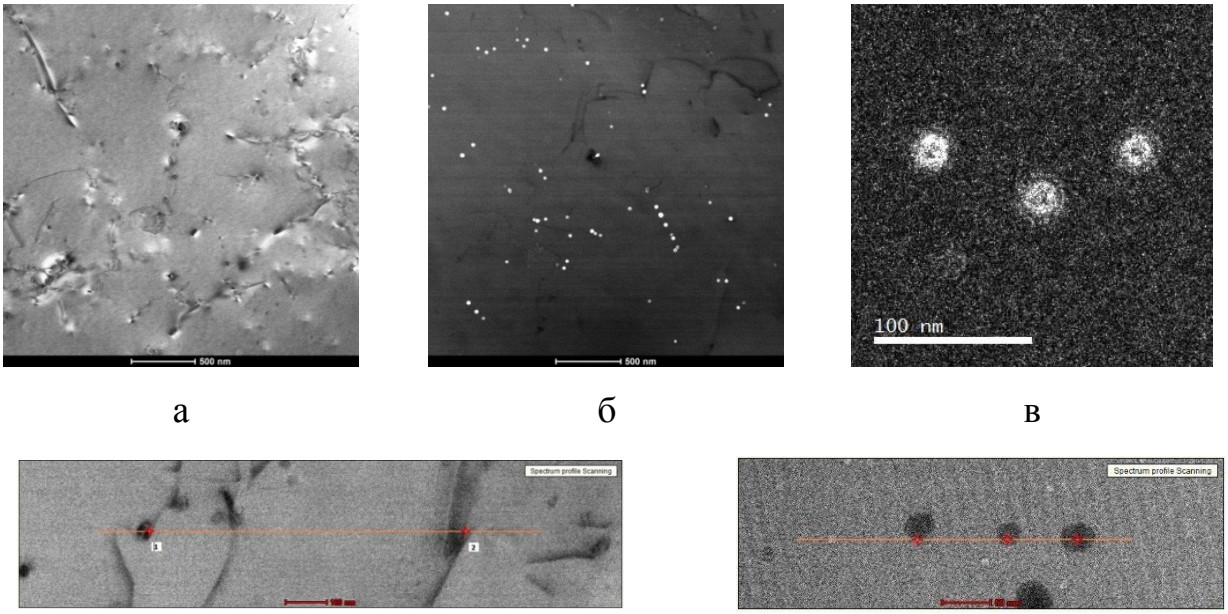
а б

Рисунок 3.7 – Микроструктура слитка из сплава 1441, гомогенизированного по режиму 1: а – светлопольное изображение выделений частиц дисперсоидов β′ ($ZrAl_3$); б – темнопольное изображение микрочастиц δ′-фаз и β′ ($ZrAl_3$)



а б в

Рисунок 3.8 – Микроструктура слитка из сплава 1441, гомогенизированного по режиму 2: а – светлопольное изображение частиц дисперсоидов β′ и дислокаций; б – темнопольное изображение микрочастиц δ′-фаз и дисперсоидов; в – темнопольное изображение структуры дисперсоида β′ с оболочкой из δ′-фаз



а б в

г д

Рисунок 3.9 – Микроструктура слитка из сплава 1441, гомогенизированного по режиму 5: а – светлопольное изображение выделений частиц S′-фаз и дисперсоидов β′ на дислокациях; б, в – темнопольные изображения микрочастиц дисперсоидов β′ и δ′-фаз; г, д – светлопольное изображение микрочастиц β′-фаз с линиями (красными) сканирования элементов.

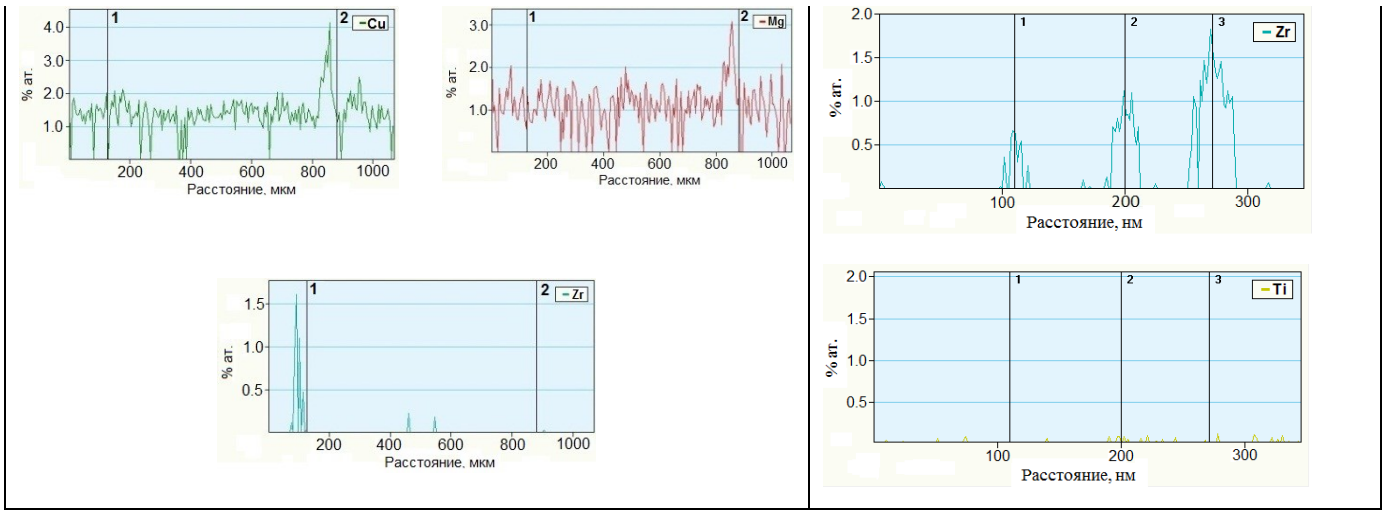


Рисунок 3.9 (продолжение) – Профили распределения Cu, Mg, Zr и Ti вдоль линий сканирования на рисунках 3.9 г, д, соответственно

Таблица 3.4 – Средний размер и плотность распределения частиц дисперсоидов (β′-фаза + δ') в гомогенизированных слитках из сплава 1441

№ режима гомоге-низации	Режим гомогенизации	Средний размер дисперсоида, нм	Плотность распределения, $1/мм^3 \times 10^{-10}$
1	400-450 °С, 4-8 ч	5-10	0,6
2*[1]	500-550 °С, 14-20 ч	25-31 (37)*[2]	1,66
3	520-570 °С, 20-24 ч	36-45 (44-50)	12,1
4	400-450 °С, 4-8 ч + 500-550 °С, 14-20 ч	25-32 (35-39)	5,9
0	Без гомогенизации	Дисперсоид не обнаружен	

2 Примечания

1 Серийный режим

2 В скобках указан размер дисперсоида β' (Al_3Zr) с оболочкой из фазы δ' (Al_3Li)

Морфология и количество вторичных частиц β′ (Al_3Zr), как и первичных эвтектических частиц в слитках, заметно влияют на пластичность сплава, в том числе технологическую, при горячей и холодной прокатке [9, 25].

При испытаниях на растяжение наиболее высокий уровень пластичности слитка (относительного удлинения δ = 115-125 % и относительного сужения Ψ (98-99 %) в сочетании с наименьшим сопротивлением деформации (временным сопротивлением разрыву σ_B = 20-27 МПа) достигается после гомогенизации по двухступенчатому режиму № 4 (400-450 °С, 4-8 ч+500-550 °С, 14-20 ч) в интервале температур испытаний 420-480 °С. Слиток, гомогенизированный по одноступенчатому режиму № 3 (520-570 °С, 20-24 ч) (таблица 3.5, рисунок 3.10), имеет практически такое же количество первичных неравновесных эвтектических фаз (0,9-1,0 %), что и слиток № 4 (см. рисунки 3.4, 3.5), но отличается большим количеством дисперсных частиц β'- фазы (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.5 – Влияние режимов гомогенизации и температуры испытаний при растяжении на сопротивление деформации (σ_B) и пластичность (δ) слитка из сплава 1441

Температура испытаний, °С	Режим гомогенизации								
	№ 2 (серийный) 500- 550 °С, 14-20 ч			№ 3 520-570 °С, 20-24 ч			№ 4 400-450$^{\pm5}$ °С, 4-8 ч + +500-550$^{\pm5}$ °С, 14-20 ч		
	σ_B, МПа	δ, %	ψ, %	σ_B, МПа	δ, %	ψ, %	σ_B, МПа	δ, %	ψ, %
360	49	56	95	44	58	97	40	90	97
380	43	60	95	39	70	96	31	98	97
400	33	64	96	35	93	97	28	105	98
420	31	77	98	30	98	97	27	115	98
440	29	82	98	28	108	98	21	122	99
460	27	98	99	26	112	99	20	125	99
470	23	95	99	25	110	97	20	124	99
480	20	94	97	20	107	90	20	125	99
500	19	82	85	15	100	97	18	115	95

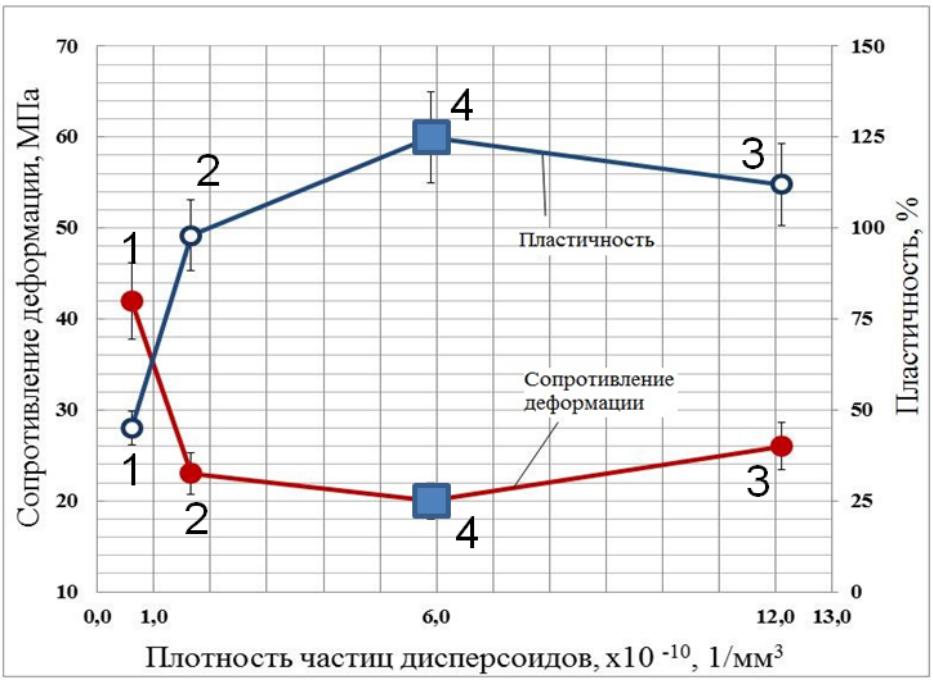
Влияние структурных факторов на характеристики технологической пластичности гомогенизированных слитков из сплава 1441 показано на рисунке 3.10.

В связи с тем, что количество первичных неравновесных эвтектических фаз в слитках после гомогенизации по режимам № 3 (520-570 °С, 20-24 ч) и № 4 (400-450 °С, 4-8 ч + 500-550 °С, 14-20 ч) практически одинаково (0,9-1,0 %), снижение на 15-20 % пластичности и рост сопротивления горячей деформации слитка, гомогенизированного по одноступенчатому режиму № 3, по сравнению со слитком, гомогенизированным по двухступенчатому режиму № 4, обусловлены увеличением количества цирконийсодержащих дисперсных частиц от $6{,}0\times10^{10}$ 1/мм^3 (режим гомогенизации № 4) до $12{,}1\times10^{10}$ 1/мм^3 (режим гомогенизации № 3).

Следует отметить особенности деформации алюминий-литиевого сплава, содержащего композиционные частицы дисперсоидов и частицы δ'-фазы. В процессе нагрева и при температуре прокатки происходит растворение оболочки, образованной частицами фазы δ'(Al_3Li), расположенной вокруг частиц β′(Al_3Zr) (см. рисунок 3.3 и таблицу 3.3). Это может привести при горячей деформации к сегрегации лития вокруг частиц β′ и неоднородности деформации, сопровождающейся появлением полос сдвига с повышенной концентрацией лития. При холодной деформации механизм образования полос сдвига обусловлен несовпадением плоскостей скольжения упорядоченных когерентных частиц δ'-фазы с матрицей [30, 31].

Полосы сдвига приводят к появлению слоистой структуры в катаных полуфабрикатах из Al-Li сплавов, что уменьшает максимальную степень деформации за проход при холодной прокатке листов, отрицательно влияет на механические свойства, особенно в направлении по толщине в массивных полуфабрикатах, а также вызывают эффект «обратной» анизотропии [29, 30, 52, 60].

а



б

Рисунок 3.10 – Влияние структурных факторов: объемной доли частиц эвтектических фаз (а) и плотности распределения частиц дисперсоидов (б) на сопротивление деформации и пластичность при горячей деформации в интервале температур 420-470 °С слитков, гомогенизированных по различным режимам: 1 – 400-450 °С, 4-8 ч; 2 – 500-550 °С, 14-20 ч; 3 – 520-570 °С, 20-24 ч; 4 – 400-450 °С, 4-8 ч+500-550 °С, 14-20 ч

В слитке сплава 1441 были также обнаружены частицы (размером 1-2 мкм) алюминидов литейного происхождения, содержащие, как показал МРСА, железо, никель, марганец, медь. Эти частицы не растворяются при гомогенизации и последующих высокотемпературных нагревах в процессе горячей прокатки и термической обработки и оказывают, как известно, отрицательное влияние на технологическую пластичность и служебные характеристики материала, особенно трещиностойкость [9, 148].

Исследование влияния режима гомогенизации на характеристики пластичности горячекатаных и холоднокатаных листовых заготовок при холодной деформации также подтвердили преимущества по сопротивлению деформации и пластичности двухступенчатого режима гомогенизации по сравнению с одноступенчатым режимом (таблица 3.6). Это может быть связано с меньшим размером и более низкой плотностью дисперсоидов – частиц $\beta'(Al_3Zr)$, полученных после двухступенчатой гомогенизации по сравнению с одноступенчатой гомогенизацией по режиму 520-570 °С, 20-24 ч (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.6 –Механические свойства при комнатной температуре горяче- и холоднокатаных заготовок (подката) для холодной рулонной прокатки листов толщиной 0,25 мм из сплава 1441

Режим гомогенизации	№ листа	Толщина заготовок, мм	Механические свойства*[3]		
			σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
Двухступенчатый 400-450 °С, 4-8 ч+ 500-550 °С, 14-20 ч	1	6*[1]	250-260 / 254	150-160 / 155	18-20 / 19
	2	3*[2]	220-239 / 223	140-175 / 155	17- 20 / 18
Одноступенчатый 520-570 °С, 20-24 ч	3	6*[1]	257-280 / 265	165-180 / 170	14-18 / 16
	4	3*[2]	234-255 / 245	175-195 / 190	11-18 / 16

3 Примечания
1 Горячекатаный лист (без отжига)
2 Холоднокатаный лист, подвергнутый смягчающему промежуточному отжигу
3 Приведены значения характеристик мин-макс / среднее

3.1.3 Исследование влияния температуры и продолжительности искусственного старения на структуру, механические и коррозионные свойства листов из сплава 1441, разработка режима старения

Исследованные листы сплава 1441 изготавливали из слитков сечением 300х1100 мм, отлитых в промышленных условиях по серийной технологии.

Гомогенизацию проводили по опытному двухступенчатому режиму, обеспечивающему повышенную технологическую пластичность слитка (см. таблицу 3.4). Затем слитки подвергали травлению в растворе азотной и ортофосфорной кислот для стравливания поверхностных окислов лития и магния на глубину 2-3 мм.

При выборе технологии прокатки листов толщиной 0,25 мм из сплава 1441 были использованы общие для большинства алюминиевых сплавов закономерности по влиянию на качество и свойства листов величины обжатия, числа проходов при прокатке, скорости прокатки, геометрии очага деформации, пластичности и сопротивления деформации материала слитков и горячего подката [8].

Горячую прокатку слитков, нагретых до установленной оптимальной температуры 420-470 °С (см. таблицу 3.6), осуществляли поперечно-продольным методом на четырехвалковом реверсивном стане горячей прокатки «Кварто-2840» до толщины проката 6,0-7,0 мм со сверткой в рулон.

Повышение технологической пластичности гомогенизированных по двухступенчатому режиму слитков из сплава 1441 позволило использовать при их горячей прокатке схему обжатий, аналогичную схеме для слитков из сплавов типа Д16:

- обжатия в первых 3-4 проходах составляли 2-4 % для равномерной приварки плакирующих планшет,
- степень деформации при температуре прокатки за проход увеличивали от 3-4 % на 4 проходе до 40-42 % на последних 21-23 проходах.

Учитывая, что сплав 1441 склонен к естественному старению, время перерыва между горячей и холодной прокаткой (а также промежуточным отжигом и холодной прокаткой) не превышало двух суток.

Холодную рулонную прокатку на окончательную толщину проводили по схеме обжатий, выбранной с учетом исключения растрескивания металла на кромках листа (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Схема холодной прокатки рулонов сплава марки 1441

Толщина, мм	Количество проходов	Схема обжатий, мм
0,25	4	6,0-5,0-4,1-3,3-2,8
		промежуточный отжиг, обрезка кромок
	4	2,8-2,4-1,9-1,4-1,1
		промежуточный отжиг, обрезка кромок
	3	1,1-0,67-0,42-0,25

Хорошее состояние кромок является одним из основных условий получения качественной продукции и достижения высоких скоростей прокатки. С целью восстановления пластичности листов из сплава 1441, нагартованных в процессе холодной прокатки, на толщинах 2,8 и 1,1 мм применялся смягчающий отжиг по режиму 420-440 °С, 1 ч.

Электронно-микроскопическое исследование с применением микрорентгеноспектрального анализа фаз показало (рисунок 3.11), что в структуре отожженных холоднокатаных листов присутствуют относительно крупные, особенно на границах зерен, частицы S-фазы (Al_2CuMg) протяженностью до 0,5 мкм (рисунок 3.11, а, б), а также β′-фаза (рисунок 3.11, в). Выделений δ′-фазы не обнаружено.

Муар, наблюдаемый в частицах β′-фазы, свидетельствует о нарушении когерентности и некоторой разориентировке в процессе деформации кристаллических решеток β′-фазы и матрицы. В составе дисперсоида в

отожженных листах обнаружено, наряду с цирконием, присутствие титана (рисунок 3.11, в).

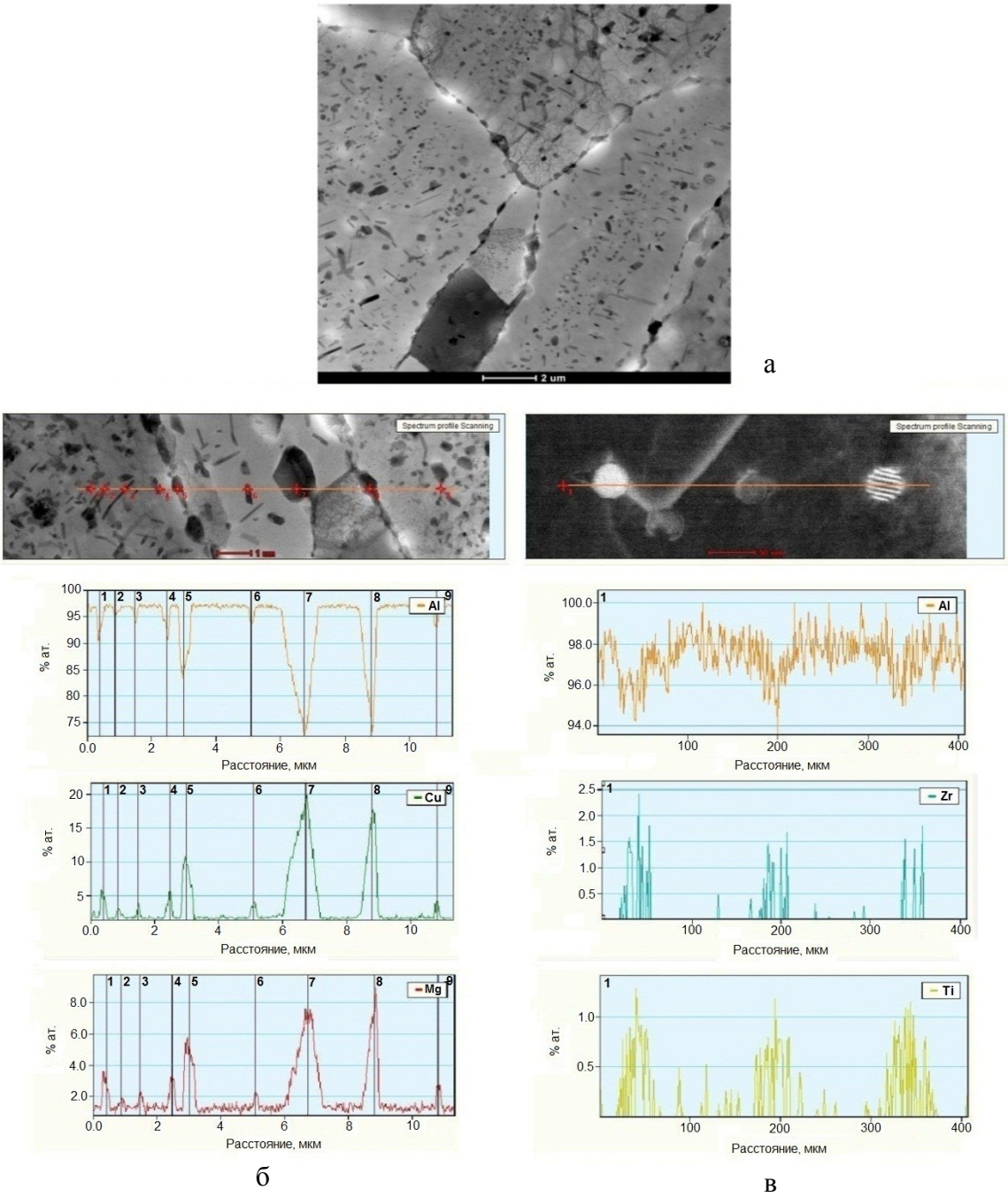


Рисунок 3.11 – Электронно-микроскопическое изображение структуры холоднокатаного листа (1,1 мм) из сплава 1441 после промежуточного отжига (а); выделения частиц S-фаз и β′-фазы с профилями распределения элементов вдоль линии сканирования: (б) меди и магния;
(в) циркония и титана

Выделение S-фазы в процессе смягчающего отжига горяче- или холоднокатаного подката листов сопровождается снижением концентрации меди и магния в алюминиевом твердом растворе (таблица 3.8), что приводит к снижению сопротивления деформации при холодной прокатке (см. таблицу 3.7) и повышению технологической пластичности отожженного материала.

Таблица 3.8 – Содержание компонентов в твердом растворе листов из сплава 1441

Состояние листов	Массовая доля, %				
	Al	Li	Mg	Cu	Zr
До отжига	95,7	0,50	0,80	1,50	0,03
После отжига	98,8	1,80	0,22	0,01	0,00

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.

Следует отметить, что данные, приведенные в таблице 3.8, получены в результате компьютерного моделирования состава твердого раствора при температуре максимальной растворимости и после медленного охлаждения в равновесных условиях до комнатной температуры. Экспериментальное определение состава твердого раствора, проведенное при исследовании фольг, дает, согласно методике, полуколичественный результат, но при этом качественно согласуется с расчетными значениями.

До процесса закалки рулоны разрезали на листы с максимальной длиной ~ 4000 мм, так как тонкие длинные листы обычно испытывают в процессе закалки сильное коробление при нагреве и, особенно, при охлаждении.

Закалку листов выполняли в промышленных условиях по режиму 535 °С, 10 мин, нагрев в селитровой ванне, которая, как известно, обеспечивает б***о***льшую однородность и скорость нагрева, чем воздушная печь.

В свежезакаленном состоянии (не более 4 ч после закалки) листы для устранения коробления и закалочных напряжений подвергали правке - сначала прогладке на стане, а затем - растяжению по технологии, принятой для тонких листов из серийного сплава Д16. Общая степень остаточной деформации при правке составляла ~ 1,0 %.

Из закаленных и естественно состаренных листов сплава 1441 были вырезаны заготовки под образцы и состарены по различным режимам, в том числе по двум серийным режимам – Т1 и Т11, принятым для листов из сплава 1441 толщиной более 1,2 мм, которые не обеспечивают при производстве тонких листов требуемую стабильность свойств.

3.2 Структура, механические и коррозионные свойства тонких листов из сплава 1441, состаренных по различным режимам

В ранее проведенных исследованиях автора с сотрудниками [30, 61], а также в ряде других работ, например [35, 49-52, 54, 56-59, 65, 66, 72], установлено, что алюминий-литиевые сплавы в состаренном состоянии имеют сложный фазовый состав, существенно зависящий от содержания основных легирующих элементов Li, Cu, Mg, элементов-антирекристаллизаторов и примесей, а также от режимов термической обработки. Несмотря на большое количество имеющихся экспериментальных данных по алюминий-литиевым сплавам, для тонких листов из сплава 1441, используемых при изготовлении СИАЛ, были проведены исследования с целью разработки режима старения, обеспечивающего получение требуемого стабильного комплекса свойств.

Полученные ранее диаграммы фазовых превращений при старении Al-Li сплавов в широком температурно-временном интервале, а также известные закономерности по влиянию состава, кристаллического строения, размера и количественного соотношения фаз (β (Al_3Zr), δ' (Al_3Li), S (Al_2CuMg), T_1 (Al_2CuLi)), выделившихся в процессе искусственного старения, типа текстур твердого раствора и упрочняющих фаз на механические свойства послужили основой при назначении температурно-временных параметров режимов старения, выбранных для исследования их влияния на структуру и комплекс механических и коррозионных свойств листов [68].

Исследованные листы из сплава 1441 в термоупрочненном состоянии имеют однородную мелкозернистую рекристаллизованную структуру (рисунок 3.12). Размер зерна в плоскости прокатки составляет 10-20 мкм.

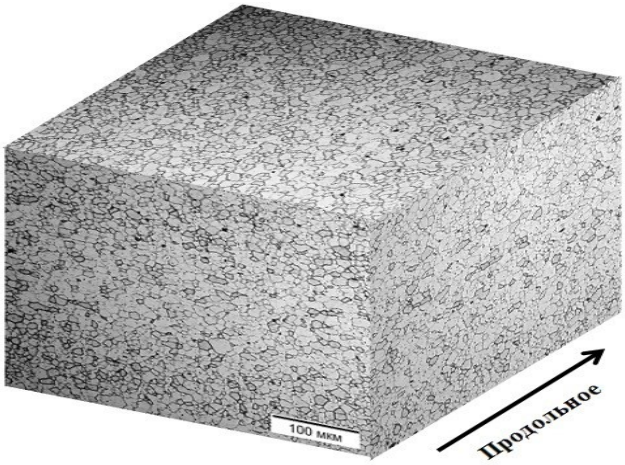


Рисунок 3.12 – Микроструктура листа толщиной 0,25 мм из сплава 1441

Механические свойства образцов после различных режимов искусственного старения приведены в таблице 3.9. Получено, что большинство исследованных режимов обеспечивают требуемый уровень механических свойств листов для использования в алюмостеклопластике СИАЛ: σ_B=400-445 МПа, $\sigma_{0,2}$=300-380 МПа, δ=7-13 % (в продольном направлении). Однако изменение температурно-временных параметров

исследованных режимов старения оказывает заметное влияние на относительное удлинение (δ) и склонность тонких листов из сплава 1441 к расслаивающей коррозии (РСК).

Основные особенности тонкой структуры листов из сплава 1441 в зависимости от режимов старения также приведены в таблице 3.9 и на рисунках 3.13-3.16 [60].

В структуре закаленных и естественно состаренных листов (режим 1) в матрице присутствуют в основном мелкие выделения (диаметром не более 5 нм) когерентной упорядоченной метастабильной δ'-фазы [29, 30], однородно распределенные по объему зерна (рисунок 3.13, а). На этом же рисунке видны выделившиеся в процессе гомогенизации исходных слитков [149] композиционные частицы дисперсоидов, сердцевина которых состоит из β′-фазы (Al_3Zr), а оболочка – из частиц δ'.

Таблица 3.9 – Влияние режимов старения на механические и коррозионные свойства, фазовый состав, особенности тонкой структуры листов толщиной 0,25 мм из сплава 1441 [60]

№ п/п	Режим старения	σ_B, МПа,	$\sigma_{0,2}$, МПа,	δ, %	РСК, балл	Фазы (средний размер)			ЗСВ
						В зерне		На границах зерна	
		Мин-макс / среднее				δ'	S', T_1		
1	Естественное старение **(Т)**	365 – 375 / 370	250 – 260 / 255	11,5 – 12,5 / 12,0	3 / 4	Однородно **δ'** ~ менее 5 нм	Фаз нет	Фаз нет	Практически отсутствует
2	150 °С, 30 ч **(Т1)**	430 – 445 / 435	315 – 320 / 315	12,0 – 13,5 / 13,0	5 / 6	Неоднородно: по зерну **δ'** менее 5 нм, в зоне у границы шириной ~100 нм **δ'** ~15-20 нм	**S'** – на дислокациях незначительное количество	Частицы **S**-фазы в отдельных стыках, незначительное количество	Практически отсутствует
3	170 °С, 30 ч	400 – 410 / 405	300 – 310 / 300	13,0 – 13,5 / 13,0	2 / 3	Неоднородно по зерну **δ'** ~5-20 нм	**S'** – на дислокациях больше, чем в образце № 2	Прерывистые цепочки **S**-фазы ~50-100 нм	Практически отсутствует
4	200 °С, 10 ч	410 – 425 / 415	315 – 320 / 320	10,0 – 11,5 / 10,0	4 / 4	Неоднородно, **δ'** ~10 нм, укрупнение **δ'** до 40 нм у границ ЗСВ и межфазных	**S'** – на дислокациях, больше, чем в образце № 2	Дискретные выделения **S**-фазы ~100 нм - незначительное кол-во	ЗСВ переменной ширины, местами до ~ 150-400 нм
5	150 °С, 4 ч + 170 °С, 30 ч **(Т11)**	425 – 445 / 435	315 – 335 / 325	10,0 – 12,5 / 11,0	7 /8	Однородно, **δ'** ~10-15 нм	**S'** – на дислокациях, больше, чем в образце № 2	Сплошные цепочки мелких частиц **S** ~30-80 нм	Практически отсутствует

№ п/п	Режим старения	σ_B, МПа,	$\sigma_{0,2}$, МПа,	δ, %	РСК, балл	Фазы (средний размер)			ЗСВ
						В зерне		На границах зерна	
		Мин-макс / среднее				δ'	S', T_1		
6	150 °C, 4 ч + 200 °C, 15 ч	390 – 405 / 400	315 – 335 / 325	8,0 – 10,0 / 9,0	3 / 3	Однородно, **δ'** ~20 нм	**S'** – на дислокациях и гомогенно	Прерывистые цепочки частиц **S**-фазы ~120 нм	Неизменной ширины 100-120 нм
7	150 °C, 15 ч + 200 °C, 15 ч	385 – 400 / 395	330 – 340 / 335	6,0 – 10,0 / 8,0	3 / 2	Однородно, **δ'** ~10-15 нм	**S'** – на дислокациях и гомогенно, большое количество	Дискретные глобулярные частицы **S**-фазы ~100-200 нм	Неизменной ширины ~200 нм
8	170 °C, 20 ч + 200 °C, 10 ч	420 – 435 / 425	330 – 350 / 335	9,0 – 10,0 / 9,0	5 / 6	Однородно, **δ'** ~15-20 нм	**S'** – на дислокациях и гомогенно, **T_1**-фаза – незначительное количество	Сплошные цепочки грубых частиц **S**-фазы ~100-360 нм, толщиной до 60 нм	Неизменной ширины ~120 нм
9	200 °C, 15 ч + 150 °C, 15 ч	440 – 445 / 445	375 – 390 / 380	6,5 – 7,5 / 7,0	3 / 3	Неоднородно, **δ'** ~20-40 нм	**S'** – на дислокациях и гомогенно	Дискретные выделения глобулярных частиц **S**-фазы ~90-110 нм	Переменной ширины 130-180 нм

№ п/п	Режим старения	σ_B, МПа,	$\sigma_{0,2}$, МПа,	δ, %	РСК, балл	Фазы (средний размер)			ЗСВ
						В зерне		На границах зерна	
		Мин-макс / среднее				δ'	S', T_1		
10	200 °C, 10 ч + 170 °C, 8 ч	385 – 415 / 400	315 – 350 / 330	8,0 – 10,0 / 9,0	3 / 3	Неоднородно, **δ'** ~5-20 нм	**S'** – на дислокациях и гомогенно **T_1**-фаза – незначительное кол-во	Дискретные выделения глобулярных частиц **S**-фазы ~100-200 нм	Переменной ширины, у стыков зерен ~100-150 нм
11	Трехступенчатый режим: температурный интервал T = 150-200 °C, суммарное время τ = 25-30 ч, $T_I>T_{II}<T_{III}$, $\tau_I<<\tau_{II}>\tau_{III}$	415 – 435 / 425	320 – 325 / 325	8,5 – 14,5 / 12,0	3 / 2	Неоднородно **δ'** ~10-15 нм, укрупнение **δ'** до 25 нм у стыков зерен и в отдельных зонах на границе с ЗСВ	**S'** – на дислокациях и гомогенно	Дискретные выделения глобулярных частиц **S**-фазы ~150-300 нм	Переменной ширины, ~100-120 нм
12	Трехступенчатый режим: температурный интервал T = 150-200 °C, суммарное время τ = 35-40 ч, $T_I>T_{II}<T_{III}$, $\tau_I<\tau_{II}>\tau_{III}$	415 – 430 / 425	335 – 355 / 345	8,5 –9,5 / 9,0	3 / 3	Неоднородно, **δ'** ~5-20 нм укрупнение **δ'** до 25 нм. в отдельных зонах на границе с ЗСВ	**S'** – на дислокациях и гомогенно **T_1**-фаза, незначительное количество	Дискретные выделения глобулярных частиц **S**-фазы ~150-300 нм	Переменной ширины, не более 80-135 нм

После одноступенчатых режимов искусственного старения (таблица 3.9, режимы 2-4) наблюдается неоднородное по размерам распределение δ'-фазы в объеме зерна (рисунок 3.14, г). При повышении температуры и времени старения отмечается увеличение размера частиц сферической формы δ' от ~5-20 нм в теле зерна до 40 нм у границы зоны, свободной от выделений (ЗСВ) (рисунок 3.14, б). На дислокациях выделяется S′-фаза игольчатой формы, количество которой растет по мере повышения температуры старения в интервале 150-200 °С (рисунок 3.13, б), а на границах зерен отмечается наличие цепочек из частиц S-фазы размером от 50 до 100 нм. Появление у границ зерна ЗСВ шириной от 150 до 400 нм отмечается только после старения при 200 °С (рисунок 3.14, б).

Двухступенчатые режимы старения 6-8 при сочетании низкотемпературной 1-ой ступени (150-170 °С) и высокотемпературной 2-ой ступени (200 °С) приводит к однородному по объему зерна распределению δ'-фазы размером около 10-20 нм (рисунок 3.14, в). Двухступенчатое старение с более высокой температурой 1-ой ступени (200 °С) и пониженной температурой 2-ой ступени (150 °С и 170 °С) приводят к неоднородному выделению δ'-фазы по объему зерна и увеличению ее размера до ~ 40 нм (рисунок 3.14, б). Этим объясняется более высокое значение $\sigma_{0,2}$ (380 МПа) образцов, состаренных по режиму 9, по сравнению с другими режимами. Данный результат согласуется с известными данными [30] о влиянии размера частиц метастабильной упорядоченной δ'-фазы на величину упрочнения алюминий-литиевых сплавов: максимальное значение упрочнения, соответствующее предельному размеру частиц δ'-фазы (40 нм), составляет ~ 200 МПа при доле этих частиц 10-12 %.

Выделение S'-фазы после двухступенчатых режимов старения происходит как на дислокациях, так и гомогенно в объеме зерна (рисунок 3.13, в). На границах зерен располагаются выделения S-фазы в виде прерывистых цепочек, сформированных из частиц размером до 120 нм, либо изолированных частиц размером до 200 нм (рисунок 3.15, б, г). Повышение температуры первой ступени со 150 °С до 170 °С и выдержки до 20 ч,

приводит к существенному огрублению (до 360 нм) близкорасположенных частиц S-фазы на границах зерен (рисунок 3.15, в), что, вероятно, стало причиной существенного снижения стойкости к расслаивающей коррозии образцов, состаренных по режиму 8 [228].

Как и после одноступенчатого старения, ЗСВ у границ зерен практически отсутствует после старения с непродолжительной первой ступенью (150 °С, 4 ч) (режим 5 - стандартный режим Т11, рисунок 3.14, а). При остальных исследованных двухступенчатых режимах старения у границ зерен имеется ЗСВ шириной 100-200 нм, причем, в случае температур первой ступени 150 °С и 170 °С, ширина ЗСВ постоянна для каждого режима (режимы 6-8, рисунок 3.14, в). Повышение температуры первой ступени старения до 200 °С обуславливает появление у границ зерен ЗСВ переменной ширины от 100 до 200 нм (режимы 9, 10).

Двухступенчатое старение тонких листов по серийному режиму Т11 (режим 5) приводит к образованию непрерывных цепочек мелких частиц S-фазы (рисунок 3.15, а) и повышению склонности к РСК.

Для трехступенчатых режимов старения с высокой температурой 1-ой ступени (режимы 11, 12) также характерно неоднородное выделение δ'-фазы, размер которой в объеме зерен составляет 10-15 нм, а в зонах у стыков зерен и на границе с ЗСВ увеличивается до 25 нм (рисунок 3.14, б). S′-фаза выделяется в зерне на дислокациях и гомогенно (рисунок 3.13, в), а на границах зерен S-фаза – в виде прерывистых цепочек частиц величиной 150-300 нм. У границ зерен наблюдается ЗСВ шириной ~ 80-135 нм.

Следует отметить, что при старении как по двух- так и по трехступенчатым режимам в случае наличия ступеней с температурами 200 °С и 170 °С при продолжительности нагрева 8 - 20 часов отмечается выделение незначительного количества T_1-фазы (рисунок 3.13, г), которая практически не оказала влияния на механические свойства листов, состаренных по режимам 8, 10 и 12, хотя имеются данные о бóльшем вкладе в упрочнение алюминий-литиевых сплавов фазы T_1 по сравнению с фазами δ' и S' [30].

Сравнение фазового состава листов из сплава 1441, состаренных по ступенчатым режимам старения с результатами, представленными на полученных ранее диаграммах фазовых превращений при одноступенчатом старении сплава 1441 [68], показывает, что при ступенчатых режимах выделение фазы T_1 (Al_2LiCu) при температурах 170 и 200 °С происходит при том же времени выдержки (20 и 8 ч), что и при одноступенчатом старении (рисунок 3.13, г), однако, выделения фазы T_2 (Al_2LiMg) не наблюдается в отличие от данных, представленных на диаграмме для одноступенчатых режимов, для того же температурно-временного интервала (см. таблицу 3.9).

При исследовании методом ПЭМ был проведен микрорентгеноспектральный анализ фаз, присутствующих в состаренных листах. Пример профиля распределения легирующих элементов вдоль линии сканирования представлен на рисунках 3.15, д и 3.16. Было установлено, что кроме упрочняющих фаз, выделившихся при старении в листах, присутствуют также композиционные частицы размером от 20 до 70 нм дисперсоидов β′ с оболочкой из δ'-фазы (рисунки 3.13, а и 3.16) и интерметаллиды, содержащие в основном железо, марганец, медь, а также кремний [29, 149].

В ходе проведенного исследования установлено, что у листов из сплава 1441 в состав дисперсоидов (β′-фазы) входит кроме Al и Zr также и Ti, причем соотношение атомов Zr:Ti может составлять от 1:1 до 3:1 (рисунок 3.16). По результатам ранее проведенного исследования [149], в отличие от листов, в слитках присутствуют дисперсоиды Al_3Zr (β′-фаза), не содержащие Ti.

Получено, что различие по уровню прочностных характеристик листов, состаренных по большинству исследованных режимов, незначительное - около 10 % (σ_B = 400-445 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 300-345 МПа). Однако изменение температурно-временных параметров исследованных режимов старения, а, следовательно, фазового состава и структуры оказывает заметное влияние (до 1,5-2,0 раз) на относительное удлинение (δ = 7-13 %) и склонность тонких листов из сплава 1441 к расслаивающей коррозии (РСК = 2/3 - 7/8 баллов).

Наилучшее сочетание прочностных свойств (σ_B = 405-435 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 300-325 МПа) и относительного удлинения (δ = 11-13 %) достигается у искусственно состаренных листов, в структуре которых размер δ'-фазы в объеме зерна составляет 10-25 нм, ЗСВ отсутствует (режимы 2, 3, 5) или ее ширина не превышает 120 нм (режим 11). Снижение относительного удлинения до 7-8 % при том же уровне прочности наблюдается в случае увеличения ширины ЗСВ до 180-200 нм, а также при увеличении размера δ'-фазы до 40 нм (режимы 7, 9). Выделение при старении T_1-фазы приводит к снижению относительного удлинения (с 13 до 9 %), не оказывая влияния на прочность. Увеличение размера когерентной упорядоченной δ'-фазы до 40 нм приводит к повышению прочностных характеристик (σ_B = 445 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 380 МПа) и снижению относительного удлинения до 7 % (режим 9), что согласуется с результатами исследования, приведенными в работе [30].

Исследование взаимосвязи параметров структуры с коррозионными свойствами позволяет сделать вывод, что на склонность к РСК состаренных листов из сплава 1441 основное влияние оказывает характер распределения упрочняющих частиц S- и S'-фаз на границе и в объеме зерна: повышенную склонность к коррозии (6-8 баллов) имеют листы при наличии на границах зерен сплошных цепочек частиц S-фазы (режимы 5, 8), а также незначительного количества S'-фазы и неоднородного распределения в объеме зерна. Пониженная коррозионная стойкость отмечается также у листов, состаренных при температуре 150 °С (серийный режим Т1), в которых выделения S'-фазы практически отсутствуют.

Результаты испытаний на склонность к РСК показывают, что снижение склонности к расслаивающей коррозии (2-4 балла) листов из сплава 1441 после старения по режимам 6, 7, 9, 10-12 обусловлено формированием на дислокациях в объеме зерна частиц S′-фазы, затрудняющих перемещение дислокаций к границам, что снимает локальную концентрацию напряжений и препятствует выделению дискретных глобулярных частиц S-фазы размером 100-300 нм на границах зерен (рисунок 3.15 б, г, д). Это способствует уменьшению электрохимической гетерогенности и снижению концентрации напряжений у границ зерен [29, 249].

Статистическая обработка результатов проведена в соответствии с методикой, указанной в главе 2, и представлена в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Статистическая обработка механических свойств после различных режимов старения

№ п/п	Режим старения	Количество образцов	Характе-ристика	Размах варьирования $X_{min} – X_{max}$	Среднее значение $\overline{X}$	Дисперсия, s^2	Среднее квадрати-ческое отклонение, s	Коэффи-циент вариации V, %	Доверительный интервал $\overline{X}_{0,9}$
1	Естественное старение **(Т)**	10	σ_B, МПа	365 – 375	370	16,67	4,08	1,1	370±2,37
			$\sigma_{0,2}$, МПа	250 – 260	255	16,67	4,08	1,6	255±2,37
			δ, %	11,5 – 12,5	12,0	0,25	0,50	4,2	12,0±0,29
2	150 °С, 30 ч **(Т1)**	10	σ_B, МПа	430 – 445	435	35,83	5,99	1,4	435±3,47
			$\sigma_{0,2}$, МПа	315 – 320	315	2,50	1,58	0,5	315±0,92
			δ, %	12,0 – 13,5	13,0	0,30	0,55	4,2	13,0±0,32
3	170 °С, 30 ч	10	σ_B, МПа	400 – 410	405	22,22	4,71	1,2	405±2,73
			$\sigma_{0,2}$, МПа	300 – 310	300	10,00	3,16	1,1	300±1,83
			δ, %	13,0 – 13,5	13,0	0,04	0,21	1,6	13,0±0,12
4	200 °С, 10 ч	10	σ_B, МПа	410 – 425	415	35,83	5,99	1,4	415±3,47
			$\sigma_{0,2}$, МПа	315 – 320	320	2,50	1,58	0,5	320±0,92
			δ, %	10,0 – 11,5	10,0	0,23	0,48	4,7	10±0,28
5	150 °С, 4 ч + 170 °С, 30 ч **(Т11)**	10	σ_B, МПа	425 – 445	435	35,83	5,99	1,4	435±3,47
			$\sigma_{0,2}$, МПа	315 – 335	325	52,50	7,25	2,2	325±4,20
			δ, %	10,0 – 12,5	11,0	0,78	0,88	8,0	11±0,51
6	150 °С, 4 ч + 200 °С, 15 ч	10	σ_B, МПа	390 – 405	400	24,72	4,97	1,2	400±2,88
			$\sigma_{0,2}$, МПа	315 – 335	325	44,44	6,67	2,1	325±3,86
			δ, %	8,0 – 10,0	9,0	0,56	0,75	8,3	9,0±0,43

№ п/п	Режим старения	Количество образцов	Характе-ристика	Размах варьирования $X_{min} – X_{max}$	Среднее значение $\overline{X}$	Дисперсия, s^2	Среднее квадрати-ческое отклонение, s	Коэффи-циент вариации V, %	Доверительный интервал $\overline{X}_{0,9}$
7	150 °С, 15 ч + 200 °С, 15 ч	10	σ_B, МПа	385 – 400	395	35,83	5,99	1,5	395±3,47
			$\sigma_{0,2}$, МПа	330 – 340	335	13,61	3,69	1,1	335±2,14
			δ, %	6,0 – 10,0	8,0	1,69	1,30	16,2	8,0±0,75
8	170 °С, 20 ч + 200 °С, 10 ч	10	σ_B, МПа	420 – 435	425	35,83	5,99	1,4	425±3,47
			$\sigma_{0,2}$, МПа	330 – 350	335	52,50	7,25	2,2	335±4,20
			δ, %	9,0 – 10,0	9,0	0,10	0,32	3,5	9,0±0,18
9	200 °С, 15 ч + 150 °С, 15 ч	10	σ_B, МПа	440 – 445	445	4,44	2,11	0,5	445±1,22
			$\sigma_{0,2}$, МПа	375 – 390	380	46,94	6,85	1,8	380±3,97
			δ, %	6,5 – 7,5	7,0	0,17	0,41	5,8	7,0±0,24
10	200 °С, 10 ч + 170 °С, 8 ч	10	σ_B, МПа	385 – 415	400	105,56	10,27	2,6	400±5,96
			$\sigma_{0,2}$, МПа	315 – 350	330	150,00	12,25	3,7	330±7,10
			δ, %	8,0 – 10,0	9,0	0,44	0,67	7,4	9,0±0,39
11	Трехсту-пенчатый режим № 11[*1]	10	σ_B, МПа	415 – 435	425	41,39	6,43	1,5	425±3,73
			$\sigma_{0,2}$, МПа	320 – 325	325	4,44	2,11	0,7	325±1,22
			δ, %	8,5 – 14,5	12,0	5,69	2,39	19,8	12,0±1,38
12	Трехсту-пенчатый режим № 12[*1]	10	σ_B, МПа	415 – 430	425	24,72	4,97	1,2	425±2,88
			$\sigma_{0,2}$, МПа	335 – 355	345	55,56	7,45	2,2	345±4,32
			δ, %	8,5 –9,5	9,0	0,17	0,41	4,5	9,0±0,24

1 Примечание – Режимы указаны в таблице 3.9

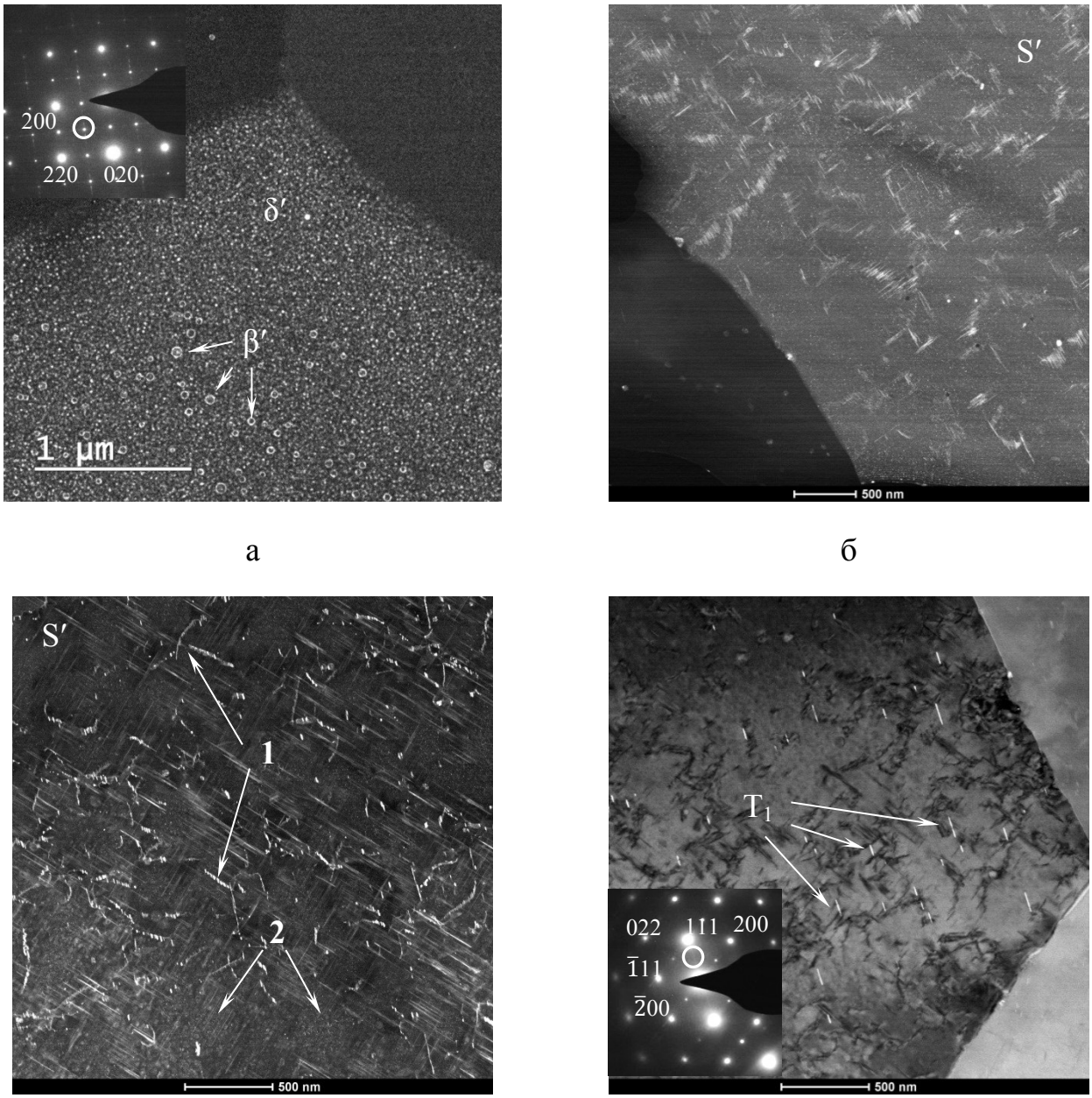
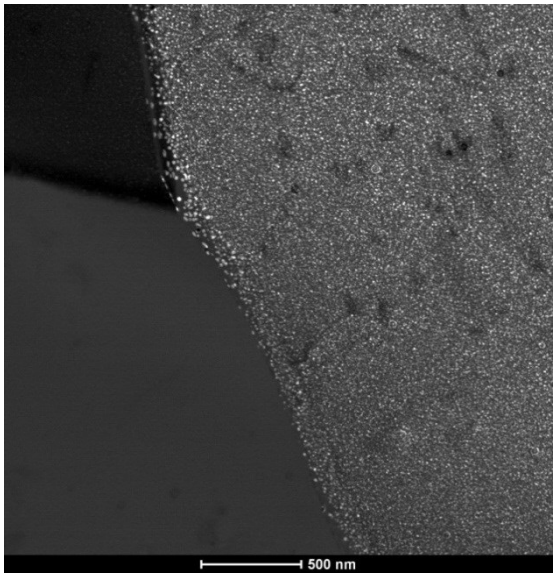
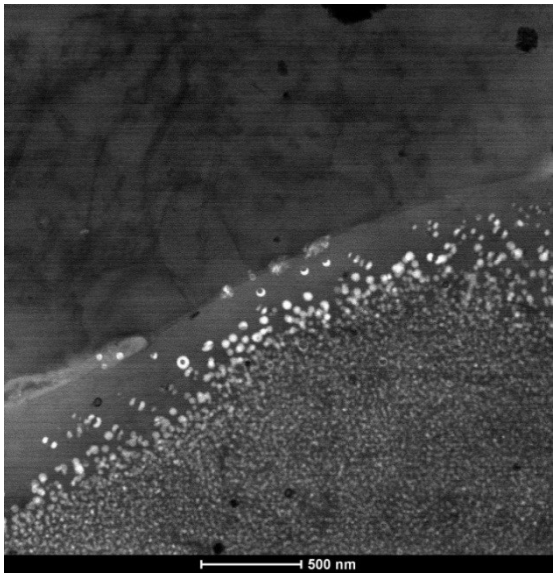


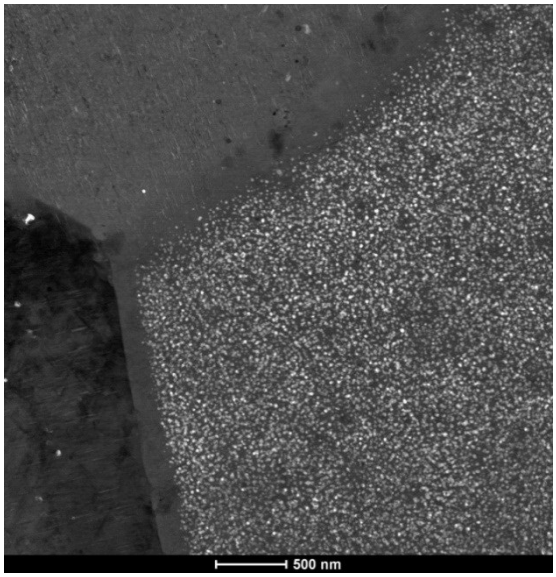
Рисунок 3.13 – Типичный вид темнопольных изображений выделений упрочняющих фаз в листах (0,25 мм) из сплава 1441, состаренных в соответствии с таблицей 3.9: а - δ' и β′ (режимы 1, 5, 6, 7, 8); б - S' на дислокациях (режимы 2, 3, 4, 5, 12); в - S': на дислокациях – 1, гомогенно в зерне – 2 (режимы 6, 7, 8, 9, 10, 11); г - T_1 (режимы 8, 10, 12). На вставках приведены электронограммы, отображающие дифракционные условия съемки, на которых отмечено положение диафрагмы объективной линзы.



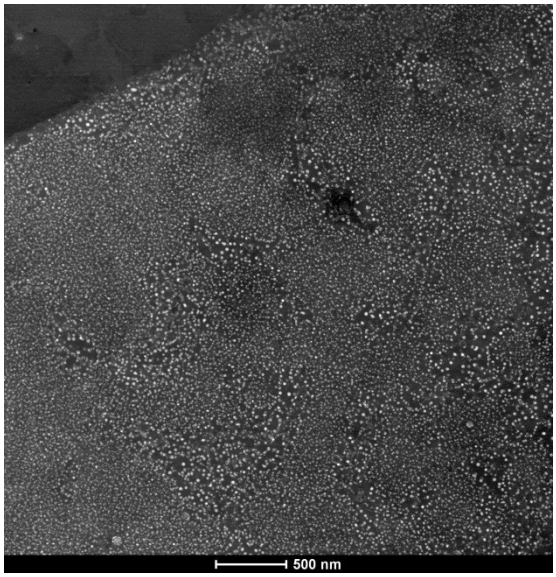
а



б

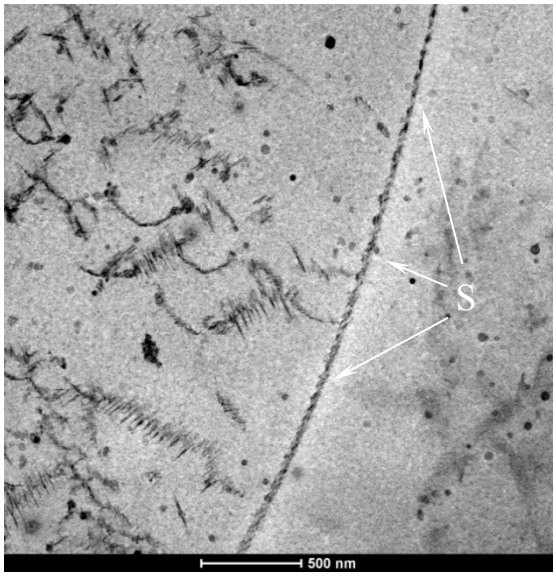


в

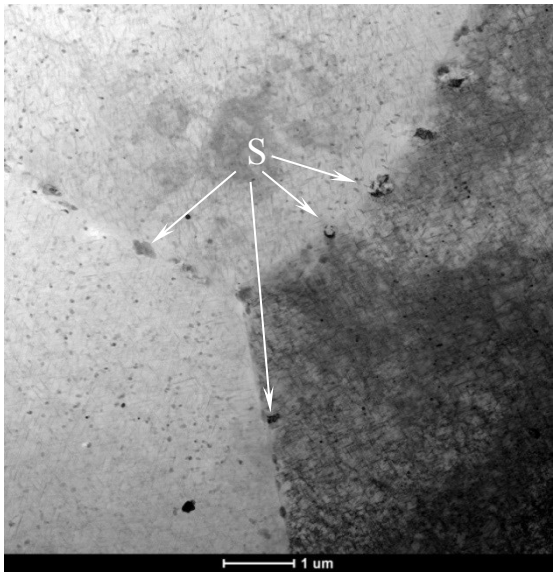


г

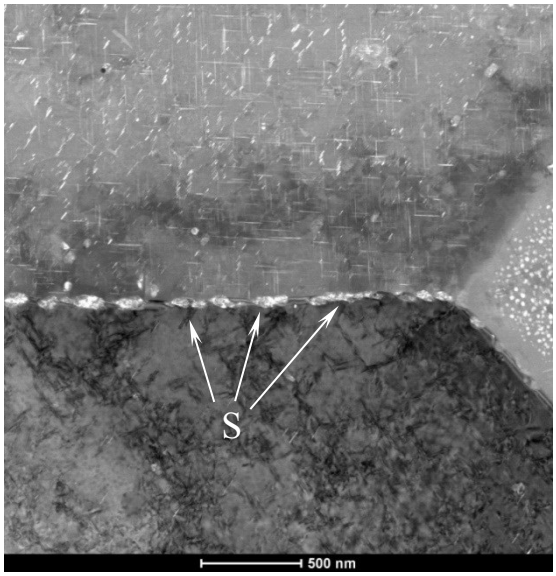
Рисунок 3.14 – Темнопольные изображения δ'-фазы и зоны, свободной от её выделений, в листах (0,25 мм) из сплава 1441, состаренных в соответствии с таблицей 3.9: а – режимы 2, 3, 5; б – режимы 4, 9, 10, 11, 12; в – режимы 6, 7, 8; г - режим 3



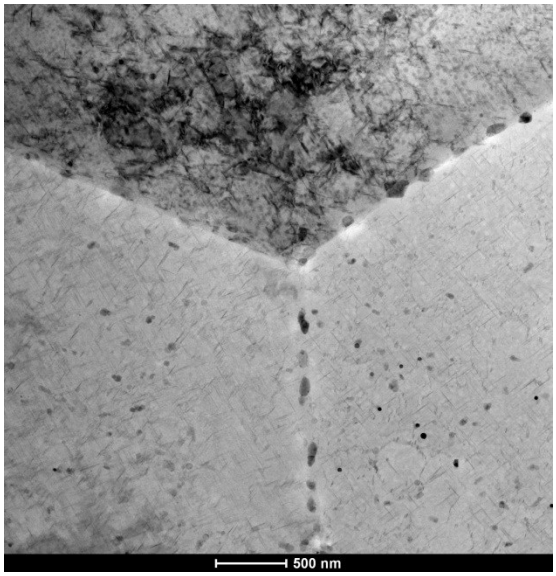
а



б

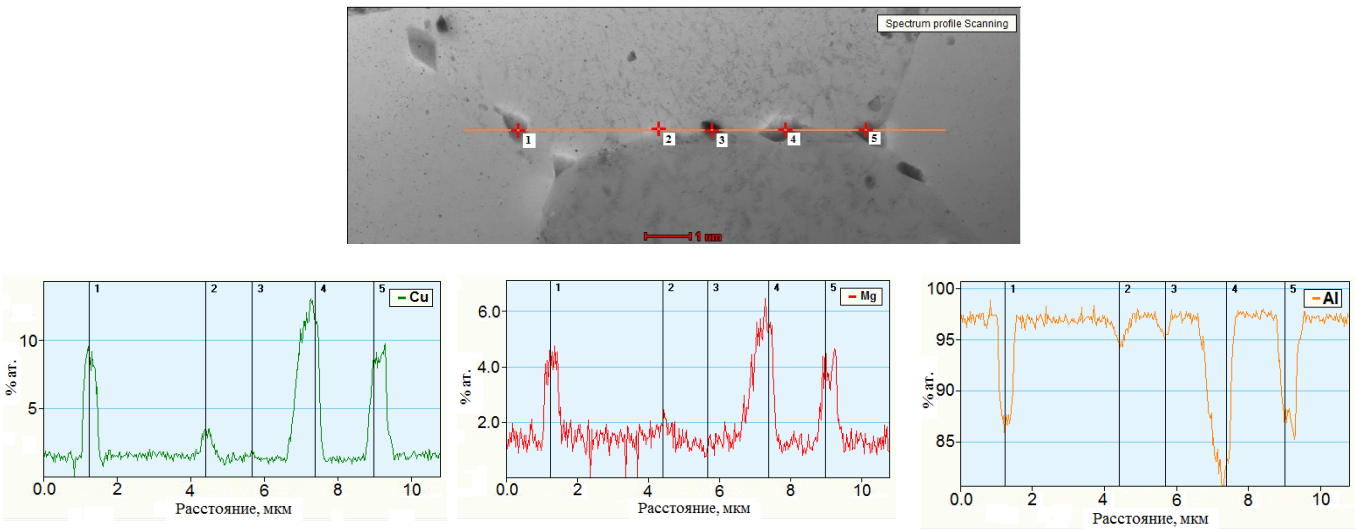


в



г

Рисунок 3.15 – Типичный вид выделений S-фазы на границах зерен в листах (0,25 мм) из сплава 1441, состаренных в соответствии с таблицей 3.9: а – режим 5; б – режимы 7, 9, 10, 11; в – режим 8; г – режимы 4, 6, 12; д – профили распределения легирующих элементов вдоль линии сканирования, режим 11



д

Рисунок 3.15 (продолжение) – Типичный вид выделений S-фазы на границах зерен в листах (0,25 мм) из сплава 1441, состаренных в соответствии с таблицей 3.9: а – режим 5; б – режимы 7, 9, 10, 11; в – режим 8; г – режимы 4, 6, 12; д – профили распределения легирующих элементов вдоль линии сканирования, режим 11

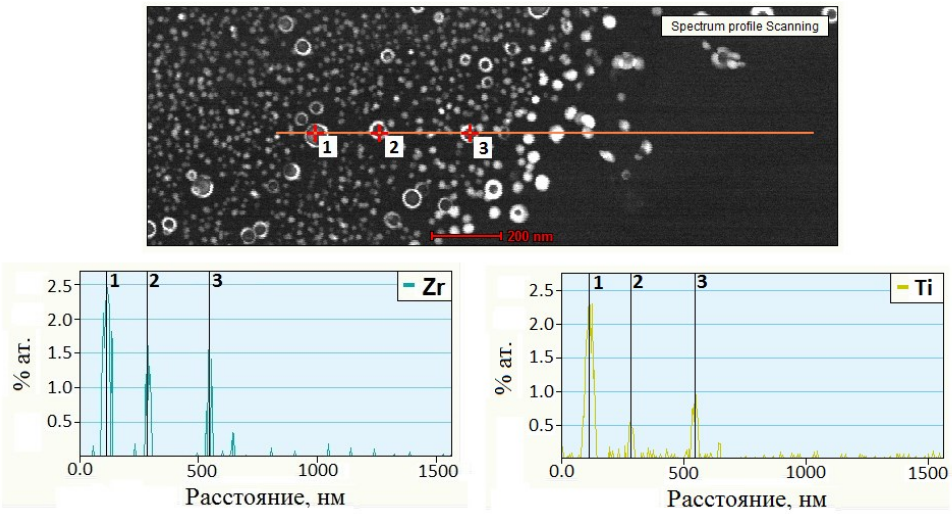
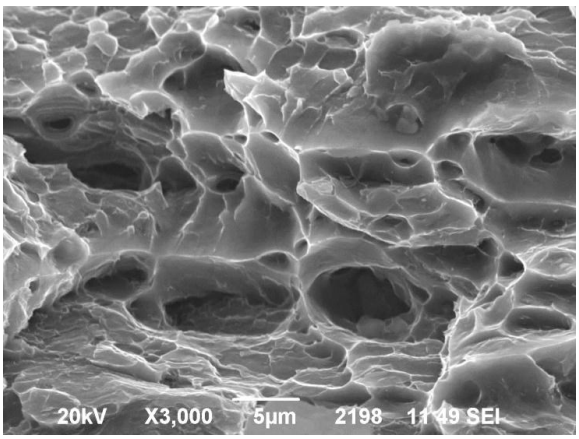


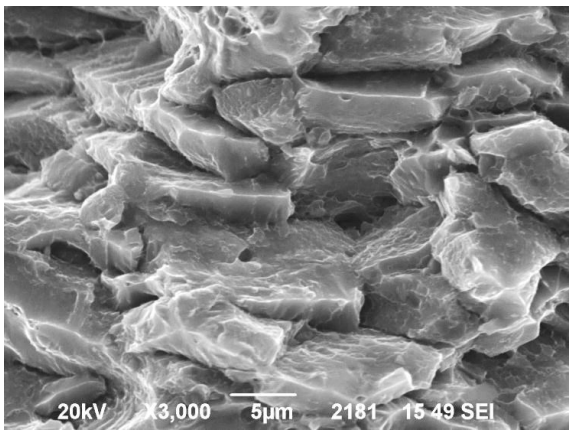
Рисунок 3.16 – Выделения β′-фазы и профили распределения Zr и Ti вдоль линии сканирования в листах толщиной 0,25 мм из сплава 1441

Фрактографический анализ состаренных по различным режимам образцов после испытаний на растяжение показал, что наиболее вязкое строение излома с полностью внутризёренным разрушением и формированием вязкого ямочного рельефа (рисунок 3.17, а) наблюдается после старения по режиму 6 (см. таблицу 3.9). При старении по другим режимам разрушение образцов происходит преимущественно по границам зерен, но в изломе образца, состаренного по режиму 11, на поверхности зёрен присутствует мелкоямочный рельеф (рисунок 3.17, б), а в образцах, состаренных по режимам 5 и 12, наблюдаются вытянутые деформированные зёрна с шероховатой поверхностью (рисунок 3.17, в). Наименее пластичное строение излома (с гладкой поверхностью зерен) наблюдается в образцах, состаренных по режимам 2 (серийный режим Т1) и 9.

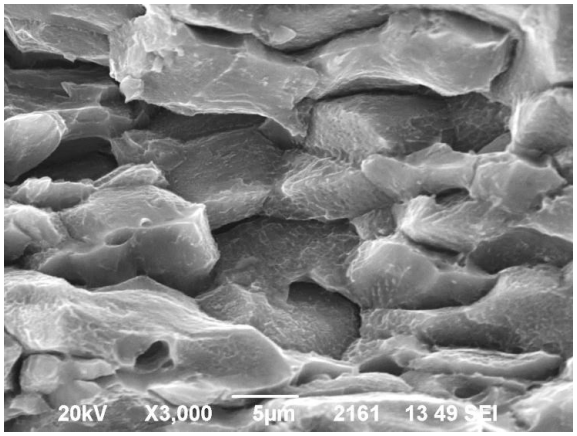
Следует отметить, что в исследованных состаренных листовых образцах из сплава 1441 уровень относительного удлинения не имеет однозначной корреляции со структурой излома. Так, наиболее вязкому излому (режим 6) соответствуют средние значения относительного удлинения (9 %), а у образцов с зернограничным и мелкоямочным строением изломов (режимы 2, 5 и 11) уровень относительного удлинения наиболее высокий (11-13 %). Только в образцах с наименее пластичным изломом (режим 9) отмечается низкий уровень относительного удлинения (7 %), что, вероятно, обусловлено более высоким значением предела текучести образцов (380 МПа), состаренных по этому режиму, по сравнению с $\sigma_{0,2}$=315-345 МПа у остальных исследованных образцов.



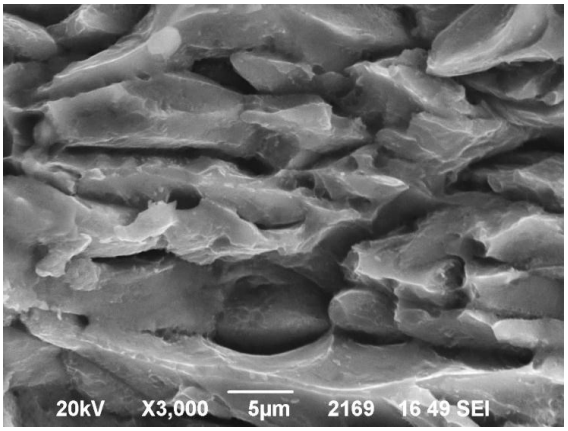
а



б



в



г

Рисунок 3.17 – Строение изломов образцов из листов толщиной 0,25 мм сплава 1441, состаренных по различным режимам, после испытаний на растяжение: а – вязкий ямочный рельеф в центральной зоне зерен (режим 6); б – мелкоямочный рельеф на поверхности зёрен (режим 11); в – шероховатая поверхность зёрен (режимы 5, 12); г – разрушение полностью по границам зёрен (режимы 2, 9)

В результате исследований структуры и свойств тонких листов из сплава 1441 установлено, что наилучшее сочетание механических и коррозионных свойств обеспечивает следующий режим термической обработки: закалка с температуры 535 °С, старение по трехступенчатому

режиму Т12 (температурный интервал Т=150-200 °С, суммарное время τ=25-30 ч, $T_I>T_{II}<T_{III}$, $\tau_I<<\tau_{II}>\tau_{III}$).

На рисунке 3.18 приведены результаты оценки склонности листа из сплава 1441Т12 к межкристаллитной и общей коррозии при экспозиции в условиях умеренно теплого климата (ГЦКИ ВИАМ) от 3 месяцев до 4 лет.

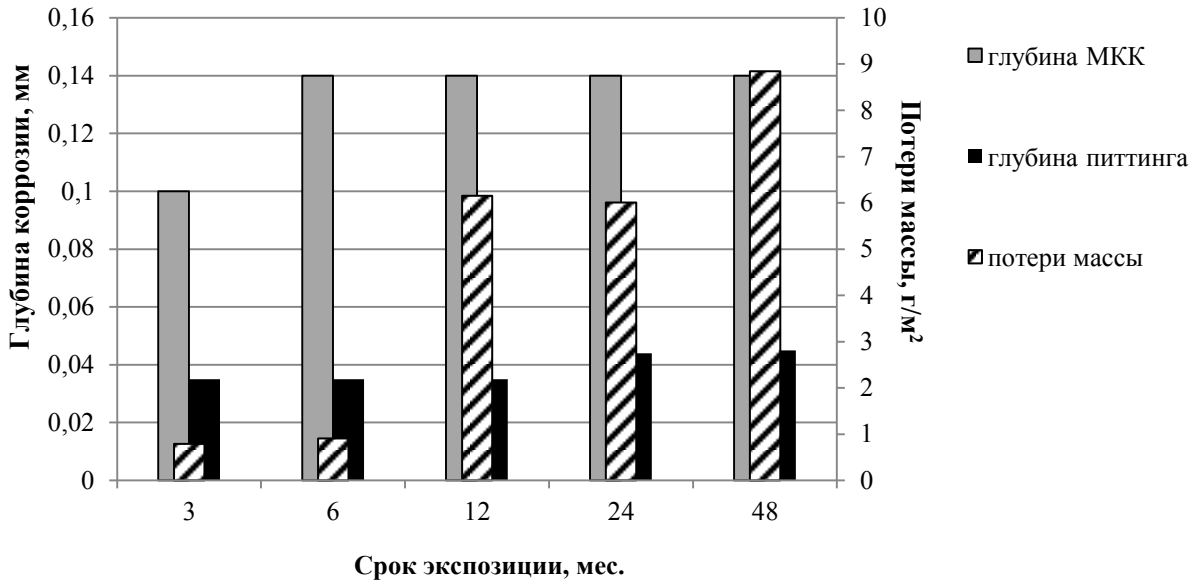


Рисунок 3.18 – Результаты коррозионных испытаний листов из сплава 1441Т12 после экспозиции в натурных условиях (ГЦКИ ВИАМ)

Из рисунка 3.18 следует, что сплав 1441 в состоянии Т12 не склонен к питтинговой коррозии в течение всего срока испытаний:

- глубина питтинга не превышает 0,043 мм;
- глубина межкристаллитной коррозии не превышает 0,15 мм.

По результатам определения механических свойств листовых образцов сплава 1441Т12 после различной продолжительности экспозиции (рисунок 3.19) установлено, что после 24 месяцев экспозиции потери механических свойств не превышают 5 %. Испытания в натурных условиях в течение 48 месяцев привели к потере временного сопротивления на 17 %, предела текучести на 3 %, относительного удлинения на 35 %.

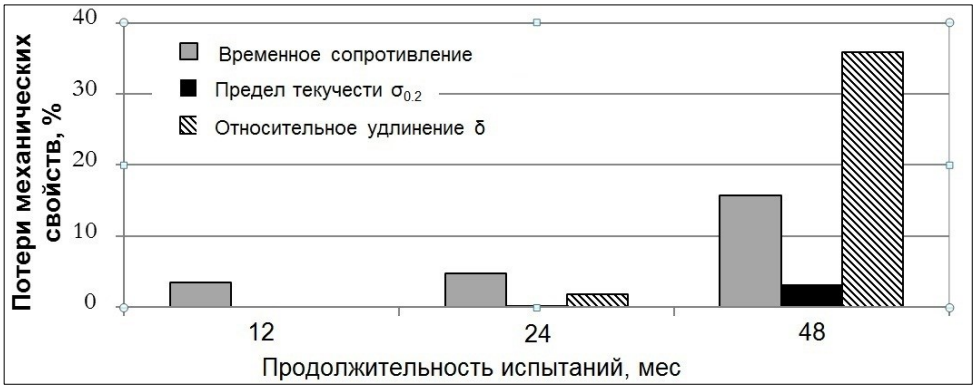
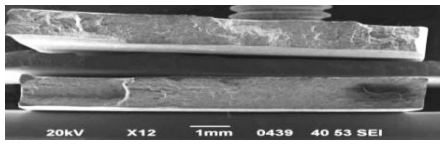
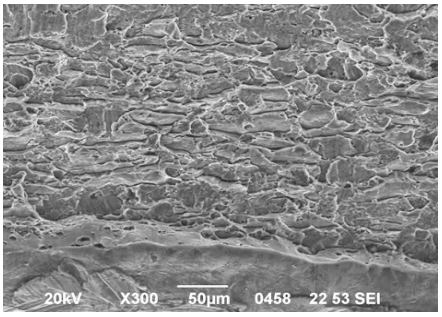


Рисунок 3.19 – Изменение механических свойств листов из сплава 1441Т12 после 1-го, 2-х и 4-х лет экспозиции в натурных условиях ГЦКИ ВИАМ

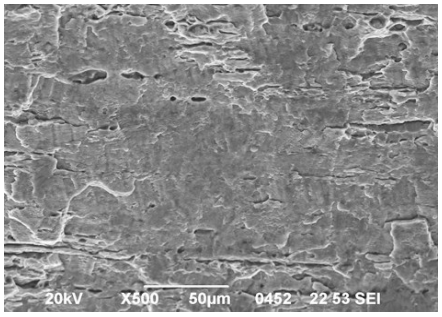
Фрактографический анализ изломов образцов после определения механических свойств до натурных испытаний показал, что в изломе присутствует плоский участок вязкого среза у поверхности образца и зоны ямочного рельефа (рисунок 3.20).



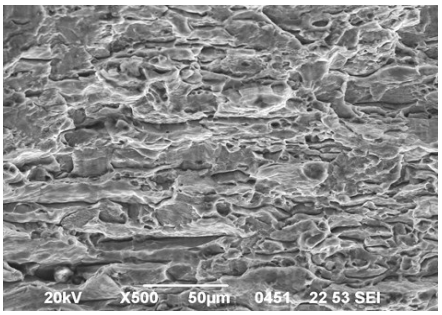
а



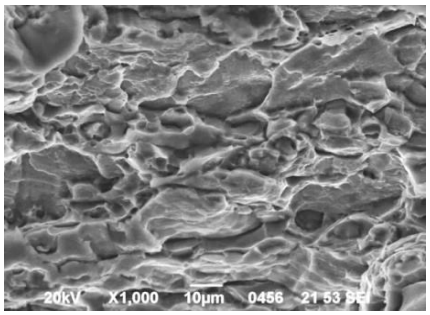
б



в



г



д

Рисунок 3.20 – Структура излома листа из сплава 1441Т12, испытанного на растяжение до коррозионных испытаний: а – общий вид; б – зона ямочного рельефа; в – вязкий срез; г, д – внутризеренное разрушение

После экспозиции в ГЦКИ ВИАМ в течение 48 месяцев разрушение образцов при растяжении развивалось по аналогичному механизму вязкого среза с наличием зон ямочного рельефа (рисунок 3.21). Однако в этом случае разрушение начиналось преимущественно от коррозионных повреждений на поверхности. Данный тип разрушения может наблюдаться при нарушении покрытий антикоррозионной защиты при эксплуатации деталей.

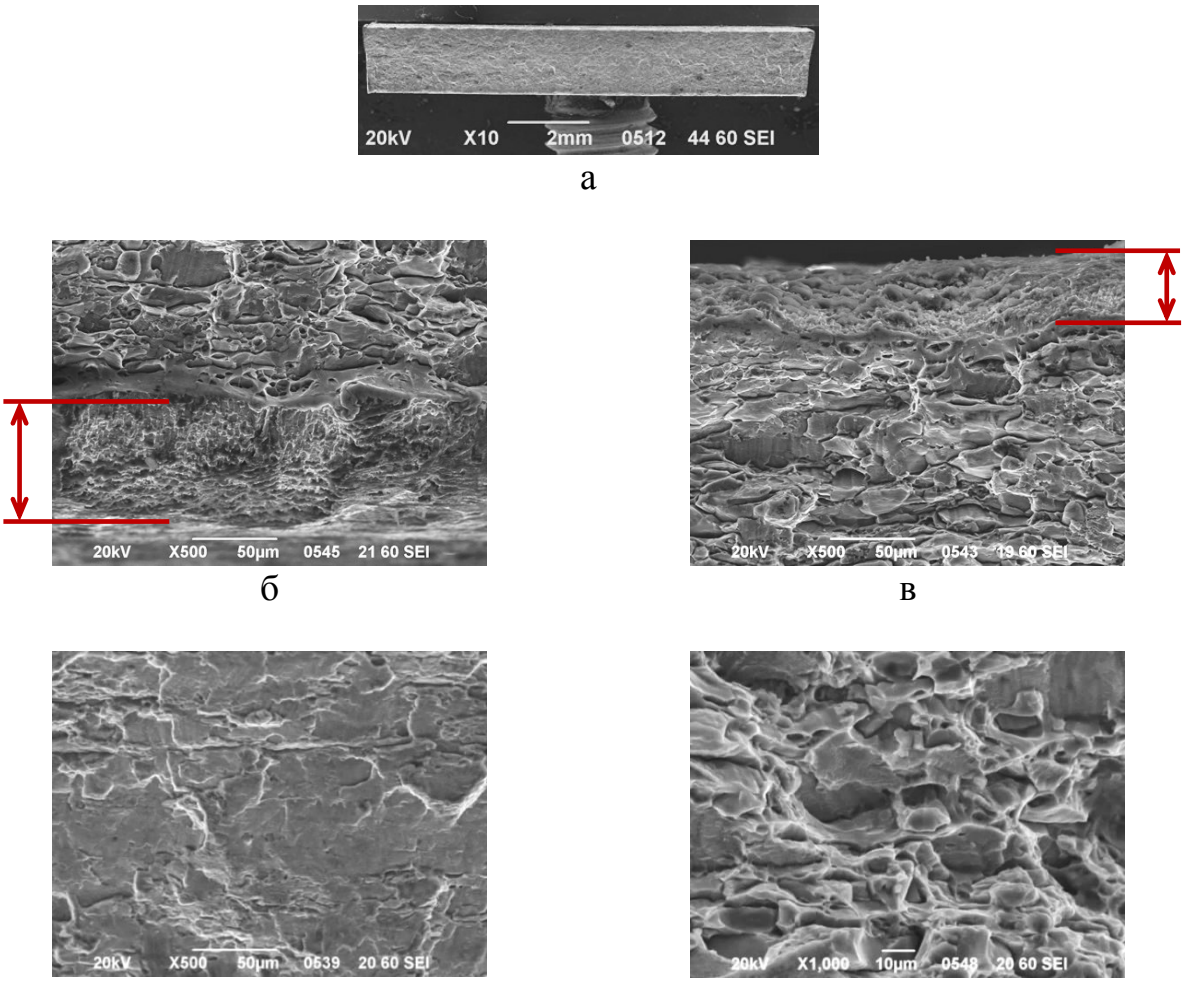


Рисунок 3.21 – Структура излома листа сплава 1441Т12, испытанного на растяжение после коррозионных испытаний: а – общий вид излома; б, в – разрушение от зон коррозионных повреждений (указаны стрелками); г – разрушение по механизму вязкого среза; д – мелкоямочный рельеф

Результаты проведенных исследований листов из сплава 1441Т12 без защитных покрытий показали удовлетворительную коррозионную стойкость.

3.3 Исследование влияния нагревов при изготовлении алюмостеклопластиков на структуру и механические свойства листов из алюминий-литиевых сплавов

При изготовлении СИАЛ способом автоклавного формования листы из сплавов 1441Т12 и В-1469Т1, входящие в состав материала, в пакете со стеклопластиком подвергают технологическим нагревам при температуре 175 °С в течение 3 ч [72, 150, 151].

Для оценки влияния технологических нагревов на структуру и свойства листов были проведены в лабораторной печи (без приложения давления) нагревы листовых образцов из сплава 1441Т12, имитирующие режимы нагрева при автоклавном формовании СИАЛ, а также нагревы в автоклаве (с приложением давления) листовых образцов-свидетелей при изготовлении СИАЛ в производственных условиях ПАО «ВАСО».

Исследования образцов показали, что проведенные технологические нагревы как в печи, так и при автоклавном формовании практически не оказывают влияние на механические характеристики листов из сплава 1441Т12 в изготовленном слоистом материале (таблица 3.11).

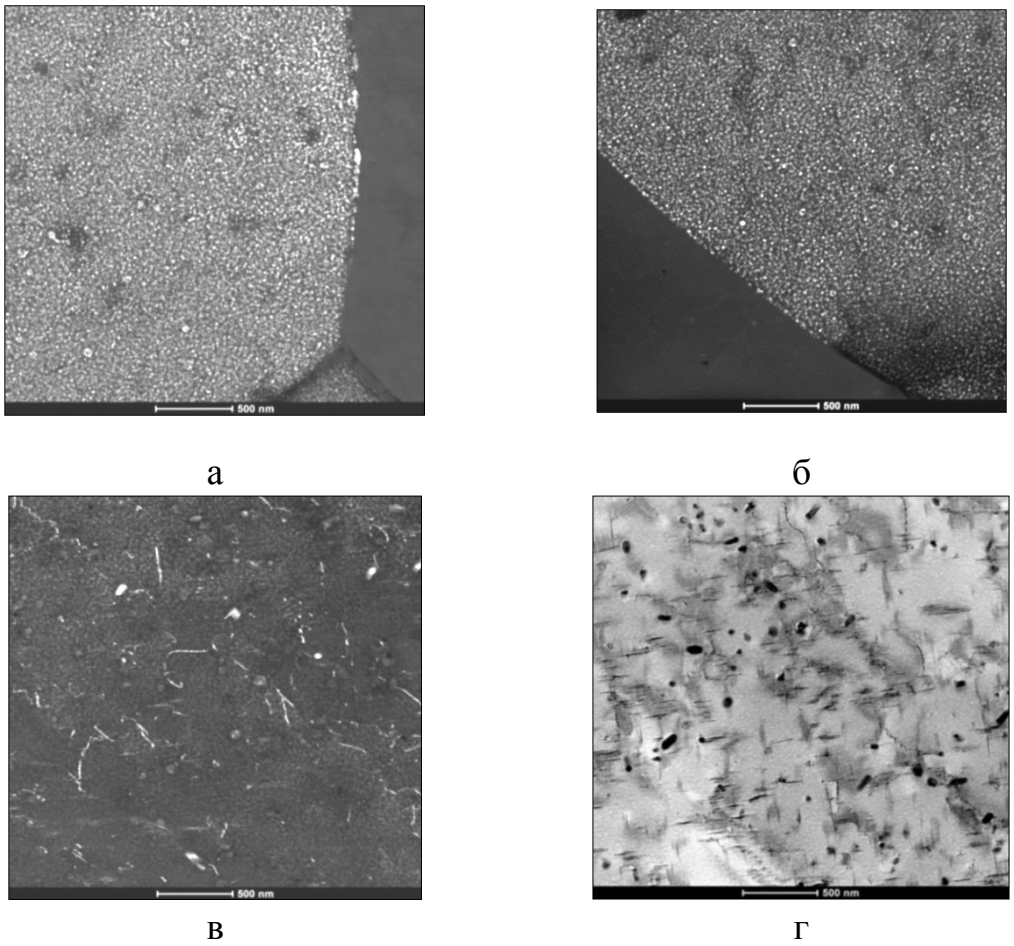
Таблица 3.11 – Влияние технологических экспериментальных нагревов на механические свойства листов из сплава 1441Т12 толщиной 0,25 мм

№	Режим нагрева	Направ-ление	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
1	Исходное состояние Т12	Д	425	340	12,2
		П	440	350	14,1
2	Т12 + нагрев 175 ± 3 °С, 3 ч в лабораторной печи	Д	420	340	14,6
		П	445	360	12,2
3	Т12 + нагрев 175 ± 3 °С, 3 ч в автоклаве	Д	420	340	13,5
		П	445	360	13,2
4	Т12 + нагрев 180 ± 3 °С, 3 ч в лабораторной печи	Д	430	345	14,2
		П	450	360	13,0

1 Примечание – Приведены средние арифметические значения результатов испытаний трех образцов на точку

Методами ПЭМ проведены исследования фазового состава и структуры листов толщиной ~ 0,25 мм сплава 1441Т12 после технологического нагрева в лабораторной печи (175 ± 3 °С, 3 ч), имитирующего нагрев при автоклавном формовании, но без автоклавного давления, а также после автоклавного формования.

Электронно-микроскопическое исследование также подтвердило отсутствие изменений тонкой структуры листов из сплава 1441 в состоянии Т12 после воздействия проведенного технологического нагрева. На рисунке 3.22 (а, б) видно, что в структуре листов присутствуют гомогенно распределенные в зерне сферические выделения основной упрочняющей δ'-фазы (Al_3Li). У границ зерен имеется зона шириной 10 нм и менее, свободная от выделений δ'-фазы.



а б

в г

Рисунок 3.22 – Электронно-микроскопические изображения выделений δ'-фазы (а, б) и S'-фазы (в, г) в листах из сплава 1441Т12 после воздействия нагрева 175 °С, 3 ч: темнопольное изображение выделений в рефлексе δ'-фазы (а, б), в рефлексе S'-фазы (в), светлопольное изображение (г)

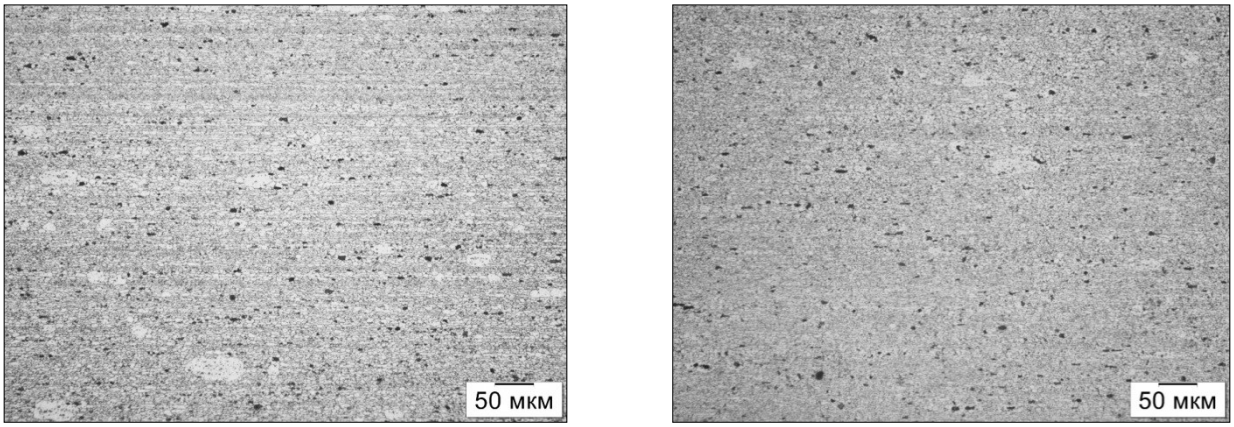
Частицы второй упрочняющей фазы S' (Al_2CuMg) показаны на рисунке 3.22 в, г. Они имеют форму вытянутых реек различной кристаллографической ориентировки и выделяются в виде конгломератов, расположенных как гомогенно в объеме зерна, так и гетерогенно на дислокациях.

При повышении температуры нагрева до 180 °С (режим нагрева 180 °С, 3 ч) наблюдается повышение прочностных характеристик и некоторое снижение пластичности листов из сплава 1441Т12, вероятно, за счет увеличения количества частиц S'-фазы. Поэтому температуру автоклавного формования ограничили 175 °С.

Таким образом, подтверждено, что применение в составе СИАЛ листов из сплава 1441 в состоянии Т12 (двухступенчатое старение) позволяет совмещать технологические процессы формования делали, полимеризации препрегов и их склеивания с листами без изменения механических характеристик последних и, следовательно, без ухудшения прочностных свойств алюмостеклопластиков в целом.

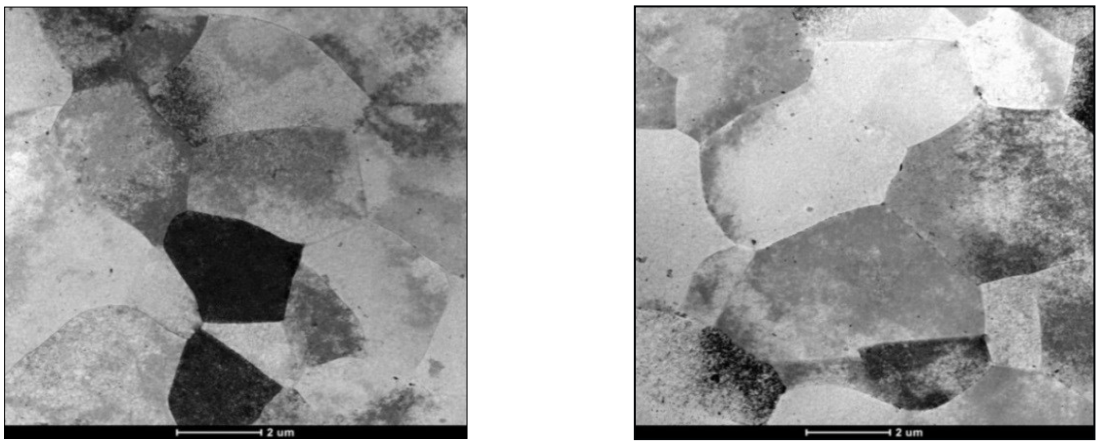
Проведено также аналогичное исследование влияния технологических нагревов на структуру и механические свойства листов из сплава В-1469Т1, содержащего 3,8 % Cu; 1,3 % Li; 0,4 % Ag; 0,5 % Mg; 0,11 % Zr; 0,08 % Sc; Al-основа, изготовленных на ОАО «КУМЗ».

Листы из сплава В-1469, упрочненные термической обработкой, имеют преимущественно нерекристаллизованную мелкозернистую (средний диаметр зерна $d_{ср}$ ~ 6-10 мкм) структуру (рисунки 3.23, 3.24). На рисунке 3.23 наблюдаются также единичные зерна диаметром до 50-60 мкм и частицы избыточных интерметаллидов (~ 1,5 %).



а б

Рисунок 3.23 – Микроструктура листа из сплава В-1469Т1:
а – продольное направление, б – поперечное направление



а б

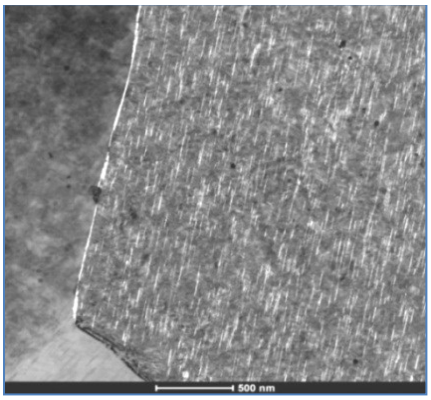
Рисунок 3.24 – Электронномикроскопические изображения субзеренной структуры сплава В-1469Т1: а – продольное направление,
б – поперечное направление

В структуре сплава В-1469 в состоянии Т1 присутствуют выделения фаз Ω', θ' и S' (рисунок 3.25).

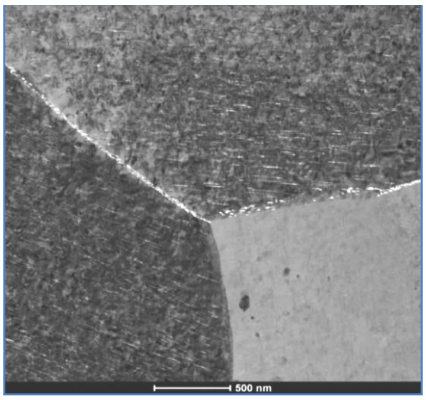
Основная упрочняющая фаза Ω' выделяется в виде отдельных тонких пластин толщиной 1-5 нм, содержащих атомы меди, серебра и лития. Состав фазы и плотность распределения в сплаве не изменяются при дополнительных технологических нагревах и при автоклавном формовании (рисунок 3.25 а, б). Когерентная S'-фаза (Al_2CuMg) выделяется в сплаве В-1469 в состоянии Т1 гомогенно в

виде стержней. В процессе нагрева при автоклавном формовании образуются конгломераты из реек различной кристаллографической ориентировки, а также участки с их гетерогенным выделением (рисунок 3.25 в, г).

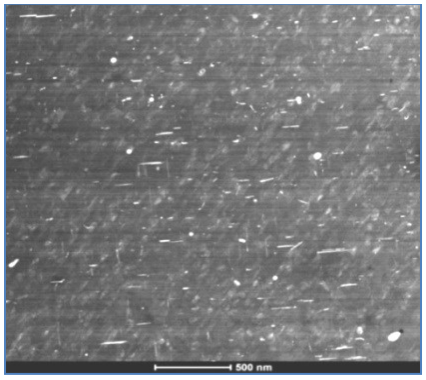
При технологическом нагреве по режиму 175 ± 3 °С, 3 ч как в автоклаве, так и в лабораторной печи, за счет достаривания плотность выделения θ'-фазы снижается по сравнению с исходным состоянием Т1, что практически не оказывает влияние на механические свойства (рисунок 3.25 д, е).



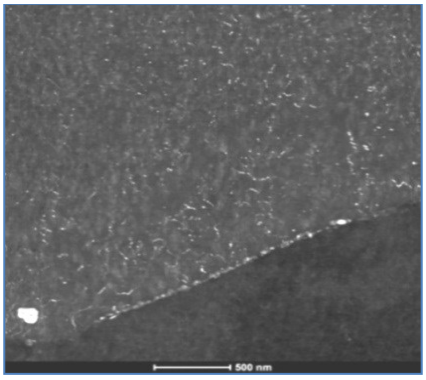
а



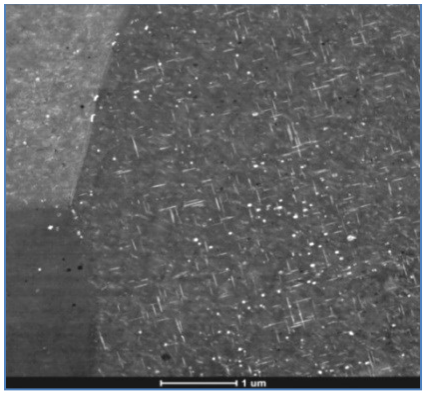
б



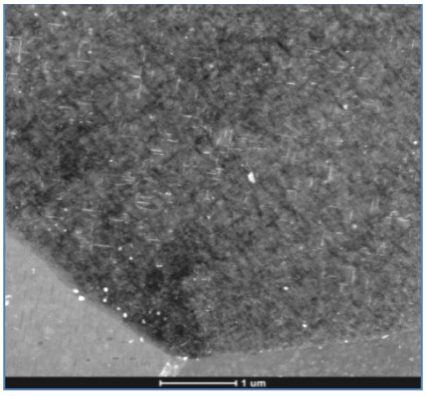
в



г



д



е

Рисунок 3.25 – Электронно-микроскопические темнопольные изображения выделений в объеме зерен и на субграницах в сплаве В-1469Т1: Ω'-фаза (а, б), S'-фаза (в, г) и θ'-фаза (д, е)

Механические свойства листов из сплава В-1469Т1 практически не изменяются при воздействии нагрева 175 ± 3 °С, 3 ч при автоклавном формовании (таблица 3.13), что связано с отсутствием в их структуре фаз T_2 (Al_6LiCu) и T'_1 (Al_2LiCu), характерных для режимов старения при более высоких температурах (> 175 °С) и длительных выдержках (> 64 ч), как следует из ДФПС сплава В-1469 [68, 72].

Таблица 3.12 – Влияние технологических экспериментальных нагревов на механические свойства листов толщиной 0,5 мм из сплава В-1469Т1

№	Режим нагрева	Направ-ление	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %
1	Исходное состояние Т1	Д	575	545	9,8
		П	545	520	13,5
2	Т1 + 170 ± 3 °С, 3 ч в лабораторной печи	Д	580	550	9,9
		П	550	520	13,2
3	Т1 + 175 ± 3 °С, 3 ч в автоклаве	Д	580	550	10,5
		П	550	520	10,8
4	Т1 +180 ± 3 °С, 3 ч в лабораторной печи	Д	580	550	12,0
		П	550	525	13,7

1 Примечание – Приведены средние арифметические значения результатов испытаний трех образцов на точку

Выводы по главе 3

1. Построены политермические диаграммы фазовых превращений в слитках из сплава 1441 при кристаллизации (с использованием компьютерного моделирования для равновесных условий), установлен температурный интервал (450-500 °С) максимальной равновесной растворимости основных легирующих элементов в твердом растворе (2,0 % Li; 1,9 % Cu; 1,1 % Mg) сплава 1441.

2. Расчетным и экспериментальным методами установлено, что температура солидуса сплава 1441 составляет 555-573 °С.

3. Экспериментально установлен фазовый состав гомогенизированных слитков: алюминиевый α-твердый раствор, незначительное количество первичных эвтектических фаз и вторичные выделения фаз β' (Al_3Zr), δ' (Al_3Li) и S' (Al_2CuMg), размеры которых после различных режимов гомогенизации составляют от 5 до 50 нм.

4. Разработан двухступенчатый режим гомогенизации слитков из сплава 1441 (400-450 °С, 4-8 ч + 500-550 °С, 14-20 ч), обеспечивающий по сравнению с одноступенчатым режимом ускорение процессов растворения избыточных эвтектических фаз на границах дендритов и формирование структурно-фазового состояния слитка с плотностью распределения сферических композиционных частиц дисперсоидов (β′-фаза с оболочкой из δ′-фазы) не более $6{,}0\times10^{10}$ 1/мм^3 при содержании первичных эвтектических фаз в слитке менее 1 %, что позволило повысить технологическую пластичность (δ > 120 %) в интервале температур горячей прокатки слитков 430-470 °С, а также при холодной прокатке листов.

5. Установлено, что промежуточный отжиг горячекатаных и/или холоднокатаных листов в интервале температур 420-440 °С с медленным охлаждением до комнатной температуры обеспечивает повышение технологической пластичности, снижение сопротивления и повышение однородности деформации Al-твердого раствора при холодной прокатке листов до толщины 0,25 мм за счет выделения частиц S-фазы (Al_2CuMg), преимущественно глобулярной формы, со средним размером 0,5 мкм, приводящего к обеднению твердого раствора сплава 1441 магнием от 0,8 % до 0,22 % и медью от 1,5 % до 0,01 % (по массе).

6. Разработанные режимы гомогенизации и деформации плоских слитков из сплава 1441 обеспечили впервые в мире получение методом холодной рулонной прокатки листов толщиной 0,25 мм из алюминий-литиевого сплава 1441 (по ТР 1.2.2667-2018) для применения в качестве металлической составляющей слоистого алюмостеклопластика СИАЛ. Разработана нормативная документация на изготовление и поставку листов из сплава 1441: ТР 1.2.2016-2008, ТУ 1-804-407-2004 с изменением № 6, ТУ 1-804-516-2012.

7. Установлено отличие состава дисперсоида (β′-фаза), присутствующего в гомогенизированных слитках и листах из сплава 1441: в слитках в состав β′-фазы входят Al и Zr, в листах – Al, Zr и Ti, причем, атомное соотношение Zr:Ti может составлять от 1:1 до 3:1.

8. Установлено, что основными упрочняющими фазами в искусственно состаренных по двух- и трехступенчатым режимам тонких листах из сплава 1441 являются фазы δ' (Al_3Li) и S' (Al_2CuMg). Фаза T_1 (Al_2CuLi), появляющаяся в объеме зерна в незначительном количестве при определенных режимах, практически не влияет на механические и коррозионные свойства листов.

9. Получено, что изменение температуры и продолжительности старения в исследованных пределах не оказывает существенного влияния (около 10 %) на уровень временного сопротивления и предела текучести, но заметно влияет на относительное удлинение и склонность к РСК тонких листов из сплава 1441 (в 1,5-2,0 раза).

10. Показано, что более высокий уровень относительного удлинения ($\delta > 11$-13 %) отмечается у листов, в структуре которых зона, свободная от выделений у границ зерен, практически отсутствует или ширина ЗСВ не превышает 120 нм. Однако заметное влияние ширины ЗСВ на прочностные свойства и склонность к РСК листов из сплава 1441, состаренных по различным режимам, не обнаружено.

11. Установлена взаимосвязь между характером распределения упрочняющих частиц S- и S'-фаз в структуре состаренных листов из сплава 1441 и их коррозионными свойствами. Показано, что повышенная коррозионная стойкость связана с формированием в процессе разработанного трехступенчатого режима старения S′-фазы, закрепляющей дислокации в объеме зерна, снимая локальную концентрацию напряжений с границ, и выделением дискретных глобулярных частиц S-фазы со средним размером 100-300 нм на границах зерен, что способствует уменьшению электрохимической гетерогенности, снижению концентрации напряжений на границах зерен и, следовательно, повышению стойкости к расслаивающей коррозии.

12. Для листов из сплава 1441 разработан трехступенчатый режим старения Т12: температурный интервал $T = 150\text{-}200$ °С, суммарное время $\tau = 25\text{-}30$ 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: $\sigma_B = 415\text{-}435$ МПа, $\sigma_{0,2} = 320\text{-}325$ МПа, $\delta = 8{,}5\text{-}14{,}5$ % (в продольном направлении), РСК 2-3 балла, для использования в составе алюмостеклопластиков СИАЛ.

13. Разработанный режим Т12 рекомендован к опробованию в производственных условиях для изготовления листов с последующим формованием в автоклаве при изготовлении алюмостеклопластиков.

14. После 48 месяцев испытаний листов из сплава 1441Т12 в натурных условиях ГЦКИ ВИАМ глубина питтинговой коррозии не превышает 0,043 мм; межкристаллитная коррозия не превышает 0,15 мм, потери временного сопротивления составляют 17 %, предела текучести – 3 %, относительного удлинения – 35 %.

15. Показано, что разработанный режим технологического нагрева при автоклавном формовании деталей из СИАЛ не приводит к изменению свойств и микроструктуры листов из сплавов 1441Т12 и В-1469Т1.

Глава 4 Разработка слоистых структур алюмостеклопластиков на базе алюминий-литиевых сплавов и клеевых препрегов, армированных стекловолокном

Разработку слоистых структур алюмостеклопластиков на базе алюминий-литиевых сплавов и клеевых препрегов, армированных стекловолокном, проводили с применением компьютерного моделирования, что позволило многократно сократить время и затраты на разработку материалов по сравнению с методами, основанными на анализе экспериментальных данных после проведения натурных испытаний. Прогнозирование свойств слоистых алюмостеклопластиков в режиме вычислительного эксперимента дает возможность, изменяя исходные данные, за относительно короткое время получить и сохранить в системе компьютерного моделирования большое число вариантов модели объекта.

4.1 Разработка математической модели для прогнозирования механических характеристик слоистых алюмостеклопластиков

При разработке математической модели для прогнозирования механических характеристик слоистых алюмостеклопластиков варьируемыми параметрами в структуре слоистого материала являлись слои из алюминий-литиевых сплавов (толщина и количество листов, марка сплава) и слои стеклопластика на основе клеевых препрегов (вид и объемное содержание армирующего наполнителя, количество слоев препрега, расположение в структуре, ориентация).

С помощью аналитической математической модели для прогнозирования свойств слоистых алюмостеклопластиков, разработанной в совместной работе с НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Лурье С.А., Кошуриной А.А., Соляевым Ю.О.), были проведены математические расчеты механических

характеристик (σ_B, $\sigma_{0,2}$, E) для десяти композиций слоистых металлополимерных композиционных материалов.

В математической модели учитывали наличие упругопластических деформаций слоев - листов из алюминий-литиевых сплавов и влияние остаточных напряжений. Моделирование испытаний на одноосное растяжение проводили итерационным методом, при котором в материале последовательно послойно увеличиваются макроскопические деформации и вычисляются напряжения, реализующиеся в слоях композиционного материала. Проводили послойный анализ прочности и учитывали процессы прогрессирующего разрушения - слои, в которых напряжения начинали превышать временное сопротивление, исключали из расчета обнулением их соответствующих характеристик жесткости [152-155].

Для проведения расчетов в качестве исходных данных использовали физико-механические свойства материалов слоев (листов из Al-Li сплавов и стеклопластиков), входящих в состав слоистых металлополимерных композиционных материалов, а также учитывали их расположение, послойную ориентацию и толщину.

Для проведения аналитических расчетов был использован модифицированный вариант классической модели слоистого композиционного материала с учетом упругопластических свойств алюминиевых (алюминий-литиевых) сплавов по билинейному закону. В этом случае диаграмму напряжения-деформации для одноосного растяжения образца аппроксимировали двумя прямыми (рисунок 4.1). На первом участке моделировали стадию упругого деформирования материала, а на втором – этап пластического течения и упрочнения. Точка излома на диаграмме соответствует пределу текучести материала.

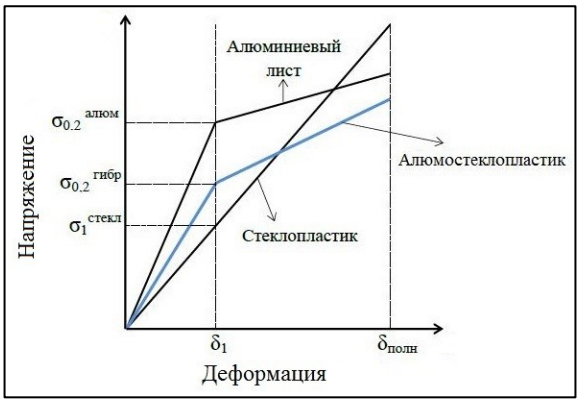


Рисунок 4.1 – Схема определения упругопластических свойств слоистого композиционного материала при использовании билинейного закона для алюминиевых слоев [153]

Принятые допущения: рассматривая случай одноосного растяжения, предполагали, что все слои композиционного материала деформируются одновременно, при этом расслоений и иных дефектов не возникает вплоть до начала разрушения [153].

Проводимый расчет можно разделить на три этапа:

1 - упругое деформирование слоев,

2 - начало текучести в алюминиевых слоях,

3 - последовательное разрушение слоев, начиная с самого слабого, и исключение их из работы.

Расчет останавливали в момент разрушения слоя стеклопластика с продольным армированием относительно прикладываемой нагрузки.

На этапе упругого деформирования композиционного материала (интервал деформаций от 0 до δ_1 на рисунке 4.1) все его слои также деформировались упруго. На этом этапе расчета для определения эффективных упругих свойств материала на основании известных свойств, толщин и ориентации его слоев применили классическую модель слоистых композиционных материалов [156, 157]. Предел текучести слоистого материала определялся пределом текучести алюминий-литиевых слоев, который равен отношению найденного уровня внешней нагрузки к толщине пакета рассматриваемой структуры.

Для предварительной оценки плотность композиционных материалов рассчитана по правилу смесей через относительные толщины и плотности слоев.

Порядок расчета предела текучести слоистого материала схематично изображен на рисунке 4.2. Так как в слоях материала предполагается одновременное протекание деформаций, то для упрощения расчетов можно принять, что деформация текучести композиционного материала совпадает с деформацией наступления текучести в алюминиевых (алюминий-литиевых) слоях (δ_1 на рисунке 4.1). Такое предположение подтверждается расчетом, в котором используется условие наступления текучести по критерию Мизеса с погрешностью менее 5%.

На втором этапе расчета моделировали процесс пластического деформирования алюминий-литиевых слоев, который в рамках предлагаемой аналитической модели описывали билинейным законом. Предполагали, что на этапе текучести и упрочнения соотношения между напряжениями и полными деформациями можно описать с использованием линейных соотношений.

В модели слоистых композиционных материалов приняли, что материалы являлись ортотропными, и при испытаниях на растяжение они находились в состоянии плоского напряженного состояния. Направления осей ортотропии в плоскости каждого слоя совпадали с направлениями 1 и 2 осей локальной системы координат в этом слое. Для стеклопластика направления 1 и 2 совпадают с направлениями вдоль и поперек ориентации волокон (рисунок 4.2).

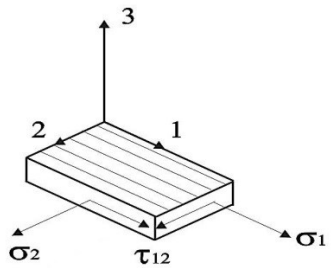


Рисунок 4.2 – Схема для расчета однонаправленного слоя композиционного материала в локальной системе координат

В слоях из листов алюминий-литиевых сплавов направления локальной системы координат 1 и 2 совпадают с направлением проката листов и поперек направления проката. В рассматриваемом случае связь между напряжениями и деформациями в каждом k-ом слое композиционного материала в локальной системе координат, относящейся к этому слою, представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{12}\frac{\sigma_2}{E_2} + \alpha_1 t; \\ \varepsilon_2 &= \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{21}\frac{\sigma_1}{E_1} + \alpha_2 t \end{aligned} \qquad (1)$$

где E_1 и E_2 модули упругости в направлениях Д, П (вдоль и поперек волокон, т.е. локальная система координат монослоя своя в каждом монослое) и свой модуль сдвига в плоскости между слоями в клеевой прослойке; μ_{21}, μ_{12} – коэффициенты Пуассона в плоскости слоев, характеризующие изменение размера образца по направлениям 1 или 2 при растяжении его в перпендикулярном направлении; α_1, α_2 – температурные коэффициенты линейного расширения; t – приращение температуры относительно исходного значения, при котором в материале отсутствуют остаточные напряжения.

Для получения величин относительных напряжений (σ_1, σ_2) по направлениям 1 и 2 использовали расчетные соотношения (2):

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E_1(\varepsilon_1 + \mu_{12}\varepsilon_2) - E_1(\alpha_1 + \mu_{12}\alpha_2)t; \\ \sigma_2 &= \overline{E}_2(\varepsilon_2 + \mu_{21}\varepsilon_1) - \overline{E}_2(\alpha_2 + \mu_{21}\alpha_1)t, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $\overline{E}_{1,2} = \dfrac{E_{1,2}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}$,

E – модули упругости, $\overline{E}$ – приведенные модули упругости для случая плоского напряженного состояния при растяжении.

Для многослойных произвольных структур композиционного материала физические соотношения макромеханики были представлены в виде [158]:

$$\sigma_x = B_{11}\varepsilon_x + B_{12}\varepsilon_y + B_{13}\gamma_{xy} - B_{t1}t;$$
$$\sigma_y = \overline{B}_{21}\varepsilon_x + \overline{B}_{22}\varepsilon_y + \overline{B}_{23}\gamma_{xy} - \overline{B}_{t2}t; \qquad (3)$$
$$\tau_{xy} = \overline{B}_{31}\varepsilon_x + \overline{B}_{32}\varepsilon_y + \overline{B}_{33}\gamma_{xy} - \overline{B}_{t3}t,$$

где $\overline{B}_{pq} = \sum_1^k \overline{h}_i b_{pq}^i$; $\overline{B}_{tp} = \sum_1^k \overline{h}_i b_{tp}^i$; $B_{pq} = \sum_1^k h_i b_{tp}^i$; $\overline{h}_i = \frac{h_i}{h} = \frac{h_i}{\sum_1^k h_i}$; $p = q = 1, 2, 3$;

B – коэффициенты жесткости слоистого композиционного материала, которые входят в обобщенный закон Гука, разрешенный относительно напряжений, b – коэффициенты, определяющие связь напряжений и деформаций в глобальной системе координат с напряжениями и деформациями в каждом из монослоев, h – толщины монослоев.

Изготовление слоистых конструкций происходит в условиях технологического процесса нагрева при «склеивании» разнородных материалов и полимеризации связующего в препрегах стеклопластика, что неизбежно приводит к расширению материалов. Ввиду различных коэффициентов расширения металлических и полимерных материалов после остывания слои находятся в напряженном состоянии.

Результаты расчетов по обобщенному закону Гука с помощью формул остаточных напряжений (4) и (5) в слоях металла и стеклопластика в алюмостеклопластиках, возникающих в процессе изготовления при охлаждении заготовок с температуры формования до комнатной температуры представлены в таблице 4.1. Приближенную оценку этих напряжений можно также получить по известным формулам [148], не учитывающим эффекты Пуассона и анизотропию слоев стеклопластика:

$$\sigma_{Me} = \frac{E_{\text{Me}}(\alpha_{\text{Ст}} - \alpha_{\text{Me}})(\text{T}_0 - \text{T})}{1 + (E_{\text{Me}}/E_{\text{Ст}})V_{\text{Me}}/V_{\text{Ст}}} \qquad (4)$$

$$\sigma_{\text{Ст}} = \frac{E_{\text{Ст}}(\alpha_{\text{Ст}} - \alpha_{\text{Me}})(\text{T}_0 - \text{T})}{1 + (E_{\text{Ст}}/E_{\text{Me}})V_{\text{Ст}}/V_{\text{Me}}}, \qquad (5)$$

где T_0 – комнатная температура, T – температура формования, α, V, E – коэффициент линейного расширения, объемная доля и модуль упругости для металлических слоев (индекс Me) и стеклопластика (индекс Ст).

Таблица 4.1 – Расчетные значения остаточных напряжений в слоистых металлополимерных материалах с учетом марок, толщин материалов и направлений выкладки слоев стеклопластиков

Структура	№ слоя	Материал слоя	Послойные значения остаточных напряжений, МПа	
			параллельно НП[1]	перпендикулярно НП
Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) с ровингом + Лист В-1469 толщиной 1,5 м (9-ти слойная структура)	1	Лист В-1469	37	6
	2	Стеклопластик на ткани Т-64 (ВМП)[2]	-83	-58
	3	Лист 1441	49	18
	4	Стеклопластик на ровинге[3]	-183	3
	5	Лист 1441	49	18
	6	Стеклопластик на ровинге	-183	3
	7	Лист 1441	49	18
	8	Стеклопластик на ткани Т-64 (ВМП)	-83	-58
	9	Лист В-1469	37	6
Лист В-1469 толщиной 1,8 мм + СИАЛ-1441 (4/3) + Лист В-1469 толщиной 1,8 мм (11-ти слойная структура)	1	Лист В-1469	33	4
	2	Стеклопластик на ткани Т-64 (ВМП)	-85	-59
	3	Лист 1441	45	16
	4	Стеклопластик на ткани Т-60 (ВМП)[4]	-119	3
	5	Лист 1441	45	16
	6	Стеклопластик на ткани Т-60 (ВМП)	-119	3
	7	Лист 1441	45	16
	8	Стеклопластик на ткани Т-60 (ВМП)	-119	3
	9	Лист 1441	45	16
	10	Стеклопластик на ткани Т-64 (ВМП)	-85	-59
	11	Лист В-1469	33	4

4 Примечания:

1 Направление проката внешних листов в структуре слоистого материала

2 Стеклопластик на равнопрочной ткани Т-64 (ВМП)

3 Стеклопластик на однонаправленном ровинге

4 Стеклопластик на однонаправленной ткани Т-60 (ВМП)

Найденные остаточные напряжения «накладываются» на напряжения, вызываемые внешней нагрузкой. Поэтому при испытаниях на растяжение положительные остаточные напряжения будут приводить к снижению прочностных свойств материалов, а отрицательные – к их повышению. Фактически найденные значения напряжений суммируются с напряжениями, вызываемыми внешней нагрузкой. Эти факторы необходимо учитывать для уточнения расчетных характеристик материалов. Однако следует иметь в виду, что вследствие технологических приемов, уровень остаточных напряжений может быть снижен, за счет их релаксации в пластичных слоях алюминия.

Результаты расчетов механических характеристик при растяжении образцов из слоистых алюмостеклопластиков с помощью математической модели [159], учитывающей влияние остаточных напряжений, а также плотность материалов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчетные механические характеристики при растяжении образцов из слоистых алюмостеклопластиков

Характе-ристики	Направление	Структура пакета									
		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) с одним слоем препрега + 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 0,25мм + Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ- 1441 (3/2)+ Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + Лист 1441 толщиной 0,25мм	Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) с ровингом + Лист В-1469 толщиной 1,5 мм
σ_B, МПа	Д	952	903	658	680	669	602	691	569	631	708
	П	239	351	412	417	419	278	422	287	392	431
$\sigma_{0,2}$, МПа	Д	308	420	371	419	397	351	421	358	412	431
	П	217	332	342	372	370	249	372	281	352	389
δ, %	Д	3,2	3,7	3,5	3,8	3,3	3,6	3,9	4,0	3,8	4,0
	П	2,4	2,5	3,9	3,9	4,0	4,1	2,4	2,3	2,7	2,7
E, ГПа	Д	60	65	69	64	64	60	66	63	64	68
	П	48	55	61	57	63	53	63	62	60	64
d, кг/м^3	-	2350	2420	2480	2500	2450	2390	2430	2370	2430	2450

Сравнительные экспериментальные значения свойств алюмостеклопластиков, полученные в ходе дальнейших испытаний, приведены в параграфе 4.6 в таблице 4.18. Соответствие результатов расчетов и экспериментальных данных находится в пределах 85-90 %.

4.2 Подготовка поверхности листов из алюминий-литиевых сплавов для повышения адгезионных свойств клеевых соединений при изготовлении алюмостеклопластиков

Для обеспечения ресурса и эксплуатационной надежности конструкций из слоистых МПКМ, необходима подготовка поверхности листов для их антикоррозионной защиты и создания поверхности с повышенными адгезионными характеристиками в клеевых соединениях металлических листов со слоями стеклопластика. Серийно используемый способ обработки материалов из алюминиевых сплавов для антикоррозионной защиты - анодное оксидирование в электролитах разных составов [160]. В результате получаемая поверхность из гидратированного оксида алюминия после анодно-оксидного покрытия имеет разные характеристики анодного слоя: толщину, шероховатость, пористость, состояние поверхности - с образованием анодно-оксидного покрытия или с образованием ячеистой структуры на обработанных поверхностях.

Повышенные требования по антикоррозионной защите и состоянию поверхности анодного слоя для листов из алюминий-литиевых сплавов обусловили проведение дополнительных работ по доработке состава электролита и отработке режимов нанесения анодно-оксидного покрытия на поверхность листов из сплавов 1441 и В-1469 для повышения адгезионных характеристик клеевых соединений в структурах алюмостеклопластиков [161].

Широко применяемыми в настоящее время в промышленности способами подготовки поверхности деталей из алюминиевых сплавов являются фосфорно-кислотное, хромово-кислотное и сернокислотное оксидирования [162, 163].

Обработка поверхности листов из алюминий-литиевых сплавов разными традиционными составами может приводить к разнотолщинности защитной оксидной пленки, низкой пластичности, пористости, что влияет на возможность проникновения влаги по анодной пленке, и как результат, снижает адгезионные характеристики соединений [164].

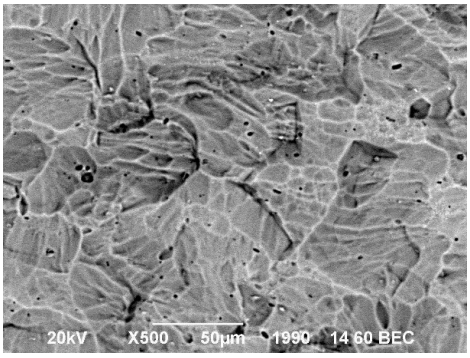
В случае использования рассмотренных способов анодного окисления для листов 1441 и В-1469 обнаружен ряд положительных и отрицательных факторов в части антикоррозионной защиты и адгезионных характеристик.

Для оценки эффективности способов обработки листов из алюминий-литиевых сплавов выбрана основным показателем характеристика прочности при сдвиге в клеевых соединениях анодированных поверхностей со связующим ВСК-14-2м. Результаты испытаний представлены в таблице 4.3.

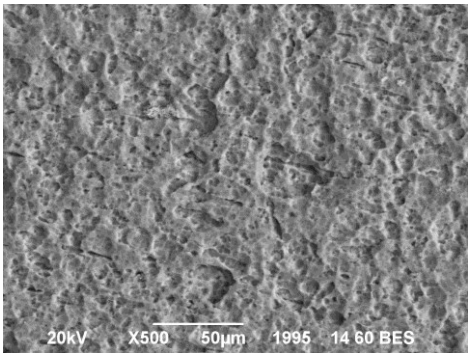
Таблица 4.3 – Прочность клеевых соединений листов из сплава 1441 со связующим ВСК-14-2м при различных вариантах подготовки поверхности

Оксидирование поверхности листов	Толщина анодного покрытия, мкм	Прочность клеевого соединения	
		Разрушение клеевого соединения (К – когезионное, А – адгезионное)	Результаты испытаний клеевого слоя на сдвиг, МПа
Хромово-кислотное (CrO_3 (традиционный)	2,1	70 % К 30 % А	31,6-33,6 32,4
Сернокислотное (H_2SO_4)	5,2	10 % К 90 % А	17,3-23,5 21,2
Фосфорно-кислотное (H_3PO_4)	0,4	70 % К 30 % А	31,2-33,6 32,0

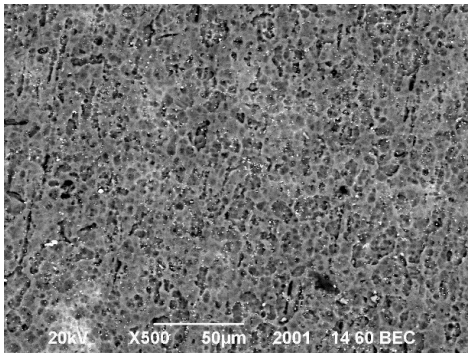
Исследования влияния морфологии и структуры поверхности листов из алюминий-литиевых сплавов на адгезионные характеристики после различных видов электрохимической обработки проведены методами растровой электронной микроскопии (рисунок 4.3) и конфокальной лазерной сканирующей микроскопия (рисунок 4.4).



Сернокислотное анодирование

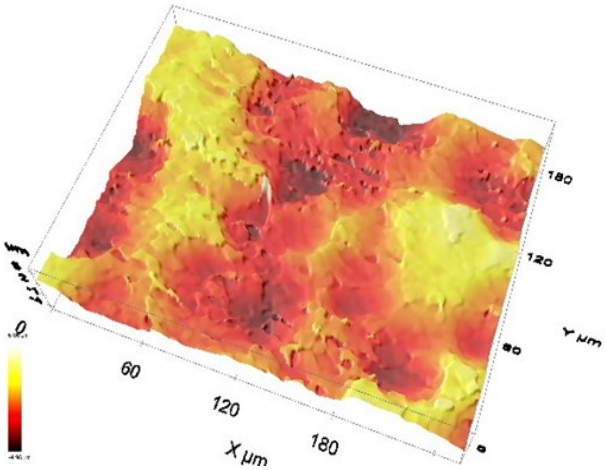


Фосфорнокислотное анодирование

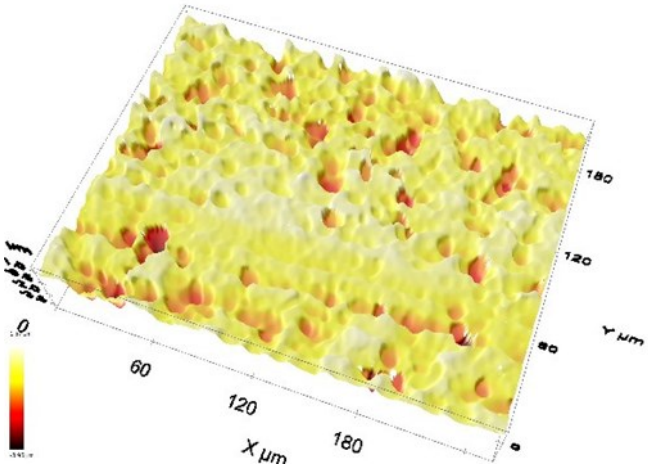


Хромовокислотное анодирование

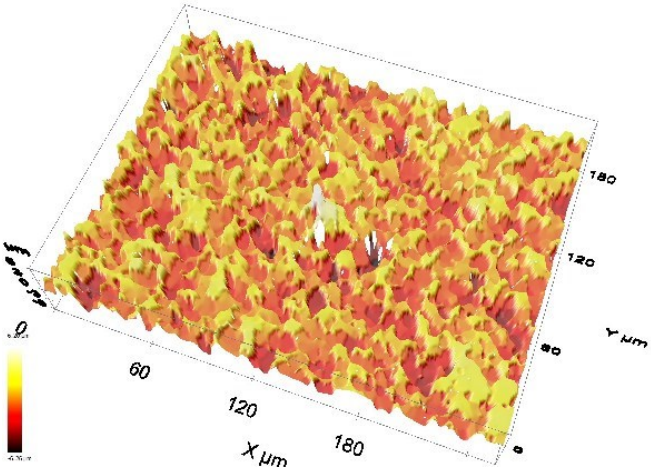
Рисунок 4.3 – Влияние составов электролитов на морфологию поверхности листов из сплава 1441



Сернокислотное анодирование



Фосфорнокислотное анодирование



Хромовокислотное анодирование

Рисунок 4.4 – Состояние поверхности сплава 1441 при обработке в трех различных по химическому составу электролитах

По результатам оценки прочностных характеристик клеевых соединений (см. таблицу 4.3) и коррозионной стойкости покрытия листов из алюминий-литиевых сплавов наиболее перспективным является фосфорно-кислотное анодирование. Выбор этого состава позволяет получать покрытие с более стабильными характеристиками прочности клеевых соединений, с

улучшенной стойкостью к воздействию агрессивных сред за счет низкиого влагопоглощения при уменьшении пористости поверхности.

От характеристик защитных анодированных поверхностей с учетом их коррозионной и адгезионной стойкости зависят прочностные и ресурсные характеристики слоистых алюмостеклопластиков. Для оценки защитных свойств покрытий в зависимости от применяемых составов при анодировании был проведен комплекс ускоренных испытаний в камере солевого тумана (КСТ) [165] и испытания в условиях приморской атмосферы центра климатических испытаний ГЦКИ ВИАМ (г. Геленджик) [166, 167].

Особое внимание было обращено на предварительную подготовку поверхности листов перед анодированием. В процессе обработки использовали травление в кислотном или щелочном растворах. Качество травления определяли по шероховатости поверхности, в значительной степени влияющей на прочностные характеристики клеевых соединений: шероховатость при травлении в щелочном растворе колеблется от 0,34 до 0,58 мкм, в кислотном – от 0,34 до 0,47 мкм. Установлено, что способ травления не оказал значительного влияния на прочность при сдвиге клеевых соединений алюминий-литиевых сплавов с клеевым связующим ВСК-14-2м: при щелочном травлении прочность при сдвиге составляет 29,2 МПа и 39,0 МПа; для кислотного травления - 30,2 МПа и 40,6 МПа при температурах испытания 20 °С и 120 °С.

Для дальнейшего совершенствования фосфорно-кислотного электролита с целью исключения из рецептуры токсичных хлористых соединений Cr^{+6} разработан модифицированный электролит с использованием лимонной кислоты. Состав электролита для подготовки поверхности листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 следующий: (100-500) г/л фосфорной кислоты, (5-40) г/л серной кислоты и (5-40) г/л лимонной кислоты. В новом технологическом процессе комбинированного анодного оксидирования для уплотнения покрытия после

процесса анодного оксидирования применяли раствор, содержащий растительный экстракт, индикатор алюминия и триэтаноламин [168].

В таблицах 4.4 и 4.5 представлены результаты испытаний образцов с анодно-оксидными покрытиями, полученными с применением хромово-кислотного и комбинированного электролитов. Исследовано влияние солевого тумана и климатических факторов в условиях приморской атмосферы центра испытаний ГЦКИ ВИАМ на свойства клеевых соединений, изготовленных из листов алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 с клеевым связующим ВСК-14-2м. После экспозиции в камере солевого тумана и в натурных климатических условиях в течение 180 суток у образцов с покрытиями, сформированными по разработанной технологии комбинированного анодного оксидирования, сохранились высокие прочностные характеристики клеевых соединений (см. таблица 4.5).

Таблица 4.4 – Свойства клеевых соединений после коррозионных испытаний в КСТ

Характеристика	Способ анодного оксидирования	
	Комбинированное	Хромово-кислотное
Время до начала коррозионных повреждений в КСТ, ч	≥ 430	≥ 335
Прочность при сдвиге $\tau_в$, МПа	35,1 – 36,6	≥ 32,0
Адгезионные характеристики, кН/м	2,6 – 2,8	2,3 – 2,5

Таблица 4.5 – Прочностные характеристики клеевых соединений листов из алюминий-литиевых сплавов с клеевым связующим ВСК-14-2м после натурных коррозионных испытаний в ГЦКИ ВИАМ

Время испытаний образцов	Прочность при сдвиге $\tau_в$, МПа
180 суток	36,0 – 39,0 38,0

Из анализа данных таблиц 4.4 и 4.5 следует, что применение для подготовки поверхности листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 анодирования в комбинированном электролите, содержащем серную, фосфорную и лимонную кислоты, с последующим уплотнением анодной пленки, позволяет получать анодно-оксидное покрытие, обеспечивающее высокие прочностные характеристики клеевых соединений слоистых алюмостеклопластиков, что подтверждено результатами испытаний с экспозицией в течение 180 суток в условиях камеры солевого тумана и при натурных климатических испытаниях в приморской зоне ГЦКИ ВИАМ [169].

Использованный в разработанной технологии анодного оксидирования состав комбинированного электролита с последующим уплотнением покрытия, не имеющий в своем составе соединений Cr^{6+}, имеет 3 класс опасности по сравнению с хромово-кислотным покрытием, который содержит компоненты 1-го класса опасности (ГОСТ 12.1.007).

4.3 Выбор клеевых связующих и клеевых препрегов для применения в слоистом материале

Первые отечественные алюмостеклопластики СИАЛ-1 и СИАЛ-3 были созданы на основе листов из сплава Д16чАТ и клеевого препрега марки КМКС-1.80.Т60.37 [104-106, 170, 171].

Результаты оценки клеевых соединений при стандартной подготовке анодированием в хромовой кислоте поверхности листов из сплава Д16АТ под склейку с клеевым препрегом КМКС-1.80.Т60.37 после коррозионных испытаний приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Характеристики клеевых соединений листов Д16АТ и клеевого препрега КМКС-1.80.Т60.55 при подготовке поверхности листов хромовокислотным анодированием

Виды воздействия различных факторов на образцы	Предел прочности при сдвиге $\tau_в$, МПа	
	Температура испытания образцов, °С	
	20	80
Исходное состояние	33,2	27,7
Влияние нагревов до температуры 80 °С с выдержкой: 500 ч 1000 ч	 32,2 31,1	 29,2 27,5
Выдержка в камере солевого тумана (КСТ): 30 сут. 90 сут.	 29,8 17,5	 23,3 15,5
Влияние влажной среды φ=98 % с выдержкой: 30 сут. 90 сут.	 29,8 22,5	 23,3 16,5

Результаты коррозионных испытаний листов алюминиевого сплава Д16АТ в контакте с отвержденным клеевым препрегом КМКС-1.80.Т60.55. показали отсутствие гальванической пары, что подтверждает возможность использования в пакете слоев стеклопластика и алюминиевых листов.

Замена алюминиевого сплава Д16АТ на алюминий-литиевые сплавы для слоистых алюмополимерных материалов явилась следующим этапом развития алюмостеклопластиков. По своим технологическим и прочностным параметрам к таким алюминий-литиевым материалам относятся сплавы 1441Т1 (Т11, Т12) и В-1469Т1, обладающие повышенным модулем упругости (Е = 78-80 ГПа) и пониженной плотностью (d = 2600-2670 кг/м^3). По теплостойкости эти сплавы могут использоваться в конструкции с длительными нагревами до температур 125-130 °С, вместо 80 °С для сплава Д16чАТ.

Для использования листов из Al-Li сплавов 1441 и В-1469 в структурах СИАЛ с учетом всех положительных характеристик потребовалось применение стеклопластика с теплостойкостью не менее 120 °С и выбор полимерной композиции на основе эпоксидного клеевого связующего ВСК-14-2м. Был выбран клеевой препрег марки КМКС-2.120.Т60.37 с теплостойкостью 120 °С. Слой стеклопластика имеет плотность 1780-1800 кг/м^3, пористость до 1,0 % и характеризуется низким влагопоглощением при выдержке в атмосфере с влажностью φ=98 % (за 30 суток - 0,35 % масс., за 45 суток - 1,2 % масс).

Сочетание прочностных характеристик клеевых соединений листов сплава 1441РДТ11 и клеевого препрега КМКС-2.120.Т60.37 с клеевым связующим ВСК-14-2м позволило обеспечить повышенный уровень прочностных свойств и адгезионных характеристик с сохранением нейтрального контакта «металл-стеклопластик».

В результате проведенных исследований повышен верхний предел рабочих температур с 80 °С до 120 °С алюмостеклопластиков СИАЛ-1-1 и СИАЛ-3-1, разработанных с использованием листов сплава 1441, по сравнению с материалами СИАЛ-1 и СИАЛ-3 на основе листов сплава Д16 с сохранением служебных характеристик материала [170, 172].

Совершенствование материала в части повышения прочности алюмостеклопластиков СИАЛ можно достичь за счет использования новых наполнителей в их составе. Для решения задачи по обеспечению высокого уровня прочностных характеристик алюмостеклопластиков, в случае применения листов из Al-Li сплава 1441, необходимо доработать состав клеевого связующего с обеспечением необходимых реологических характеристик для равномерной пропитки стеклонаполнителя и работоспособности стеклопластика при повышенных до 120 °С температурах и выбрать вид стеклонаполнителя для изготовления клеевого препрега.

Необходимо отметить, что за рубежом вопрос повышения прочностных характеристик в материалах GLARE был решен применением в качестве

наполнителя стеклоровинга в виде непрерывных высокопрочных волокон с повышенным модулем упругости при однонаправленной укладке по слоям.

Стекловолокна российского производства марок ВМД и ВМП следующего химического состава: $Si0_2$ 57-60 %, Al_2O_3 24-26 %; MgO 4-9 %; CaO 6-10 %; TiO_2 0,4-0,8 %; ZrO_2 0,07-0,15 %, Fe_2O_3 0,2-0,45 %; K_20 0,05-0,3 %; Na_2O 0,05-0,3 % для использования в клеевых препрегах алюмостеклопластиков нового поколения обладают аналогичными характеристиками: прочность составляет от 4500 до 6000 МПа, модуль упругости - от 85 до 95 ГПа.

Ровинг марки РВМПН-10-400 состоит из однонаправленных некрученых стеклянных жгутов марки ВМП диаметром 10 мкм. Такой наполнитель в клеевом препреге имеет максимальные прочностные характеристики при однонаправленной укладке. Использование стеклонаполнителя в виде ровинга без текстильной обработки обеспечивает исключение микроповреждений волокон [173-174].

Высоковязкие клеевые связующие и волокнистые наполнители из однонаправленных некрученых жгутов (ровинга) из стекла ВМП, применяемые в первых алюмостеклопластиках СИАЛ, не обеспечивали равномерного нанесения связующего на наполнитель. Использование такого препрега в отформованном стеклопластике приводило к появлению макро- и микропористости, снижающей надежность, ресурс и прочностные характеристики изделия.

Для получения требуемых прочностных и технологических свойств соединений слоев металлических листов и стеклопластиков необходимо изменение реологических характеристик связующего за счет оптимизации химического состава в пределах марки для получения необходимой вязкости, которая позволит обеспечить качественную пропитку стеклоровинга и равномерное распределение по толщине клеевых препрегов марки КМКС-2м.120.РВМПН.

Доработанное клеевое связующее расплавного типа марки ВСК-14-2мР на основе смеси эпоксидных олигомеров (дианового хлорсодержащего и азотосодержащего), полисульфона и отвердителя ароматического типа отвечает всем необходимым требованиям: обладает пониженной динамической вязкостью и оптимальными реологическими свойствами, что позволяет осуществить качественную пропитку стеклоровинга, удовлетворительное смачивание поверхности стеклянных жгутов по всей границе раздела и равномерное распределение связующего в составе препрега. Изменение соотношения «связующее-стеклоровинг» позволяет варьировать прочностные характеристики слоев стеклопластика в широких пределах в зависимости от требований конструкции.

В таблице 4.7 приведены свойства клеевых связующих, разработанных для применения в составе алюмостеклопластиков типа СИАЛ.

На рисунке 4.5 представлена температурная зависимость динамической вязкости клеевых связующих ВСК-14-2мР, ВСК-14-2м и ВСК-14-3. Динамическая вязкость связующего ВСК-14-2мР изменяется от 42,6 Па·с при 90 °С до 10 Па·с при 120 °С, в то время как динамическая вязкость связующего ВСК-14-2м в этом температурном интервале составляет от 228 до 63 Па·с, а связующего ВСК-14-3 – от 104 до 32 Па·с.

Таблица 4.7 – Свойства клеевых связующих, используемых в составе алюмостеклопластиков СИАЛ

Свойства	Марка связующего		
	ВСК-14-3	ВСК-14-2м	ВСК-14-2мР
Предел прочности при сдвиге клеевых соединений Al-Li сплава 1441Т12, МПа, не менее при температуре, ^{0}С 20 150	 14,9 14,9	 34,6 17,7	 20,4 20,4
Предел прочности при отслаивании кН/м, не менее	4,0	3,3	4,0
Температура стеклования, ^{0}С	175-180	175-180	173-175
Массовая доля летучих веществ, %, не более	3	3	2

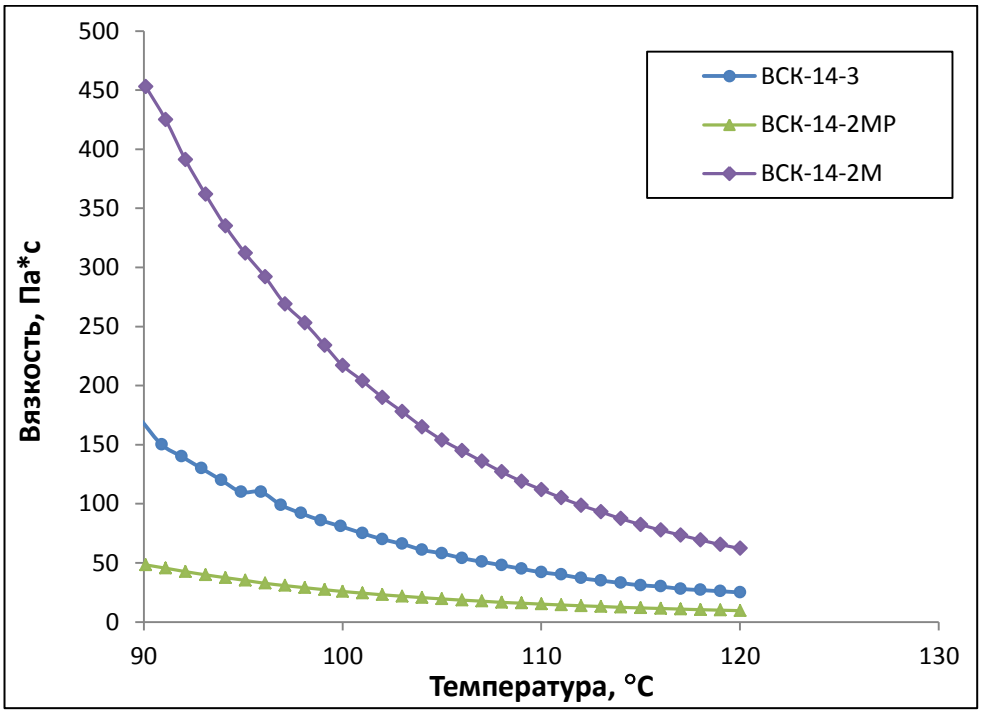


Рисунок 4.5 – Зависимость динамической вязкости клеевых связующих ВСК-14-3, ВСК-14-2м и ВСК-14-2мР от температуры

С целью определения продолжительности переработки связующего (время, в течение которого связующее контактирует с поверхностью

наносящих валов в условиях длительного нагрева при постоянной температуре в процессе нанесения на наполнитель) были исследованы показатели динамической вязкости клеевого связующего ВСК-14-2мР при температуре 100 °С во времени.

Установлено (таблица 4.8, рисунок 4.6), что реологические характеристики (G' и G'') клеевого связующего ВСК-14-2мР в течение 3 ч при температуре 100 °С меняются незначительно. На графике зависимости динамического модуля упругости G' и модуля потерь G'' от продолжительности выдержки при температуре 100 °С точка пересечения кривых отсутствует (см. рисунок 4.6), что связано с отсутствием момента гелеобразования и подтверждает возможность переработки клеевого связующего ВСК-14-2мР в препрег.

Таблица 4.8 – Изменение динамической вязкости клеевого связующего ВСК-14-2мР при продолжительном воздействии температуры 100°С

Время, ч	G', Па	G", Па	G"/G'	Вязкость, Па*с
0	13	242	18,0	24,0
0,5	15	242	16,7	24,1
1,0	16	253	16,2	25,2
1,5	17	264	15,1	26,2
2,0	19	273	14,2	27,2
2,5	21	282	13,7	28,0
3,0	23	291	12,5	29,0

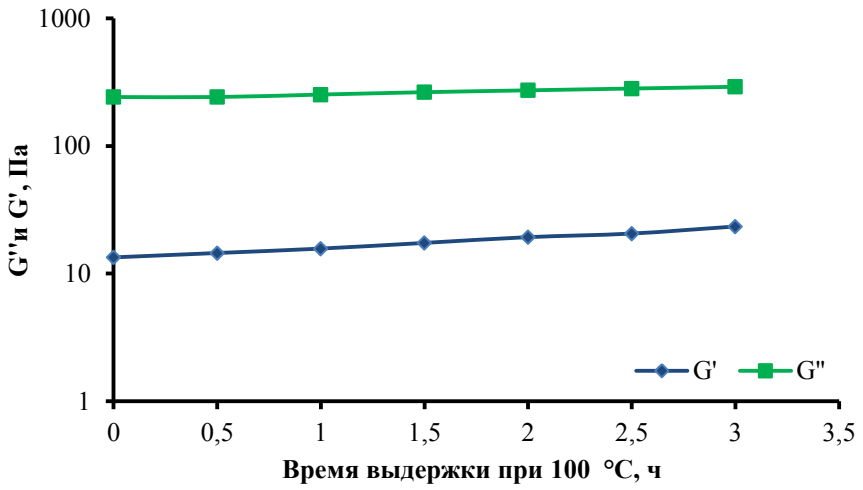


Рисунок 4.6 – Характер изменения вязкостных характеристик G' и G'' клеевого связующего ВСК-14-2мР в процессе длительной выдержки при температуре 100 °С

Пониженная вязкость связующего ВСК-14-2мР позволяет равномерно наносить клеевое связующее на стеклоровинг - разброс наноса составляет 1,5-2 %, что обеспечивает стабильность показателей стеклопластика, отформованного из клеевого препрега КМКС-2мР.120.РВМПН. Свойства стеклопластиков, разработанных для использования в составе СИАЛ, представлены в таблице 4.9.

Необходимо отметить, что равномерное нанесение высокопрочного клеевого связующего на поверхность стеклоровинга при изготовлении препрега обеспечивается использованием современного технологического оборудования, которое позволяет изготавливать препрег КМКС-2мР.120.РВМПН с содержанием связующего с массовой долей до 26-30 %, вместо 30-35 % в клеевых препрегах КМКС-1.80. и КМКС-2.120 на стеклоткани Т-60 (ВМП) [173, 174].

Таблица 4.9 – Свойства стеклопластиков на основе клеевых препрегов

Наименование показателей	Значение показателей		
	КМСК-1.80.Т60.37	КМКС-2.120.Т60.37	КМКС-2мР.120.РВМПН.30
Диапазон рабочих температур, °С	-60 - +80	-130 - +120	-130 - +120
Плотность стеклопластика, кг/м^3	1800	1780	1950
Временное сопротивление, МПа $\sigma_{в1}^{*1}$, $\sigma_{в2}^{*2}$,	 1325 34	 1325 70	 1980 -
Модуль упругости при растяжении, ГПа $E_{в1}^{*1}$ $E_{в2}^{*2}$	 40,0 6,1	 50,0 12,0	 63,0 35,0
Предел прочности при сжатии, МПа $\sigma_{-в1}$, $\sigma_{-в2}$,	 800 160	 930 220	 1580 1100
Модуль упругости при сжатии, ГПа $E_{-в1}$	 45,0	 40,0	 50,0
Предел прочности при статическом изгибе, МПа $\sigma_{ви1}$ $\sigma_{ви2}$	 1150 120	 1275 130	 2150 -
Ударная вязкость, $a_к$, КДж/м^2	200	200	210
Предел прочности при межслоевом сдвиге, $\tau_В$, МПа	60	70	80
2 Примечания 1 – направление приложения нагрузки - вдоль армирующих волокон 2 – направление приложения нагрузки - поперек армирующих волокон			

В таблице 4.10 представлены сравнительные характеристики слоистых материалов пятислойной структуры СИАЛ-1 и СИАЛ-3 с использованием алюминиевого сплава Д16чАТ в сравнении с СИАЛ-1-1, СИАЛ-3-1 с использованием алюминий-литиевого сплава 1441Т11 и СИАЛ-1-1Р,

СИАЛ-3-1Р с использованием алюминий-литиевого сплава 1441Т12 [175-179].

Таблица 4.10 – Основные свойства материалов СИАЛ пятислойной структуры

Материал	Состав СИАЛ		$\sigma_в$, МПа	E, ГПа	d, кг/м^3	Рабочая температура, °С
	Алюминиевый сплав	Основа стеклопластика				
СИАЛ-1	Д16чАТ	Клеевой препрег марки КМКС-1.80.Т60.37 на основе клеевого связующего ВСК-14-1 и кордной стеклоткани Т-60 (ВМП)	900	60	2470	80
СИАЛ-3	Д16чАТ		600	55	2470	
СИАЛ-1-1	1441Т11	Клеевой препрег марки КМКС-2.120.Т60.37 на основе клеевого связующего ВСК-14-2 и кордной стеклоткани Т-60 (ВМП)	900	67	2360	120
СИАЛ-3-1	1441Т11		600	64	2360	
СИАЛ-1-1Р	1441Т12	Клеевой препрег марки КМКС-2мР.120.РВМПН.30 на основе клеевого связующего ВСК-14-2мР и ровинга из высокомодульного стекловолокна	990	70	2350	120
СИАЛ-3-1Р	1441Т12		630	64,5	2350	
Алюминиевый лист	Д16чАТ	–	430	70	2780	80
	1441РДТ11	–	430	79	2590	~130

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод, что слоистый алюмополимерный композиционный материал СИАЛ-1-1Р с применением листов сплава 1441Т12 и клеевого препрега марки

КМКС-2мР.120.РВМПН.30 на основе ровинга из высокомодульного стекловолокна (с однонаправленной укладкой наполнителя и укладкой 0,90) с разработанным клеевым связующим ВСК-14-2мР (по ТУ 1.595-12-1475-2014 и ТИ 1.595-12-743-2014) по уровню прочностных характеристик превосходит слоистые алюмополимерные композиционные материалы СИАЛ-1 на основе алюминиевого сплава Д16чАТ и клеевого препрега КМКС-1.80.Т60 и СИАЛ-1-1 на основе сплава 1441Т11 и клеевого препрега КМКС-2.120.Т60.37 за счет использования в структуре СИАЛ стеклопластика на основе стеклоровинга.

Для создания слоистого материала с применением листов б*о*льшей толщины и СИАЛ на тонких листах из алюминий-литиевых сплавов были подобраны и использованы следующие клеевые препреги: КМКС-2м.120.Т64.55, КМКС-2м.120.Т60.37, КМКС-2мР.120.РВМПН.30 с разным содержанием армирующего стеклонаполнителя.

Для трехосного напряженного состояния конструкции использование в составе пакета стеклопластика на ткани Т-64 (ВМП) с перекрестным плетением приведет к уменьшению анизотропии свойств. Учитывая также, что в структуре слоистого материала для постановки крепежа применяются внешние листы б*о*льшей толщины 1,5 - 2,0 мм, чем внутренние тонкие листы (0,3 - 0,5 мм) с составе СИАЛ, то для их приклеивания требуется клеевой препрег с пониженным содержанием армирующего стеклонаполнителя (~ 28-32 % об.), обеспечивающий максимальный уровень прочности при сдвиге клеевых соединений.

Прочность при сдвиге клеевых соединений листов из алюминий-литиевого сплава В-1469Т1 и клеевого препрега КМСК-2м.120.Т64 с разным объемным содержанием армирующего наполнителя приведена в таблице 4.11. Показано, что для достижения максимальной прочности при сдвиге τ_B (~ 33 МПа) требуется два слоя (каждый толщиной ~ 16 мкм) клеевого препрега с содержанием армирующего наполнителя ~ 30 % об.

Таблица 4.11 – Прочность при сдвиге клеевых соединений

Материал	Марка препрега	Объемное содержание наполнителя, %	Количество слоев препрега	Предел прочности при сдвиге τ_B, МПа
Лист t=1,8 мм из сплава В-1469Т1 Ан.Окс.хр.	КМКС-2м.120.Т64.55	30	1	28,0-29,5 / 28,5
		30	2	31,5-33,5 / 33,0
	КМКС-2м.120.Т64.37	40	1	22,5-24,5 / 23,5
		40	2	26,0-27,5 / 27,0

Т.к. конструкция из слоистого материала испытывает нагрузки, как в продольном, так и в поперечном направлениях, то для повышения статической прочности материала в поперечном направлении в клеевом препреге армирующий наполнитель должен быть выполнен в виде равнопрочной ткани.

Исходя из вышесказанного, для приклеивания внешних (наружных) листов был выбран клеевой препрег на равнопрочной стеклоткани КМКС-2м.120.Т64.55 с пониженным содержанием армирующего наполнителя (~ 30 % об.). Для приклеивания внутренних листов был применен клеевой препрег на однонаправленной стеклоткани КМСК-2м.120.Т60.37 (~ 55-60 % об.) с клеевым связующим ВСК-14-2м. Благодаря высокой прочности стеклянных волокон повышается прочность слоистого материала в направлении армирования.

Для повышения адгезионных характеристик соединений по границам поверхностей металлических листов и стеклопластика при формировании пакетов слоистых материалов на листы в зарубежных слоистых материалах GLARE наносят методом распыления дополнительный клеевой состав [168], обеспечивающий необходимую прочность при сдвиге соединений между металлическими и полимерными слоями.

Для материала СИАЛ при отработке состава связующего предусматривалось обеспечение необходимых прочностных характеристик соединений металл-стеклопластик без дополнительного нанесения клеящих пленочных прослоек. Для этих целей было использовано клеевое связующее ВСК-14-2мР, разработанное на базе существующих рецептур клеевых связующих ВСК-14-2 и ВСК-14-2м с внесенными изменениями реологических характеристик, снижающих вязкость с обеспечением равномерного наноса связующего менее 30 %. По результатам отработки нанесения клеевого связующего ВСК-14-2мР впервые получены высокие адгезионные характеристики связующего с металлическими анодированными листами и клеевые соединения с повышенными деформационными и теплопрочностыми свойствами.

Проведенная сравнительная оценка адгезионных клеевых соединений в слоистых материалах СИАЛ и на образцах GLARE (полученных по результатам совместных работ [131, 132]) позволила сделать вывод, что прочность соединений в пакетах слоистых материалов СИАЛ несколько выше, чем в материалах GLARE (таблица 4.12, рисунок 4.7), что обеспечивается необходимыми адгезионными характеристиками без нанесения дополнительных клеевых пленок, снижая тем самым трудоемкость при изготовлении деталей из слоистого материала СИАЛ.

Таблица 4.12 – Показатели прочности при отслаивании по границам соединений металл-стеклопластик материалов СИАЛ и GLARE [131, 132])

Характеристика	СИАЛ без нанесения клеевой пленки на листы из сплава 1441	GLARE с нанесением клеевой пленки на листы из сплава 2024
Предел прочности при отслаивании, кН/м	3,8 - 4,2	3,5 - 3,8

На рисунке 4.7 приведен внешний вид расслоений при испытаниях на адгезионную прочность для клеевых соединений на образцах СИАЛ и GLARE.

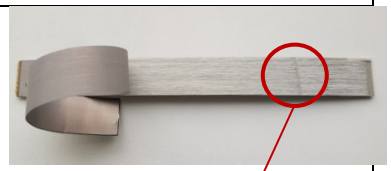
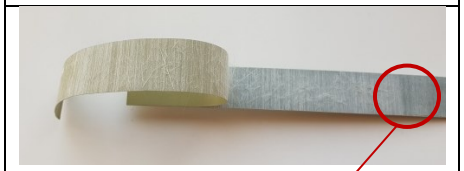
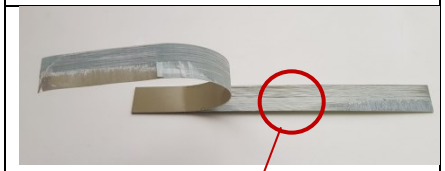
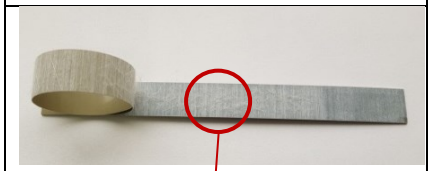
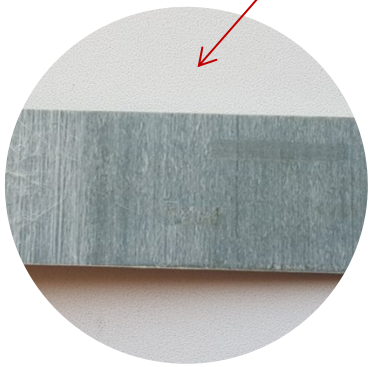
Материал	СИАЛ без дополнительного клеевого слоя пленки на Al-Li листы		GLARE с нанесением клеевого слоя пленки на Al листы	
Расположение стекловолокон в образце	продольное	поперечное	продольное	поперечное
Общий вид испытанного образца				
Направление укладки стеловолокон в ровинге	 а	 б	 в	 г

Рисунок 4.7 – Внешний вид образцов из алюмостеклопластиков СИАЛ (а, б) и GLARE (в, г) после испытаний на адгезионную прочность

Применительно к изготовлению алюмостеклопластиков и слоистых материалов типа СИАЛ выбрано клеевое связующее ВСК-14-2мР на основе смеси эпоксидных олигомеров с пониженной динамической вязкостью для использования в клеевых препрегах на ровинге марки КМКС-2мР.120.РВМПН.30. Пониженная вязкость связующего ВСК-14-2мР позволяет осуществлять равномерное нанесение клеевого связующего на стеклоровинг, что обеспечивает стабильные свойства стеклопластика, отформованного из клеевого препрега КМКС-2мР.120.РВМПН.30, и дает возможность изготавливать алюмостеклопластики с высокими механическими характеристиками.

4.4 Разработка технологических режимов изготовления алюмостеклопластиков методом автоклавного формования

Формование слоистых алюмостеклопластиков проводят в автоклавах, оснащенных приборами регулирования давления и температуры, например выпускаемыми фирмой «Шольц» (рисунок 4.8).

Рисунок 4.8 – Процесс загрузки заготовки детали в автоклав

Для получения стабильных свойств слоистых алюмостеклопластиков были разработаны технологические параметры формования автоклавным способом (избыточное давление в автоклаве $P_ф$, температура формования $T_ф$, время выдержки $t_ф$) с учетом конструктивных особенностей деталей.

При выборе температуры и выдержки при формовании заготовок алюмостеклопластиков учитывали процессы отверждения клеевых связующих ВСК-14-2м, ВСК-14-2мР, используемых в клеевых препрегах КМКС на основе стеклонаполнителей (ровинга и тканей Т-60(ВМП), Т-64(ВМП)), а также режимы термической обработки (искусственного старения) листов из Al-Li сплавов, которые входят в состав СИАЛ [176].

Степень отверждения (95-97) % при температуре (172-175) °С клеевых связующих ВСК-14-2м и ВСК-14-2мР, применяемых при изготовлении клеевых препрегов с ровингом и тканью, достигается за 3 часа [180-183].

Использование в составе СИАЛ листов из сплава 1441 в состоянии термообработки Т12 дало возможность формования алюмостеклопластиков при повышенных температурах Т = 172-175 °С [151], при которых достигается полное отверждение связующих, в отличие от материалов СИАЛ с применением листов из дуралюминов (сплавы Д16чАТ, 1163АТ) с разрешенным нагревом только до Т = 120 °С, что ограничивает максимальную температуру автоклавного формования алюмостеклопластиков и не обеспечивает оптимальный режим отверждения.

Выбор давления при автоклавном формовании алюмостеклопластиков проводили с учетом получения максимальных адгезионных характеристик в клеевых соединениях. Результаты исследований прочности при отслаивании при варьировании давления в автоклаве от 600 до 1000 кПа с интервалом 50 кПа в процессе изготовления СИАЛ-1-1Р (таблица 4.13), показали, что давление $P_ф$ от 800 до 850 кПа является достаточным для отвержения слоистых алюмостеклопластиков и получения требуемого уровня прочности при отслаивании (рисунок 4.9).

Таблица 4.13 – Прочность при отслаивании образцов слоистого алюмостеклопластика СИАЛ-1-1Р

Давление в автоклаве, кПа	Прочность при отслаивании, $S_{отсл}$, кН/м	Характер разрушения
550	3,40	адгезионное
600	3,65	адгезионное
650	3,82	адгезионное
700	3,93	адгезионное
750	4,25	когезионное
800	4,60	смешанное
850	4,61	когезионное
900	4,55	когезионное
950	4,57	когезионное
1000	4,31	когезионное

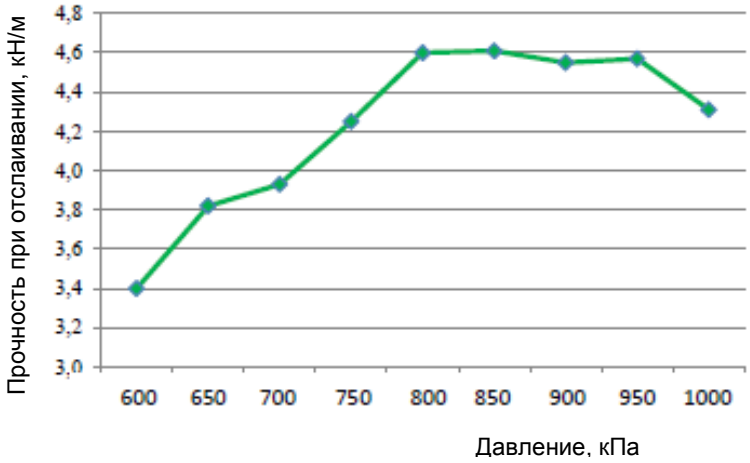


Рисунок 4.9 – Зависимость прочности при отслаивании ($S_{отсл}$) образцов слоистого алюмостеклопластика СИАЛ-1-1Р от давления в автоклаве

Для улучшения равномерности пропитки клеевым связующим стеклонаполнителя в клеевом препреге в процессе формования СИАЛ введена стадия прогрева при определенной температуре и времени выдержки. В зависимости от марки клеевого связующего температура варьируется от 90 °С до 120 °С и время выдержки – от 30 до 50 минут.

Схема технологического процесса изготовления слоистого материала СИАЛ при совмещении процессов формообразования деталей и отверждения клеевого связующего в препреге приведена на рисунке 4.10. Следует отметить, что технология включает сборку пакета СИАЛ в «вакуумном мешке» и поддержание вакуума в течение всего процесса формования детали.

Показано, что для снижения остаточных напряжений и устранения коробления, процесс охлаждения заготовок слоистых материалов до температуры 35-40 °С должен проходить в автоклаве без снятия давления медленно со скоростью ≤ 0,5 °С/мин.

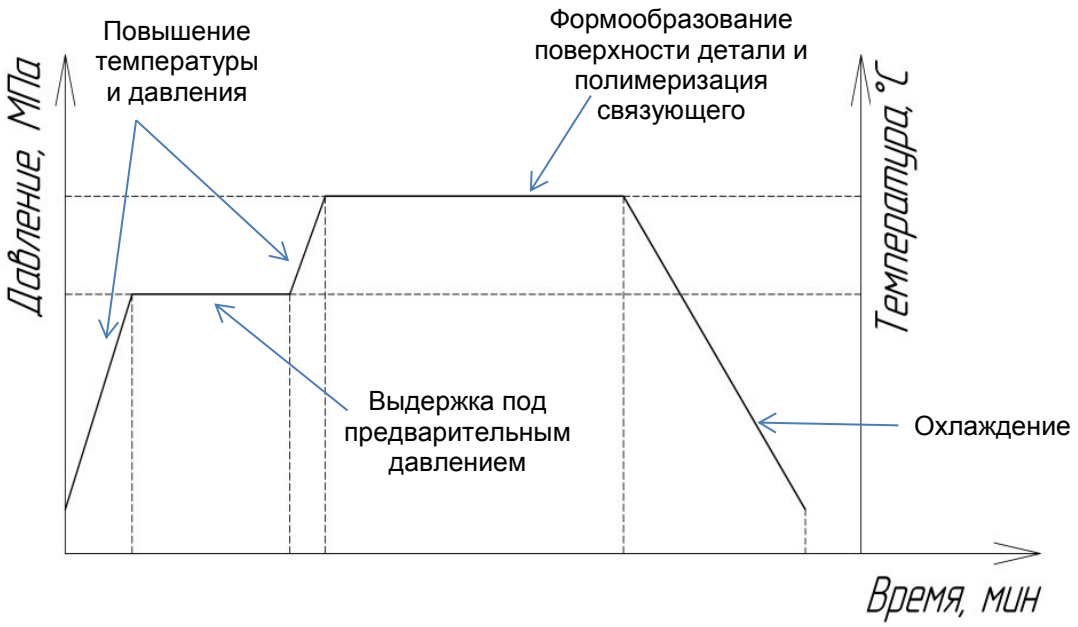


Рисунок 4.10 – Схема технологического процесса изготовления слоистого материала СИАЛ при совмещении процессов формования деталей и отверждения клеевого связующего в препреге

Технологические параметры формования деталей (давление, температура, время выдержки) предварительно отрабатывали на образцах с учетом особенностей конструкции изготавливаемых КПО из СИАЛ.

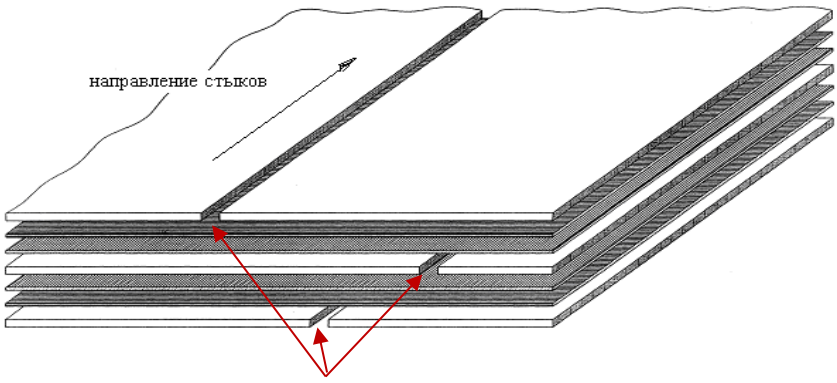
Таким образом, для изготовления методом автоклавного формования алюмостеклопластиков с применением листов из Al-Li сплавов и стеклопластиков разработаны технологические режимы изготовления, обеспечивающие стабильные свойства слоистых алюмостеклопластиков: давление $P_ф$, температура $T_ф$ – (170-180) °С и выдержка при формовании $t_ф$, с обязательной стадией прогрева при температуре T_1 (90-120) °С в течение времени t_1.

4.5 Разработка технологии сращивания алюмостеклопластиков для получения крупногабаритных конструкций

В связи с тем, что в настоящее время листы из алюминий-литиевых сплавов изготавливают шириной до 1200 мм, для получения крупногабаритных элементов и конструкций из СИАЛ, в том числе и с неравномерной толщиной, разработаны методы сращивания заготовок за счет конструктивно-технологических вставок (дублеров) из металлических листов в зонах сращивания [184].

Разработаны следующие схемы соединения заготовок алюмостеклопластиков:

- сращивание встык листов СИАЛ (рисунок 4.11);
- сращивание встык листов СИАЛ-1441 с накладками (рисунки 4.12, 4.13);
- сращивание с использованием внутреннего межслойного дублера в местах, требующих усиления обшивок, стенок каркаса (рисунки 4.14, 4.15).



Расположение швов по сечению СИАЛ при выкладке металлических листов для увеличения габаритов деталей

Рисунок 4.11 – Схема сращивания алюмостеклопластика

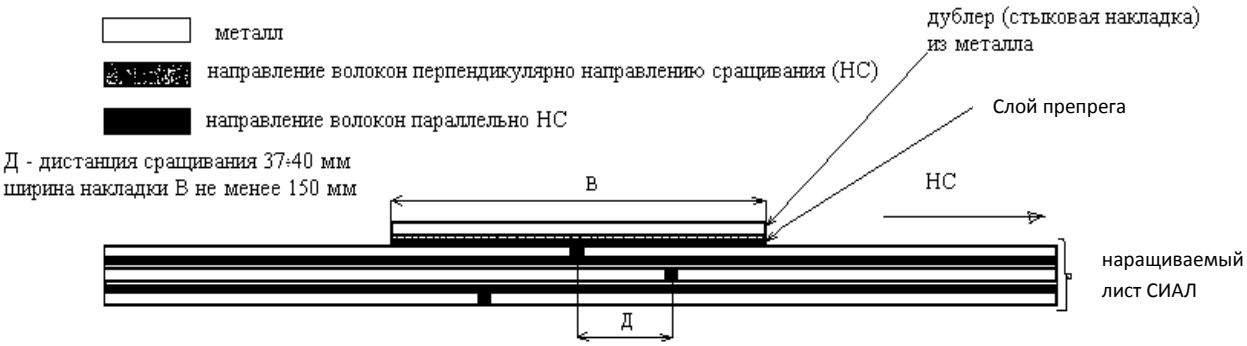


Рисунок 4.12 – Сращивание встык СИАЛ с накладкой из металлического листа

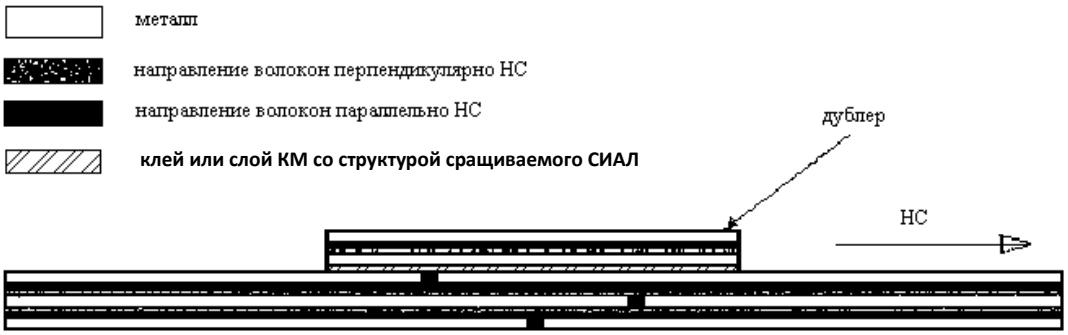


Рисунок 4.13 – Сращивание встык СИАЛ с накладкой из СИАЛ

Основным принципом разработки технологии сращивания является равнопрочность всех сечений полученных крупногабаритных листов

алюмостеклопластика СИАЛ. Для этого стыки металлических слоев следует делать с нахлестом между собой с учетом величины дистанции сращивания Д (см. рисунок 4.12).

Дистанцию сращивания Д рассчитывали с учетом коэффициента безопасности (равного 3) по формуле:

$$Д = \frac{3S \cdot \sigma_{0,2Al}}{\tau_{сдв.}},$$

где S – толщина сращиваемых листов, мм;

$\sigma_{0,2Al}$ – предел текучести алюминиевого сплава, МПа;

$\tau_{сдв.}$ – предел прочности при сдвиге соединения внахлест металлических листов, склеенных пленочным клеем либо препрегом, МПа.

Швы сращивания по сечениям слоев материала должны быть разнесены, а габариты пластин при сращивании определяли из расчета сдвиговых напряжений. Процесс сращивания выполняется одновременно при автоклавном формовании детали, и габариты конструкции с применением СИАЛ ограничиваются размерами внутреннего пространства автоклава (габариты автоклава на ПАО «ВАСО» - ширина 3 м, длина 16 м).

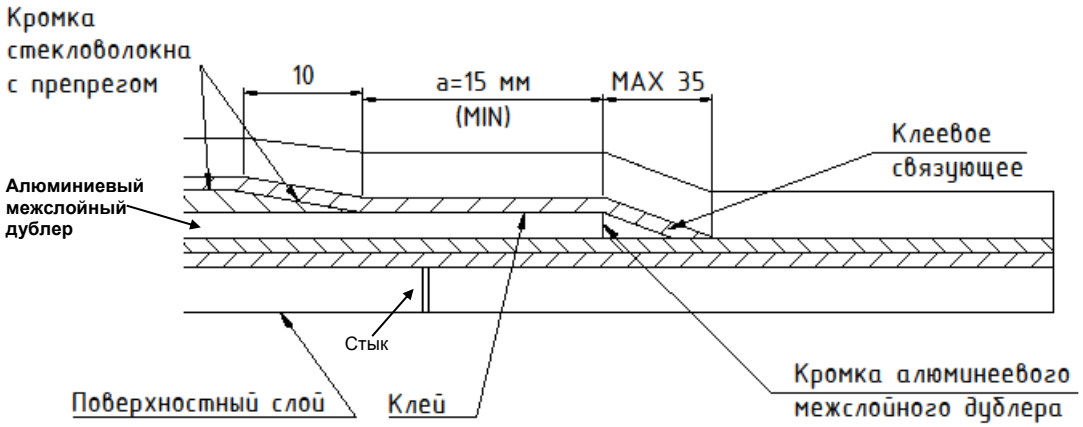


Рисунок 4.14 – Схема расположения слоев в зонах стыка с использованием внутренних межслойных дублеров

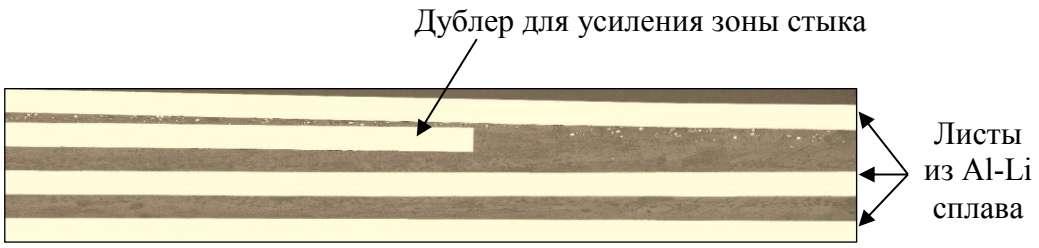


Рисунок 4.15 – Типовое сечение зоны стыка в СИАЛ
с использованием внутреннего межслойного дублера

Для оценки прочностных характеристик в зонах сращивания были использованы заготовки СИАЛ-3-1Р размером 200×450 мм на базе листов из сплава 1441Т12 и клеевого препрега на ровинге КМКС2мР.120.РВМПН.30 с применение стыковки сращиваемых компонентов с использованием внутреннего межслойного дублера (см. рисунок 4.15).

Прочностные характеристики опытных образцов алюмостеклопластиков, полученных методом сращивания по разным схемам соединений, представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Прочность соединений заготовок методом сращивания в алюмостеклопластиках (долевое направление)

Схемы соединений методом сращивания	Варианты армирования	Временное сопротив-ление разрыву, σ_B, МПа	МЦУ, кцикл, при σ_{max} = 157 МПа	СРТУ, dl/dN, мм/кцикл при ΔК = 31 МПа·м$^{1/2}$
	Al+(0,0,0)+Al+(0,0,0)+Al	1010-1100	75-220	0,07-0,09
	Al+(0,90,0)+Al+(0,90,0)+Al	670-690	70-205	0,06-0,08
	Al+(0,0)+Al+(90,0)+Al+(0,90) +Al+(0,0)+Al	690-700	88-209	0,08-0,10
	Al+(0)+Al+(0,90)+Al+ (0,0)+Al+(0,0)+Al+(90,0)+ Al+(0)+Al	700-720	115-190	0,08-0,11
СИАЛ-3-1Р		700-730	80-266	0,09-0,11

Поскольку СИАЛ содержит слои с сильно отличающимися акустическими свойствами (алюминиевый лист – стеклопластик) с небольшой суммарной толщиной, для ультразвукового контроля после автоклавного формования заготовок и элементов деталей из алюмостеклопластиков применяются два наиболее эффективных метода неразрушающего контроля в зависимости от расположения контролируемой зоны: ультразвуковой контактный теневой и акустический импедансный [185].

Показано, что в гибридных конструкциях из слоистого материала СИАЛ с учетом конструктивно-технологических требований, возможно применение алюмостеклопластиков различных вариантов армирования, включая изготовленные методом сращивания для получения крупногабаритных элементов. Наиболее существенное влияние на прочность алюмостеклопластиков оказывает направление армирования и количество слоев стеклопластика в материалах СИАЛ (см. таблицу 4.14). Максимальную прочность обеспечивает трехслойный однонаправленный стеклопластик (0,0,0), однако, при таком направлении армирования возникает анизотропия прочностных свойств алюмостеклопластиков, в т.ч. и зон соединений. Для повышения однородности свойств предпочтительнее использовать варианты перекрестного армирования (0,90,0) или (0,45,0).

Разработаны ТИ 1.595-34-723-2014 и ТР 1.595-34-871-2009 на изготовление элементов соединений из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ с применением методов сращивания заготовок для получения крупногабаритных элементов и конструкций.

Применение технологии соединений слоистых алюмостеклопластиков различными способами, в том числе методом сращивания, обеспечивает повышение весовой эффективности конструкции на 10-15 % за счет уменьшения количества заклепочных стыков и снижения трудоемкости при сборочных работах.

4.6 Разработка слоистых структур алюмостеклопластиков с заданными требованиями с применением листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 и стеклопластиков

Для получения оптимальных прочностных характеристик материалов и обеспечения технологических возможностей изготовлении конструкций с заданными расчетными требованиями разработаны основные принципы конструирования слоистого материала.

Варьируемыми параметрами в структуре алюмостеклопластиков с учетом конструктивно-технологических требований являлись расположение, количество и ориентация слоев в структуре, толщина и марка сплава металлических листов, марка клеевого препрега.

Структурная схема усиленного (гибридного) СИАЛ с распределением составляющих пакета по слоям для проектирования конструкции представлена на рисунке 4.16 и включает в себя базовый СИАЛ (рисунок 4.17) и двухстороннее усиление (рисунок 4.18):

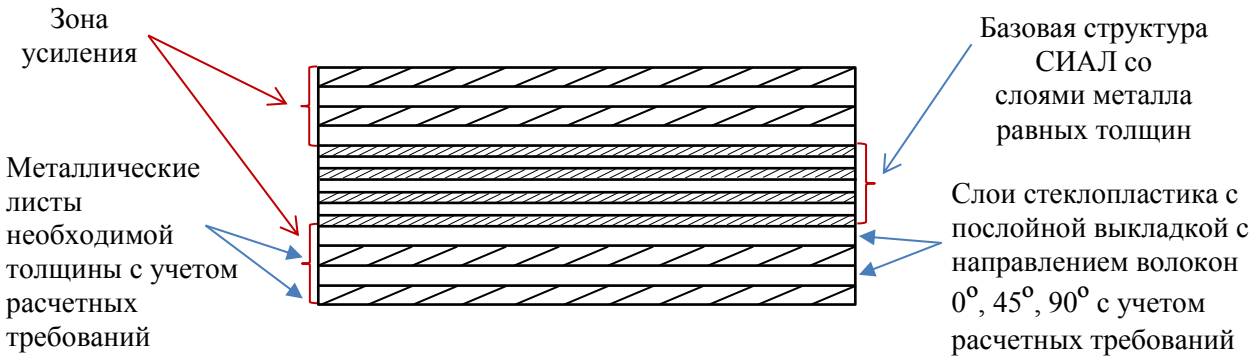


Рисунок 4.16 – Структурная схема усиленного (гибридного) СИАЛ с распределением составляющих пакета по слоям

Общая толщина пакета СИАЛ с двухсторонним усилением рассчитывается по формуле:

$$H_{общ} = h_б + h_{ус}, \qquad (6)$$

Толщина базового пакета СИАЛ ($h_б$) рассчитывается по формуле:

$$h_б = A_м \times N_м + K_{ст} \times N_{ст}, \qquad (7)$$

где $A_м$ – толщина металлического листа (слоя) в пакете; $K_{ст}$ – толщина слоя стеклопластика; $N_м$, $N_{ст}$ – количество металлических листов и слоев стеклопластика;

$$K_{ст} = n_{ст} \times S, \qquad (8)$$

где $n_{ст}$ – число монослоев препрега в стеклопластике по расчету, S – толщина монослоя ровинга с возможной укладкой 0 º, 45 º, 90 º.

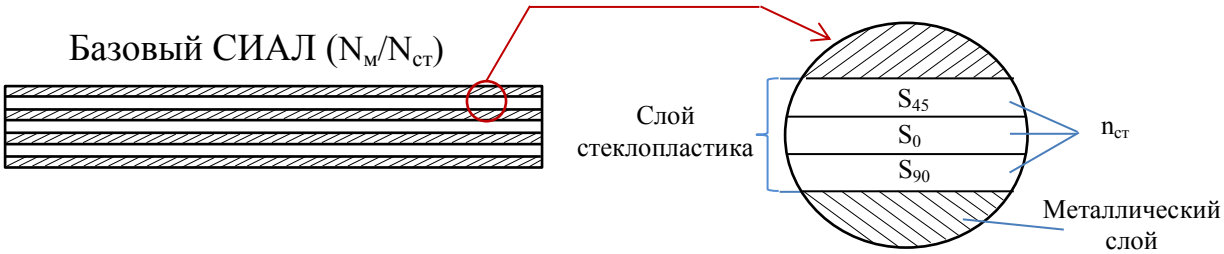


Рисунок 4.17 – Структурная схема базового СИАЛ с распределением составляющих пакета по слоям

Рисунок 4.18 – Зоны усиления для обеспечения требований конструкции и повышения прочностных характеристик

Толщина зоны усиления рассчитывается по формуле:

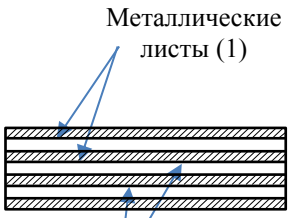
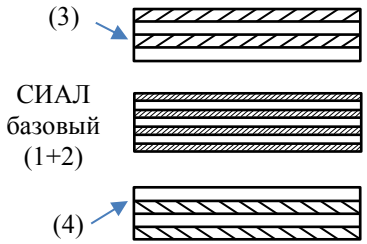
$$h_{ус} = (A_м \times N_м + K_{ст} \times N_{ст}) \times 2^*, \qquad (9)$$

где $N_м$, $N_{ст}$ – количество металлических листов и слоев стеклопластика, $K_{ст}$ – толщина слоя стеклопластика, $A_м$ – толщина металлического листа.

* В структуре пакета СИАЛ для усиления могут быть использованы листовые металлические материалы разных марок и толщин. Усиление может быть симметричным относительно одного пакета или односторонним по расчетным требованиям.

Общие принципы конструирования слоистых материалов с варьируемыми свойствами представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 - Принципы разработки конструкций при проектировании слоистого материала СИАЛ

Конструк-тивное решение (структура СИАЛ)	Структура слоистого материала в сечении	Материал по слоям в структуре	Используемые материалы в конструкциях послойно	Структура слоистого материала	Основные требования при создании структуры СИАЛ	Технические требования по чертежу
Базовый СИАЛ		1 – металлические листы, 2 – слои стеклопластика.	1 – диапазон толщин листов 0,25-0,5 мм, материалы 1441, В-1469. Общее кол-во слоев $N_м$. 2 – стеклопластик с вариантами направлений укладки ровинга в слоях 0°, 45°, 90°. Кол-во слоев стеклопластика по расчету $N_{ст}$.	Марка материала СИАЛ, толщины и количество слоев ($N_м/N_{ст}$) металл/ стеклопластик.	Общее количество слоев материала нечетное. Количество слоев и направления укладки определяют из расчета на прочность.	Марка СИАЛ с указанием марки материала и количество слоев ($N_м/N_{ст}$) металл/ стеклопластик. Может применяться как самостоятельный конструктивный элемент или в составе усиленного (гибридного) СИАЛ.
Усиленный (гибридный) СИАЛ		3 – листы из высокопрочного материала с толщиной и с количеством по конструктивно технологическим требованиям, 4 – клеевое связующее или стеклопластик.	3 – марка и толщины металлического материала, 4 – клеевое связующее или стеклопластик.	Усиление- марка материала и количество дополнительных слоев $N_м/N_{ст}$. СИАЛ- количество слоев ($N_м/N_{ст}$). Усиление- марка материала, количество слоев $N_м/N_{ст}$.	Количество дополнительных слоев четное. Укладка двух или более слоев к базовому СИАЛ. Выбор марок и толщин по расчету.	Слоистый материал с повышенными прочностными характеристиками, обеспечивающий требования по сборочным соединениям.

Принципиальные решения по применению материалов в слоистых конструкциях, варианты соотношений толщин и их чередование были изложены в ряде патентов и работ при непосредственном участии диссертанта [143, 186-191]. В патентах показаны особенности и преимущества применения разработанных структур алюмостеклопластиков различных марок с варьируемыми свойствами, включая СИАЛ с металлическими листами разных толщин и марок сплавов и полимерными слоями, с использованием клеевых препрегов с вариациями направлений укладки армирующих стекловолокон.

Ниже приведена маркировка для алюмостеклопластиков СИАЛ.

Первая цифра в обозначении марки алюмостеклопластиков СИАЛ означает направление армирования стеклопластика:

- СИАЛ-1 (однонаправленный) – алюмополимерный слоистый материал, состоящий из металлических слоев и промежуточных слоев стеклопластика, в котором стеклопластик формируется укладкой монослоев клеевого препрега в одном направлении с ориентацией (0/0). Степень армирования стекловолокном примерно 100 % в направлении укладки клеевого препрега (вдоль проката металлических листов);
- СИАЛ-2 (изотропный) – алюмополимерный слоистый материал, состоящий из металлических слоев и промежуточных слоев стеклопластика, в котором слой стеклопластика формируются укладкой трех монослоев клеевого препрега во взаимно перпендикулярном направлении с ориентацией (0/90/0). Степень армирования стекловолокном примерно 70 % в направлении проката металлических листов и 30 % поперек проката листов;
- СИАЛ-3 (равнопрочный) – алюмополимерный слоистый материал, состоящий из металлических слоев и промежуточных слоев стеклопластика, в котором стеклопластик формируется укладкой двух монослоев клеевого препрега во взаимно перпендикулярном направлении с ориентацией (0/90). Степень армирования стекловолокном примерно 50 % в направлении проката металлических листов и 50 % поперек проката листов.

Структура СИАЛ может быть трехслойная (2/1), пятислойная (3/2), семислойная (4/3), и многослойная (таблица 4.16). При использовании клеевого препрега, армированного стеклоровингом, в марку добавляют букву «Р».

Вторая цифра в обозначении марки СИАЛ соответствует марке листов алюминиевого сплава:

1 – на базе листов из высокомодульного ресурсного алюминий-литиевого сплава 1441 пониженной плотности (паспорт № 1774 – слоистые алюмостеклопластики марок СИАЛ-1-1, СИАЛ-1-1Р, СИАЛ-2-1, СИАЛ-2-1Р, СИАЛ-3-1, СИАЛ-3-1Р);

2 – с применением комбинации листов из алюминий-литиевых сплавов - ресурсного 1441 и высокопрочного В-1469 (паспорт № 1926 – высокопрочный градиентный слоистый алюмостеклопластик марки СИАЛ-3-2Р);

4 – на базе листов из высокомодульного высокопрочного пониженной плотности алюминий-литиевого сплава В-1469 (паспорт № 1909 – высокопрочный слоистый алюмостеклопластик марки СИАЛ-1-4Р).

Отсутствие второй цифры в обозначении марки СИАЛ говорит о том, что алюмостеклопластик изготовлен с применением листов из алюминиевого сплава Д16чАТ.

Примеры типовых структур алюмостеклопластиков с использованием металлических листов и слоев стеклопластиков представлены на рисунке 4.19 [116].

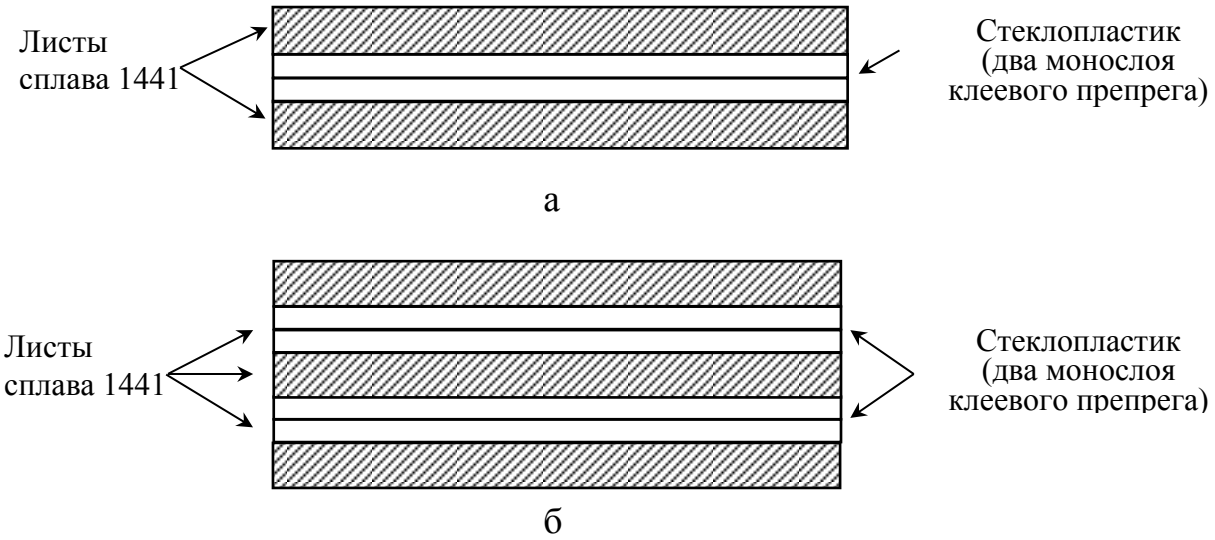


Рисунок 4.19 – Структуры трехслойного (а) и пятислойного (б) алюмостеклопластиков [188, 189]

Таблица 4.16 – Структуры алюмостеклопластиков различных марок

№	Сечение алюмостеклопластика	Марка СИАЛ	Толщина, мм	Соотношение слоев в СИАЛ ($N_м/N_{ст}$)	Ориентация монослоев клеевого препрега в стеклопластике
1		СИАЛ-1	0,88-0,90	2/1	Al-(0/0)-Al
2		СИАЛ-1	2,04-2,06	3/2	Al-(0/0)-Al-(0/0)-Al-(0/0)-Al
3		СИАЛ-2	1,09-1,11	2/1	Al-(0/90/0)-Al
4		СИАЛ-2	1,00-1,02	2/1	Al-(0/90/0)-Al
5		СИАЛ-3	1,15-1,17	2/1	Al-(0/90)-Al
6		СИАЛ-3	1,19-1,21	2/1	Al-(0/90/90/0)-Al
7		СИАЛ-3	1,65-1,66	3/2	Al-(0/90)-Al-(90/0)-Al
8		СИАЛ-3	1,47-1,49	3/2	Al-(0/90)-Al-(90/0)-Al

Использование базовых принципов создания слоистых материалов с учетом расположения и количества слоев в пакете позволило разработать технологическую схему изготовления алюмостеклопластиков с требуемым уровнем расчетных характеристик применительно к типовым вариантам гибридных конструкций.

Последовательность разработки и изготовления конструктивно-подобных образцов типовых деталей планера самолета из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ представлена на рисунке 4.20.

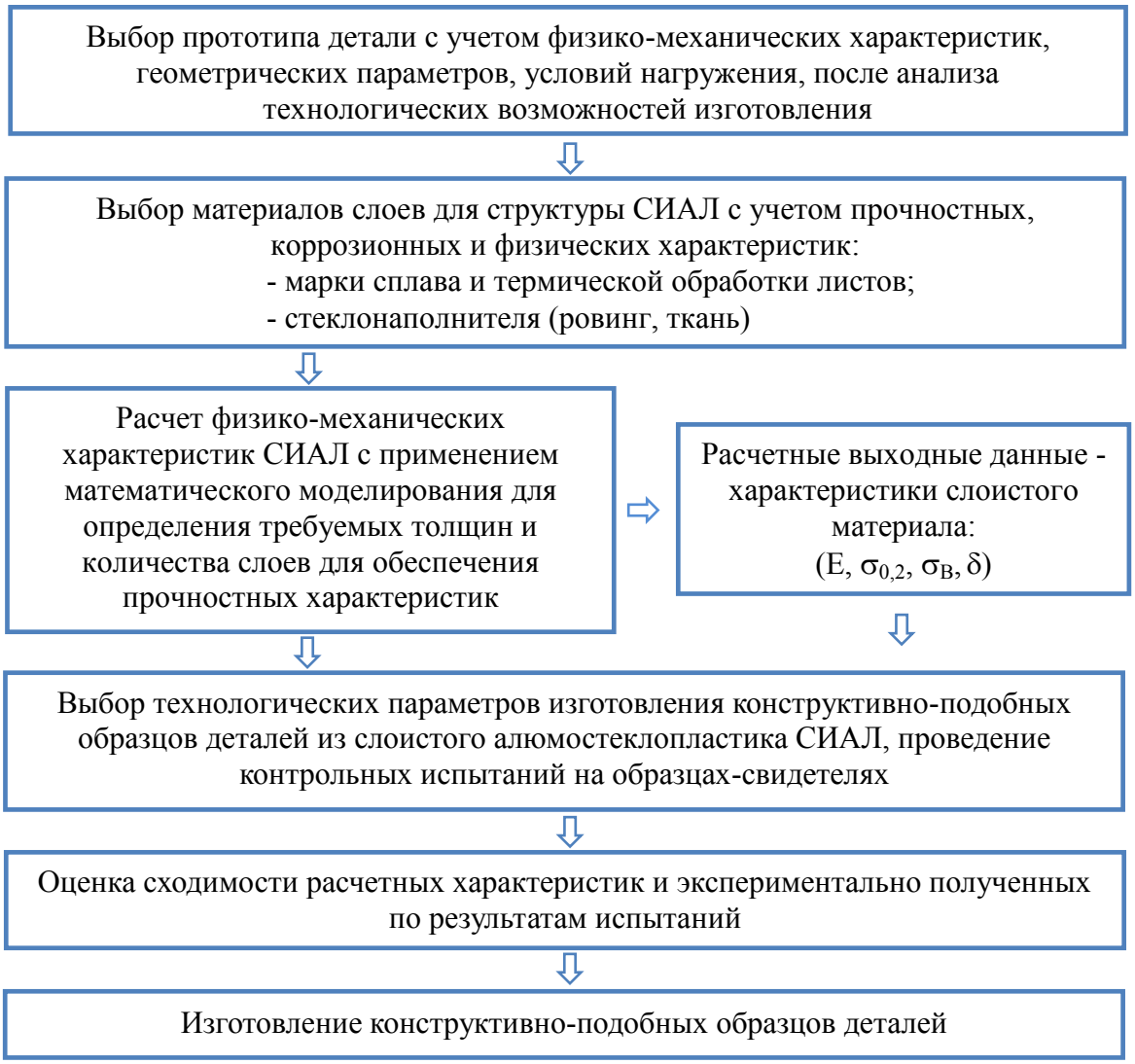


Рисунок 4.20 – Блок-схема последовательности разработки и изготовления конструктивно-подобных образцов деталей из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ

По расчетно-математической модели (глава 4.1, [159]) были спроектированы и изготовлены методом автоклавного формования экспериментальные образцы из слоистых алюмостеклопластиков в виде листовых заготовок. Выбор режимов формования (давление, температура, время) в автоклаве был отработан на образцах с получением стабильных технологических характеристик.

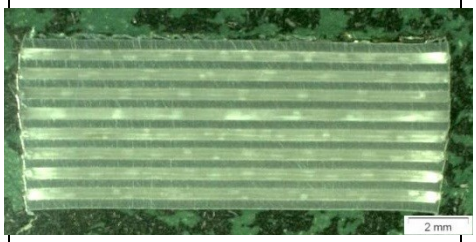
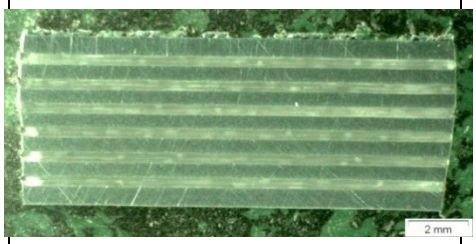
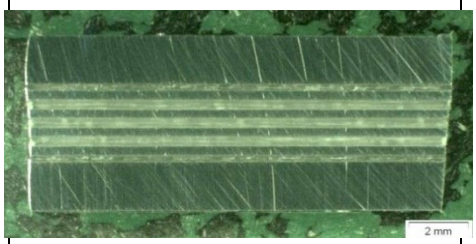
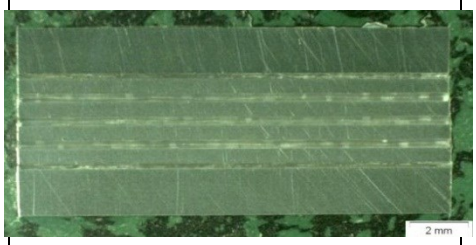
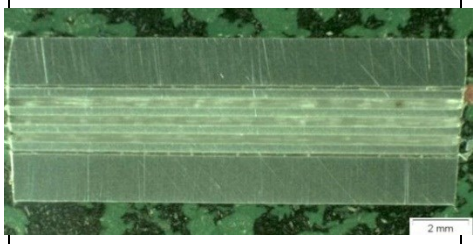
В таблице 4.17 представлены структуры алюмостеклопластиков с листами из Al-Li сплавов: ресурсного сплава 1441 толщиной 0,25 - 1,5 мм и высокопрочного сплава В-1469 толщиной 0,5 - 1,8 мм.

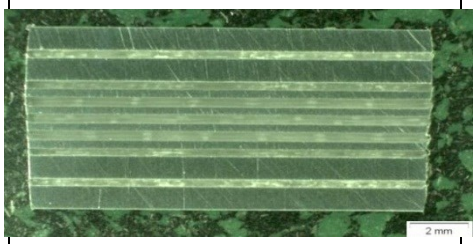
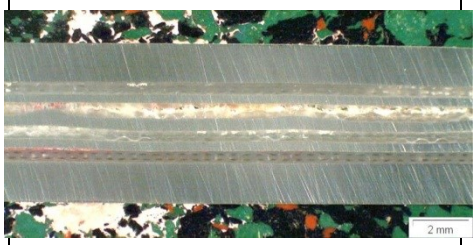
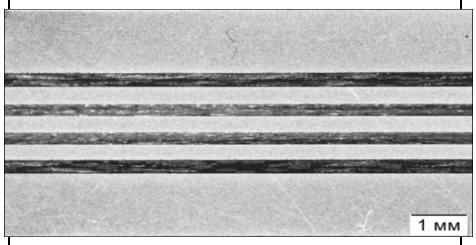
В экспериментальных структурах №№ 1-9 в составе СИАЛ применен клеевой препрег КМСК-2м.120.Т60.37 с содержанием армирующего наполнителя в виде однонаправленной ткани Т60 ~ 55-60 % об.

Повышение модуля упругости и прочностных свойств слоистых материалов достигалось за счет применения клеевого препрега марки КМКС-2мР.120.РВМПН.30 с содержанием армирующего наполнителя в виде стеклоровинга ~ 60-65 % об. за счет более плотной упаковки стекловолокна по сравнению с тканевым наполнителем. Повышение прочностных характеристик показано на примере определенных структур СИАЛ (структура № 10, см. таблицу 4.17).

В случае использования для соединения наружных (внешних) листов увеличенной толщины во всех усиленных структурах для повышения адгезионных клеевых характеристик использован клеевой препрег КМКС-2м.120.Т64.55 на равнопрочной ткани Т-64 (ВМП) с увеличенным содержанием клеевого связующего (до 70 % об.).

Таблица 4.17 – Структуры слоистых материалов

№ стр-ры	Сечение слоистого алюмостеклопластика	Обозначение структур с учетом входящих в состав материалов	Толщина пакета, мм	Содержание метал-лической состав-ляющей в композиции, %	Содержание стеклопласти-ковой состав-ляющей в композиции, %
1		СИАЛ-1441 (9/8)	5,35-5,37	46	54
2		СИАЛ-1469 (7/6)	5,74-5,76	67	33
3		Лист В-1469 толщиной 1,8 мм + СИАЛ-1441 (4/3) + Лист В-1469 толщиной 1,8 мм	5,91-5,93	75	25
4		Лист В-1469 толщиной 1,8 мм + СИАЛ-В-1469 (4/3) + Лист В-1469 толщиной 1,8 мм	6,58-6,60	82	18
5		Лист В-1469 толщиной 1,8 мм + СИАЛ-1441 (4/3) с одним слоем препрега + Лист В-1469 толщиной 1,8 мм	5,68-5,70	78	22

№ стр-ры	Сечение слоистого алюмостеклопластика	Обозначение структур с учетом входящих в состав материалов	Толщина пакета, мм	Содержание метал-лической состав-ляющей в композиции, %	Содержание стеклопласти-ковой состав-ляющей в композиции, %
6		Лист 1441 толщиной 1,0 мм + СИАЛ-1441 (4/3) + Лист 1441 толщиной 1,0 мм	6,88-6,90	67	33
7		Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) + Лист В-1469 толщиной 1,5 мм	4,95-4,97	73	27
8		Лист 1441 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) + Лист 1441 толщиной 1,5 мм	4,78-4,80	70	30
9		Лист 1441 толщиной 0,25мм + Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) + Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + Лист 1441 толщиной 0,25мм	5,83-5,85	69	31
10		Лист В-1469 толщиной 1,5 мм + СИАЛ-1441 (3/2) с ровингом + Лист В-1469 толщиной 1,5 мм	4,98-5,00	75	25

Механические свойства при растяжении (σ_B, $\sigma_{0,2}$, δ, E) алюмостеклопластиков, определенные на образцах в поперечном и продольном направлениях, приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Экспериментальные и расчетные механические свойства при растяжении алюмостеклопластиков

Характеристики	Направ-ление проката листов	СИАЛ-3-1 (2/1)	СИАЛ-3-4 (3/2)	СИАЛ-3 (4/3)	Лист из сплава 1163
		Сплав и толщина металлического листа			
		1441Т12 0,25 мм	В-1469Т1 0,5 мм	Д16 (1163) 0,5 мм	1,5 мм
		Экспериментальные[*1] / Расчетные			
Временное сопротивление разрыву σ_B, МПа	Д	655 / 630	675 / 655	590 / 580	-
	П	610 / 600	640 / 620	550 / 540	≥ 405
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Д	325 / 310	430 / 420	310 / 295	-
	П	310 / 300	390 / 380	290 / 275	≥ 270
Относительное удлинение δ, %	Д	3,4 / 3,3	3,3 / 3,2	3,2 / 3,1	-
	П	2,3 / 2,2	2,4 / 2,2	2,1 / 2,0	≥ 13,0
Модуль упругости при растяжении E, ГПа	Д	64 / 65	65 / 66	58 / 60	-
	П	60 / 61	62 / 62	55 / 56	67,1
Плотность d, кг/м^3	-	2300 / -	2400 / -	2600 / -	2780
Температура эксплуатации $T_{экс}$, °C	-	120	120	80	80

1 Примечание – Приведены средние значения при испытании 5 образцов на точку

Разработанные слоистые алюмостеклопластики нового поколения с листами из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 и стеклопластиками из клеевых препрегов с ровингом по сравнению с СИАЛ, изготовленными на базе листов традиционных сплавов Д16 (1163) с клеевыми препрегами со стеклонаполнителями в виде ткани, обладают улучшенными физико-

механическими свойствами: модулем упругости, временным сопротивлением σ_B = 600-1200 МПа (в зависимости от схемы армирования стекловолокном и доли металлической составляющей в структуре СИАЛ), плотностью d = 2300-2400 кг/м^3 и температурой эксплуатации, повышенной с 80 °С до 120 °С.

При использовании листов из высокопрочного сплава В-1469 в составе материала СИАЛ повышается предел текучести и временное сопротивление алюмостеклопластика (см. таблицу 4.18).

Алюмостеклопластики имеют преимущества перед монолитными листами 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.

Применительно к конструкции обшивок крыла разработаны структуры слоистых алюмостеклопластиков с варьируемыми свойствами с использованием зон усиления из Al-Li листов увеличенной толщины (таблица 4.19). Исходя из конструктивных и технологических особенностей обшивки крыла, подобраны толщины внешних листов (1,0-1,8 мм) с учетом постановки крепежа, требующего определенные утолщения в зависимости от высоты закладных головок заклепок.

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

Таблица 4.19 – Сравнительные прочностные экспериментальные и расчетные механические характеристики при растяжении образцов из слоистых алюмостеклопластиков

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

1 Примечание – Приведены значения плотности СИАЛ по экспериментальным данным

Показано хорошее соответствие расчетных механических характеристик, полученных с помощью аналитической математической

модели, и экспериментальных данных по результатам испытаний образцов из слоистых материалов со сходимостью 85-90 % (см. таблицы 4.18, 4.19).

Для замены монолитных алюминиевых конструкционных листов в обшивках фюзеляжа самолетов по заказу компании «Airbus» был разработан слоистый металлополимерный материал 1441-GLARE на базе листов толщиной 0,35 мм из российского сплава 1441Т11 и проведен комплекс исследований образцов из панелей слоистого материала 1441-GLARE (толщиной ≈1,70 мм, длиной 2,5 м) пятислойной (3/2) перекрестной (0/90) структуры со слоями однонаправленного препрега со стекловолокнами S2 (E = 85 ГПа, σ_B = 4800 МПа).

Показано, что применение в структуре 1441-GLARE (d=2350 кг/м^3, E=62,0 ГПа) листов из Al-Li сплава 1441, по сравнению со стандартными GLARE (d=2480 кг/м^3, E=56,4 ГПа) на базе листов из традиционного сплава 2024Т3 (российский аналог Д16Т), обеспечило повышение весовой эффективности и жесткости конструкций за счет повышенного модуля упругости (E=78-79 ГПа) и пониженной плотности (d=2590 кг/м^3) сплава 1441.

Выводы по главе 4

1. Разработана и подтверждена экспериментальными данными на стандартных образцах математическая модель для прогнозирования механических характеристик алюмостеклопластиков и проведения предварительных расчетов при проектировании гибридных конструкций, учитывающая межслойные внутренние остаточные напряжения, возникающие в процессе формования алюмостеклопластиков. Показано хорошее соответствие результатов расчетов и экспериментальных данных со сходимостью 85-90 %.

2. Уточнен химический состав комбинированного электролита для анодирования поверхности листов из Al-Li сплавов, не содержащий

токсичные соединения Cr^{6+}, обеспечивающий повышенные адгезионные и прочностные характеристики в клеевых соединениях слоистых алюмостеклопластиков за счет получения анодного слоя с более развитым рельефом.

3. Обосновано соотношение компонентов в рамках марочной рецептуры клеевого связующего на основе смеси эпоксидных олигомеров (дианового хлорсодержащего и азотосодержащего) полисульфона и отвердителя ароматического типа, обеспечивающее в интервале температур 90-120 °С оптимальные значения динамической вязкости и высокие адгезионные характеристики соединений стеклопластика с металлическими поверхностями, что позволило исключить нанесение дополнительного промежуточного клеевого слоя.

4. Разработаны технологические режимы изготовления слоистых алюмостеклопластиков с использованием листов алюминий-литиевого сплава 1441 и стеклопластиков, имеющих значительные преимущества перед традиционными монолитными сплавами по плотности, прочностным характеристикам и технологичности при автоклавном формообразовании деталей самолетных конструкций. Разработанные технологии позволяют изготавливать элементы и детали гибридной конструкции за один технологический цикл с дальнейшей минимальной механической обработкой – фрезерованием по контуру.

5. Разработаны методы сращивания металлических листов в слоистом материале СИАЛ, позволяющие изготавливать детали и элементы деталей требуемых габаритов.

6. Разработаны алюмостеклопластики различной структуры, состава, геометрических параметров с варьируемыми физико-механическими свойствами для дальнейших исследований.

Глава 5 Исследование структуры и свойств алюмостеклопластиков

5.1 Механические характеристики при растяжении, сжатии и межслоевом сдвиге алюмостеклопластиков

Механические характеристики при растяжении и сжатии

Механические характеристики при растяжении и сжатии определяли на образцах алюмостеклопластиков с различной структурой и схемой армирования.

Типовые диаграммы «напряжение - деформация» для случая одноосного растяжения образцов алюмостеклопластика в сравнении с образцами из монолитного алюминиевого сплава 1163 и стеклопластика приведены на рисунке 5.1. Механические свойства СИАЛ определяются совместной работой слоев (алюминиевых листов и слоев стеклопластика), входящих в состав слоистого материала.

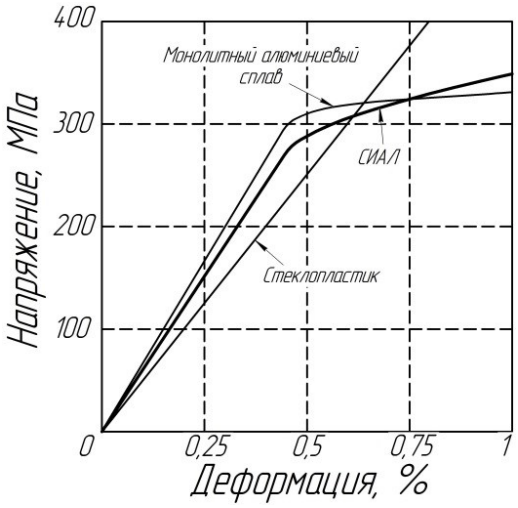
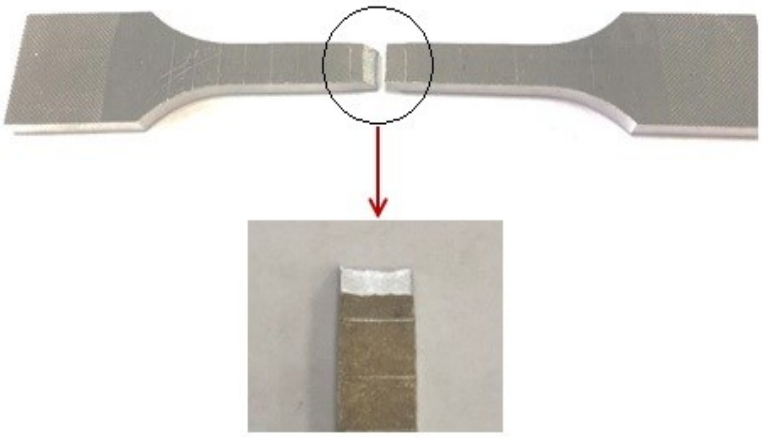


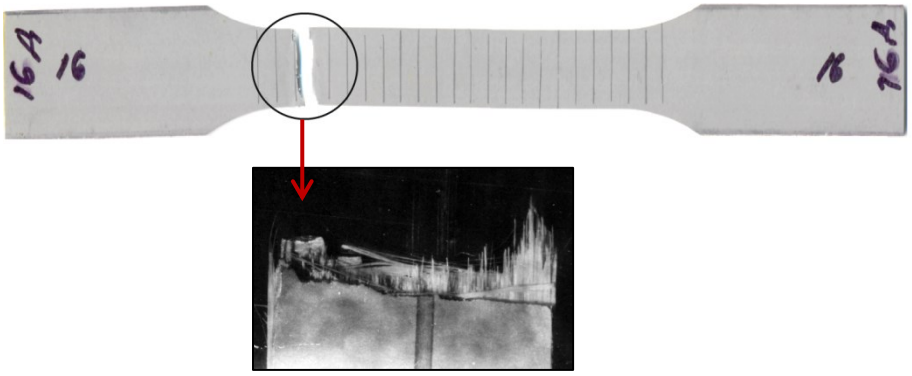
Рисунок 5.1 – Типовые диаграммы растяжения алюмостеклопластика, монолитного алюминиевого сплава 1163 и стеклопластика

Разрушение при растяжении образцов из СИАЛ и листа происходит практически перпендикулярно направлению приложения нагрузки

(рисунок 5.2, а, б). Однако в отличие от типичного характера разрушения алюминиевых листов – под углом ~ 45° в поперечном сечении образца с образованием шейки (рисунок 5.2, а), разрушение образцов из СИАЛ происходит в переходных зонах концентраторов напряжений послойно, как правило, с небольшим смещением поверхности разрушения в слоях алюмостеклопластика по толщине материала (рисунок 5.2, б).



а



б

Рисунок 5.2 – Характер разрушения образцов после испытаний на растяжение: а – образец из листа сплава 1163, б – образец из СИАЛ

Для исследования влияния схемы укладки слоев стеклонаполнителя в стеклопластике и направления проката в металлических листах на анизотропию механических свойств СИАЛ были проведены испытания на растяжение образцов алюмостеклопластиков на основе алюминий-литиевого

сплава 1441Т12 и стеклопластиков, имеющих пятислойные структуры (3/2): однонаправленную (СИАЛ-1-1Р) и равнопрочную (СИАЛ-3-1Р). Результаты испытаний представлены в таблице 5.1. Для сравнения в таблице также приведены характеристики алюминиевого сплава 1163Т толщиной 1,5 мм, широко используемого в самолетных конструкциях.

Таблица 5.1 - Механические свойства при растяжении СИАЛ с различной схемой армирования стеклопластика и листа из сплава 1163Т

Наименование материала	Направление вырезки образца	Временное сопротивление σв, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Модуль упругости Е, ГПа
СИАЛ-1-1Р	Д	1030±45	335±10	4,5±0,5	71,0±1,0
	П	278±2	257±2	4,4±0,2	58,0±0,1
СИАЛ-3-1Р	Д	605±5	267±2	4,2±0,2	66,1±0,1
	П	595±3	265±2	4,1±0,2	65,2±0,2
1163Т	П	≥ 405	≥ 265	≥ 13,0	70,0

Из таблицы следует, что при однонаправленной ориентации армирующих волокон (СИАЛ-1-1Р) наблюдается существенная анизотропия, особенно временного сопротивления. В случае равнопрочного армирования в СИАЛ-3-1Р механические свойства в продольном и поперечном направлениях близки между собой.

Данные выводы хорошо согласуются с теоретическими представлениями о формировании прочностных характеристик слоистых алюмостеклопластиков. При выборе структуры СИАЛ для использования в конструкциях, работающих преимущественно в условиях преобладающих однонаправленных или разнонаправленных нагрузок, необходимо учитывать особенности формирования анизотропии свойств в зависимости от схемы армирования.

Также были проведены испытания на сжатие и отслаивание. Результаты представлены в таблице 5.2. За прочность клеевого соединения принималась средняя величина нагрузки (P), вызывающая отслаивание (гибкого элемента от жесткого) и отнесенная к ширине (w) образца: $S_{отсл} = P/w$.

Таблица 5.2 – Механические свойства СИАЛ при проведении испытаний на сжатие и отслаивание

Наименование материала	Предел текучести $\sigma_{-0,2}$, МПа	Модуль упругости $E_{сж}$, ГПа	Прочность при отслаивании $S_{отсл}$, кН/м
СИАЛ-1-1Р	355±10	69,0±0,5	4,4±0,4
СИАЛ-3-1Р	307±7	66,2±0,2	4,2±0,7

Для исследования влияния типа стеклонаполнителя в клеевых препрегах и объемной доли металлических листов на механические свойства слоистых алюмостеклопластиков, изготовленных из листов сплава 1441 и стеклопластиков с использованием стеклоткани и стеклоровинга, были проведены испытания на растяжение однонаправленных и равнопрочных структур СИАЛ (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Механические свойства СИАЛ в зависимости от типа стеклонаполнителя в препреге и объемной доли листов из сплава 1441

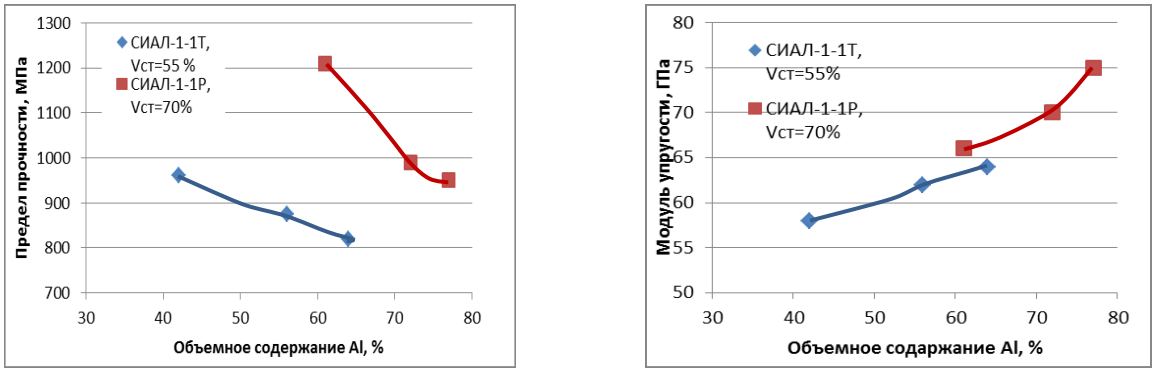
Тип алюмостекло-пластика	Стеклона-полнитель в препреге	Объемная доля металлической составляющей в композиции V_{Me} %	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	E, ГПа
СИАЛ-1-1	Ткань	42	960	335	4,2	68
		64	820	360	4,4	70
	Ровинг	61	1210	250	4,5	66
		70	950	280	4,7	75
СИАЛ-3-1	Ткань	50	740	307	3,5	58
		63	700	315	3,6	64
	Ровинг	62	910	320	3,7	63
		73	830	370	3,8	72

Варьирование объёмной доли металлического компонента реализовывалось за счет применения различного клеевого препрега (толщина стеклопластика с двумя слоями клеевого препрега на тканевой основе около 0,37 мм, на основе ровинга – примерно 0,22 мм) и различной толщины листов из сплава 1441.

Оценены механические свойства при растяжении образцов однонаправленных алюмостеклопластиков СИАЛ-1-1Р и СИАЛ-1-1 с различным объемным соотношением металл-стеклопластик и различным наполнением стеклопластика армирующими стекловолокнами – объемная доля стеклонаполнителя в стеклопластике (Vст): стеклоровинга – 70 %, стеклоткани – 55 % (рисунок 5.3). Показано, что чем выше содержание металлической составляющей в алюмостеклопластике, тем ниже временное сопротивление разрыву и выше модуль упругости:

- СИАЛ-1-1 (42 % об. листов сплава 1441) – σ_B = 960 МПа и E = 58 ГПа, а для СИАЛ-1-1 (64 % об. листов сплава 1441) – σ_B = 820 МПа и E = 64 ГПа;

- СИАЛ-1-1Р (61 % об. листов сплава 1441) – σ_B = 1210 МПа и E = 66 ГПа, а для СИАЛ-1-1Р (70 % об. листов сплава 1441) – σ_B = 950 МПа и E = 75 ГПа.



а б

Рисунок 5.3 – Изменение временного сопротивления разрыву (а) и модуля упругости (б) в зависимости от объемного содержания металлической составляющей в структуре СИАЛ

Использование ровинга при формировании алюмостеклопластика позволяет получать более высокий уровень механических свойств, по сравнению с тканевыми препрегами, за счет более плотной укладки стекловолокон в клеевых препрегах [190, 191]. В результате проведенных исследований отмечены следующие зависимости при конструировании слоистых алюмостеклопластиков с требуемым уровнем механических свойств при растяжении и при сжатии:

- временное сопротивление алюмостеклопластика в направлении армирования зависит от временного сопротивления при растяжении стекловолокна ($\sigma_B \sim 2000$ МПа), также свой вклад вносят листы из алюминий-литиевых сплавов ($\sigma_B \sim 440$ МПа) в соответствии с объемной долей (количеством и толщиной слоев). Значения σ_B для перекрестно-армированных структур СИАЛ достигают 600-700 МПа в обоих направлениях, для однонаправленных структур – 1000-1200 МПа в продольном направлении.

- предел текучести алюмостеклопластика зависит, в основном, от предела текучести металлических листов. При этом значения $\sigma_{0,2}$ в продольном направлении составили 335 МПа, в поперечном направлении - 257 МПа.

- относительное удлинение СИАЛ ограничивается удлинением стекловолокна ($\delta_{ст} = 3,0$ %) и не превышает значений $\delta = 4,1$-$4,7$ %.

- модуль упругости у алюмостеклопластиков зависит от схемы армирования СИАЛ, а также от объемного содержания металла в структуре слоистой композиции. При увеличении в структуре объемной доли металлических листов модули упругости при растяжении и сжатии повышаются до значений $E \sim 66$-70 ГПа, $E_{сж} \sim 68$-71 ГПа.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические расчеты, проведенные в предыдущих разделах данной работы (см. главу 4.1), соответствие составляет 85-90 %.

Для оценки влияния температур на прочностные характеристики алюмостеклопластиков проведены испытания образцов из материала СИАЛ-3-1Р (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Влияние температуры испытаний на механические свойства при растяжении образцов из материала СИАЛ-3-1Р

Характеристика	Температура испытаний, °С				
	низкая	нормальная	высокая		
	-70	20	85	125	140
Временное сопротивление σ_B, МПа	605±5	605±5	602±3	587±2	540±5
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	270±5	267±2	265±2	258±2	235±5
Относительное удлинение δ, %	3,9±0,2	4,1±0,2	4,2±0,1	4,1±0,1	4,3±0,1
Модуль упругости Е, ГПа	66,0±0,1	66,3±0,2	66,1±0,2	65,4±0,3	-

Повышение температуры испытаний от 20 °С до 140 °С приводит к снижению прочностных свойств на величину до 60 МПа, при температуре 125 °С снижение прочностных свойств составляет до 20 МПа. При изменении температуры в интервале от минус 70 °С до 85 °С прочностные свойства СИАЛ практически не изменяются. Отмечается незначительное снижение пластичности алюмостеклопластика при отрицательной температуре по сравнению с температурами в интервале 20-140 °С.

Влияние периодических эксплуатационных нагревов материалов в конструкции оценивали на образцах СИАЛ-3-1Р после воздействия длительных нагревов с последующим испытанием при температуре 20 °С (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Механические свойства СИАЛ-3-1Р при комнатной температуре после воздействия длительных нагревов

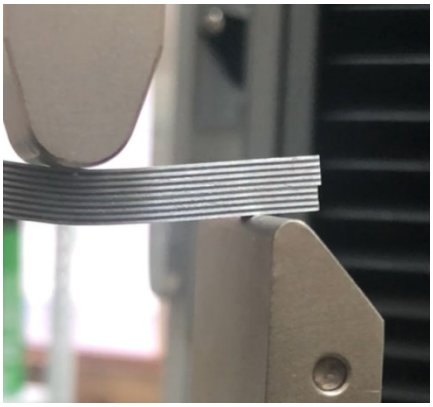
Характеристика	Исходные значения без нагревов	Режим нагрева			
		85 °С		125 °С	
		500 ч	1000 ч	500 ч	1000 ч
Временное сопротивление σ_B, МПа	605±5	605±5	602±5	594±5	596±5
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	267±5	272±5	273±5	274±5	282±5
Относительное удлинение δ, %	4,1±0,2	4,3±0,1	4,6±0,1	4,2±0,1	4,7±0,1
Модуль упругости E, ГПа	66,1±0,2	66,1±0,2	66,3±0,2	66,3±0,2	66,7±0,2

Полученные механические характеристики алюмостеклопластика после длительных нагревов при 85 °С и 125 °С в течение 500 и 1000 часов практически сохраняют свои исходные значения.

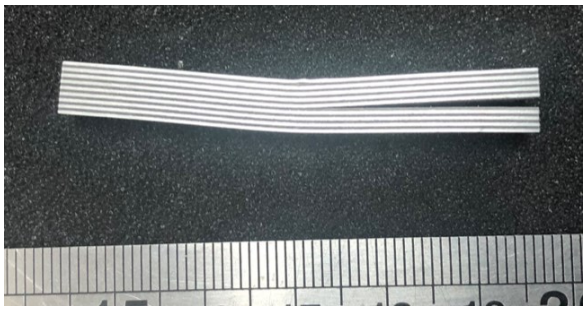
Межслоевой сдвиг

По результатам испытаний для определения предела прочности при межслоевом сдвиге по методу короткой балки образцов из алюмостеклопластиков структуры 9/8 с однонаправленной схемой армирования слоев стеклопластика было установлено, что межслоевой сдвиг реализуется в образцах с соотношением длины к толщине образца ≤ 7-8. В процессе испытаний на боковых торцах всех образцов длиной 20-170 мм наблюдался характерный механизм разрушения (рисунок 5.4, а), однако, после снятия нагрузки межслоевые трещины были хорошо различимы только в образцах с соотношением длины к толщине образца ≥ 6 (рисунок 5.4, б). Для образцов с соотношением длины к толщине образца ≥ 10 механизм разрушения изменялся: происходили отслоение и потеря устойчивости металлического слоя в сжатой области образца вблизи опоры (рисунок 5.4, в). Для очень коротких образцов (с соотношением длины к

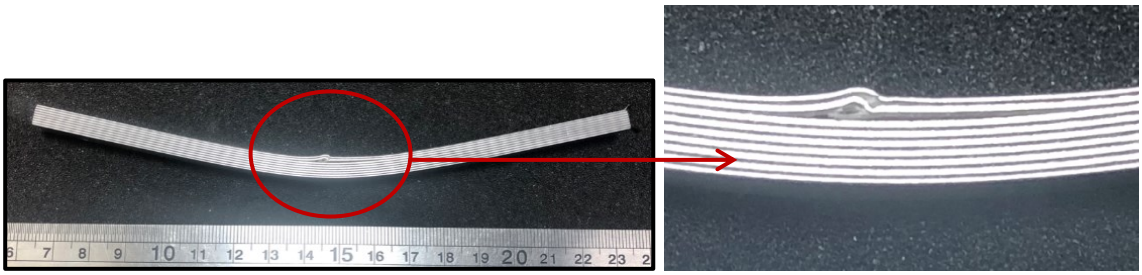
толщине образца ≤ 4) происходило смятие образцов, то есть реализовывался механизм разрушения с большими поперечными деформациями («индентирование»).



а



б



в

Рисунок 5.4 – Межслоевой сдвиг в образцах СИАЛ:
а – смещение слоев в торцевой зоне образца; б, в – характер разрушения образцов с различным соотношением длины к толщине

Характерный вид полученных диаграмм «нагрузка-перемещение» для образцов СИАЛ представлен на рисунке 5.5. При нагрузке выше 1000 Н диаграмма становится нелинейной, что объясняется возникновением пластических деформаций в слоях алюминия. При разрушении и возникновении межслоевой трещины происходит резкое падение нагрузки, что объясняется снижением изгибной жесткости образца [192, 193].

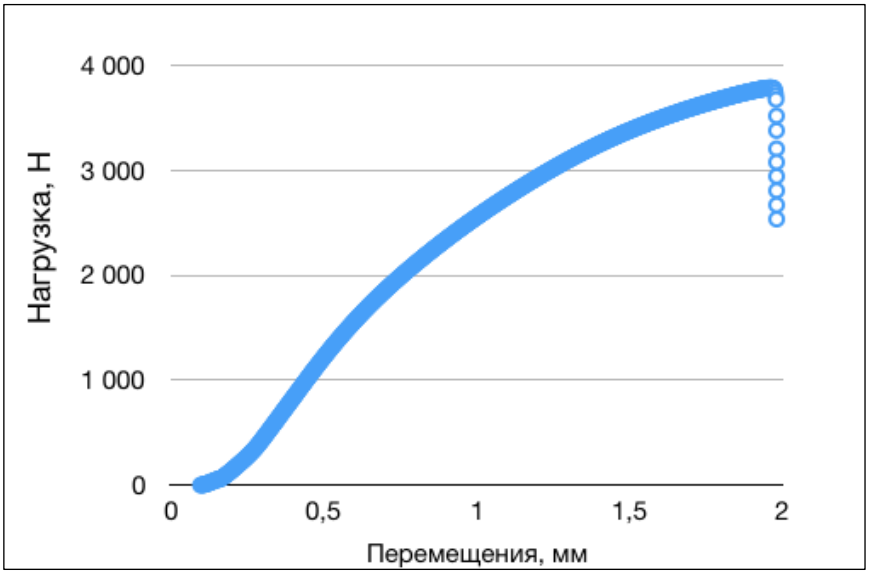


Рисунок 5.5 – Диаграмма «нагрузка-перемещение», полученная при испытаниях образца СИАЛ на трехточечный изгиб

Полученная при испытаниях зависимость разрушающей нагрузки от расстояния между опорами представлена на рисунке 5.6. Здесь точками показаны экспериментальные данные, а линиями – теоретическая аппроксимация по соотношениям, приведенным ниже. Из полученных результатов следует, что несущая способность образца снижается при увеличении расстояния между опорами, что качественно соответствует классическим решениям из теории сопротивления материалов. В частности, снижение разрушающей нагрузки может быть объяснено в предположении, что существует некоторая критическая величина сжимающих напряжений $\bar{\sigma}$, приводящая к отслоению верхнего металлического слоя (см. рисунок 5.4, в). Уровень напряжений в этом слое из-за его малой толщины можно считать постоянным и рассчитывать по классической балочной теории. В момент разрушения образца мы имеем равенство:

$$\frac{3LP_{\max}}{2bh^2} = \bar{\sigma} \qquad (1)$$

откуда следует оценка для максимальной нагрузки:

$$P_{\max} = \bar{\sigma}\frac{2bh^2}{3L} \qquad (2)$$

где все величины являются известными, кроме критических напряжений, величина которых была подобрана для описания имеющихся экспериментальных данных $\bar{\sigma} = 1020$ МПа.

Записанная оценка (2) является качественной и приближенной, однако, она показывает, что максимальная нагрузка при трехточечном изгибе обратно пропорциональна расстоянию между опорами при испытаниях образца $P_{\max} \sim \left(L/h\right)^{-1}$ для соотношения длины к толщине образца больше 10, и эта зависимость подтверждается экспериментом (рисунок 5.6). Для меньших значений соотношения длины к толщине образца этот закон не работает, т.к. зависимость становится иной – механизм разрушения изменяется на межслоевой сдвиг по центру образца (см. рисунок 5.4, а). При трехточечном изгибе перерезывающая сила постоянна справа и слева от приложенной нагрузки и, следовательно, касательные напряжения не изменяются вдоль длины образца из слоистого материала и не зависят от расстояния между опорами.

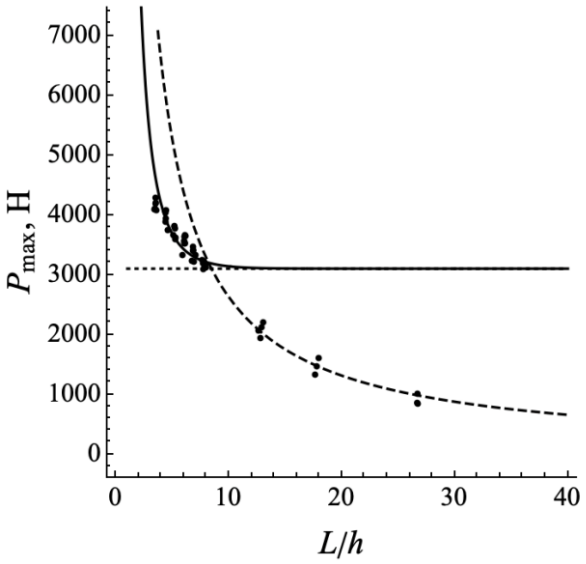


Рисунок 5.6 – Зависимость разрушающей нагрузки при изгибе от относительного расстояния между опорами, нормированного на толщину образца

Для описания полученной зависимости и для оценки истинной межслоевой прочности предлагается использовать модифицированное решение задачи о трехточечном изгибе применительно к слоистому материалу, которое может быть получено в рамках градиентной теории упругости [192, 193]. Эта зависимость определяется следующим соотношением:

$$P_{\max} = \frac{4}{3} bh \frac{\tau_0}{1 - 1/\mathrm{ch}\left(L/(4d)\right)} \qquad (3)$$

где τ_0 – это истинная межслоевая прочность, а параметр d является масштабным параметром задачи, имеет размерность длины, его значение должно коррелировать с диаметром опор, которые применяются в испытаниях, в частности, для очень тонких опор ($d \sim 0$) это решение (3) выходит на классическое решение (1).

Для описания экспериментальных данных были подобраны значения указанных параметров решения (3) и они составили:

истинная межслоевая прочность – τ_0 = 60,4 МПа,

масштабный параметр – d = 2,7 мм (то есть, приблизительно, радиус нижних опор, в зоне которых и происходит разрушение).

Полученная зависимость представлена на рисунке 5.6 сплошной линией. Видно, что в случае коротких образцов и механизма разрушения по межслоевому сдвигу, решение (3) лучше описывает экспериментальные данные, по сравнению с решением (2), а также, очевидно, и по сравнению с классическим решением, которое требует независимости несущей нагрузки от расстояния между опорами при межслоевом сдвиге. Нагрузка, соответствующая постоянной (истинной) межслоевой прочности 60,4 МПа показана горизонтальной пунктирной линией на рисунке 5.6.

Зависимость межслоевой прочности от расстояния между опорами может быть получена комбинацией формул (1) и (3) в следующем виде:

$$\overline{\tau} = \frac{\tau_0}{1 - 1/\mathrm{ch}\left(L/(4d)\right)} \qquad (4)$$

Эта зависимость представлена на рисунке 5.6 (сплошная линия). Точками на этом рисунке показаны экспериментальные данные, полученные путем обработки результатов испытаний с использованием формулы (1). Горизонтальный пунктир – вычисленная истинная межслоевая прочность. Отклонение соотношения (3) от эксперимента для самых коротких образцов может быть связано с изменением механизма их разрушения. Как было сказано, в таких образцах при разрушении возникают большие поперечные неупругие деформации.

Предложенная схема проведения испытаний образцов СИАЛ на межслоевой сдвиг по методу короткой балки позволила определить расчетную межслоевую прочность образцов многослойного СИАЛ, которая является важным критерием прочности композиционных материалов при проектировании конструкций из материала СИАЛ [194, 195].

5.2 Исследование влияния структуры алюмостеклопластиков на характеристики трещиностойкости и изучение характера разрушения алюмостеклопластиков в зависимости от условий нагружения

Проведено исследование скорости роста трещины усталости СРТУ алюмостеклопластиков на стандартных образцах. Развитие трещины в поверхностных листах из алюминий-литиевых сплавов, образующих внешние слои алюмостеклопластика, фиксировали с помощью лупы. Вид разрушения продольного образца показан на рисунке 5.7.

Рисунок 5.7 – Вид образца из СИАЛ после испытаний на СРТУ

С учетом особенностей слоистой структуры алюмостеклопластиков при последовательном сочетании в пакете листов из алюминий-литиевых сплавов и слоев стеклопластика при испытаниях образцов СИАЛ разрушение начиналось от исскуственно-сделанного концентратора напряжений (надреза в отверстии), трещина развивалась на внешних поверхностях металлических листов перпендикулярно направлению приложения нагрузки, симметрично относительно отверстия в образце.

При появлении трещины были зафиксированы местные расслоения вдоль линии соединения внешних металлических листов и стеклопластика в направлении роста трещины с последующим послойным торможением роста трещины в слоях стеклопластика, что препятствовало лавинообразному разрушению слоистого материала [148, 196, 197].

Характер поведения упрочняющих волокон (разрывы, вытягивание из матрицы, неравномерность разрушения по сечению) в процессе роста трещины в образцах позволяет сделать вывод, что это является характерным признаком торможения роста трещины, в том числе и последовательных межслойных расслоений, перпендикулярных приложенной силе [198, 199].

Процесс развития трещины проходил по двум направлениям:

- перпендикулярно приложенной силе от концентратора напряжений с расслоениями вдоль поверхности границы раздела металлических листов со стеклопластиком;

- послойное разрушение по направлению приложенной силы с межслойными расслоениями.

Для оценки состояния волокон после испытаний на СРТУ при длине усталостной трещины $l_{тр} \sim 0{,}5 \cdot B$ проводили снятие внешнего металлического слоя в образцах СИАЛ методом травления в щелочном 20 %-ном растворе NaOH (рисунок 5.8).

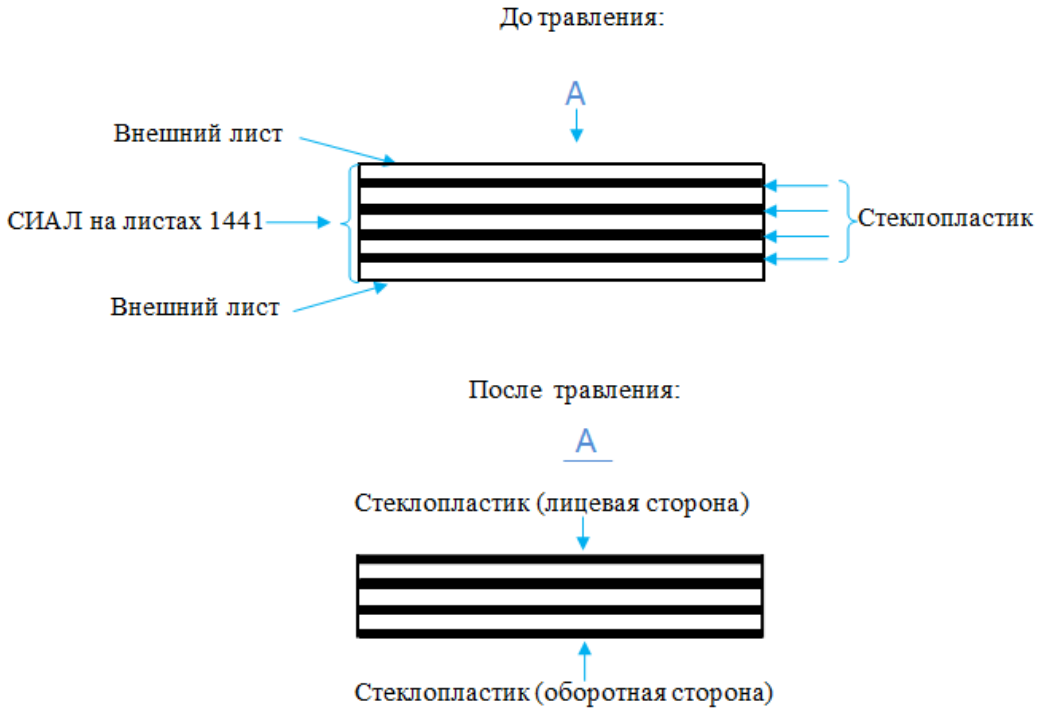


Рисунок 5.8 – Схема удаления травлением внешних слоев в образце СИАЛ

На рисунке 5.9 показано состояние слоев стеклопластика – зон отслаивания от листов из алюминий-литиевого сплава в процессе усталостных испытаний образца. Границы отслаивания внешнего металлического листа от стеклопластика соответствуют длине трещины в листах из алюминий-литиевого спалава. Отслоения ограничиваются зоной треугольной конфигурации, препятствующей лавинообразному разрушению материала.

Показано, что снижение скорости роста трещины усталости в слоистых материалах СИАЛ по сравнению с листами из сплавов Д16 и 1163 обусловлено изменением траектории развития трещин в слоях

стеклопластика, служащих стопперами роста трещин, развивающихся от концентраторов напряжений – отверстий в образцах (рисунок 5.10).

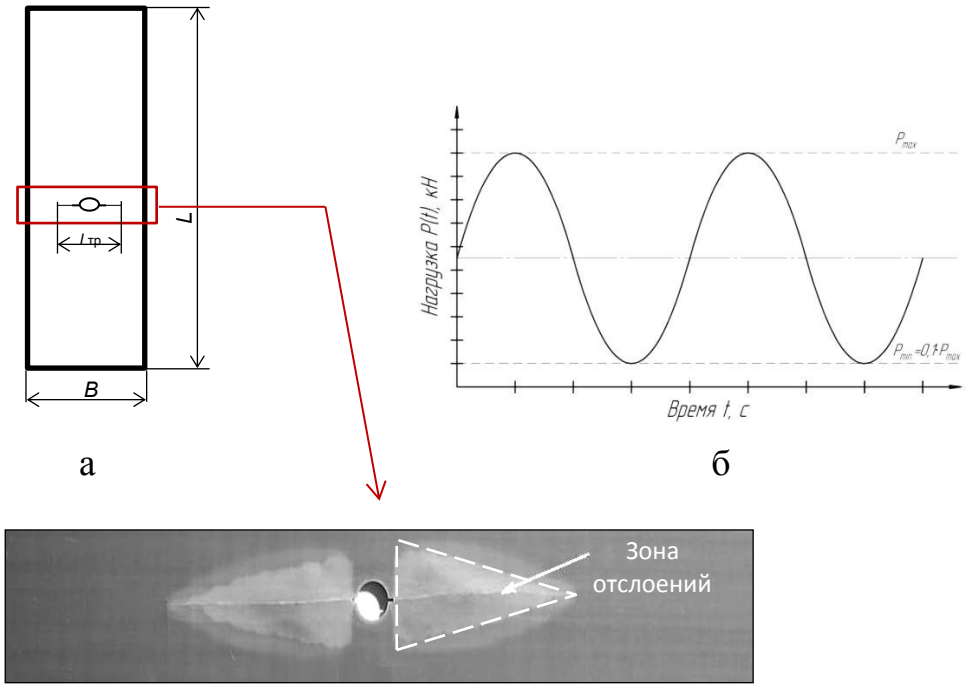


Рисунок 5.9 – Характер отслоений в слоях СИАЛ при испытаниях на трещиностойкость: а – образец для испытаний на СРТУ; б – диаграмма нагружения при испытаниях на СРТУ; в – межслойные отслоения в зоне контакта металл-стеклопластик от концентратора напряжений

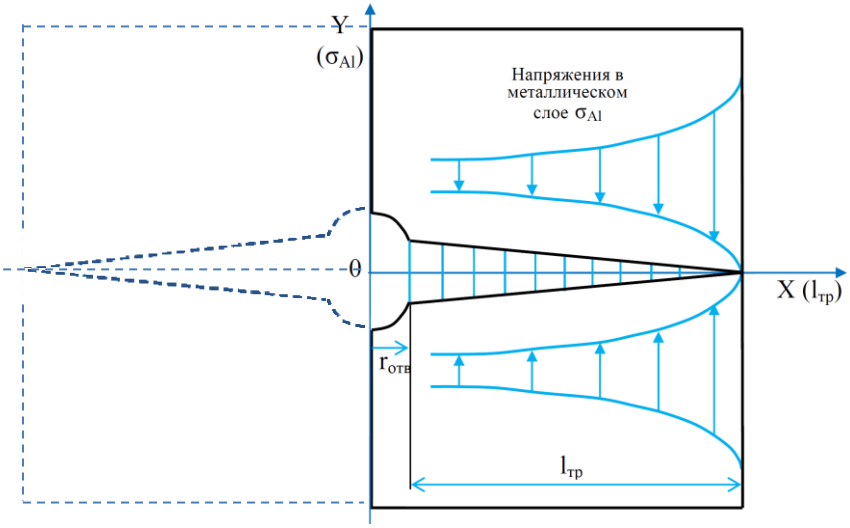


Рисунок 5.10 – Распределение расчетных напряжений в области концентратора напряжений в образце из слоистого материала при испытаниях на СРТУ [200]

Характер зависимости скорости роста трещины dl/dN алюмостеклопластиков при испытаниях от коэффициента интенсивности напряжений ΔK, который определен при длине трещины, измеренной на внешних металлических листах в СИАЛ, представлен на рисунке 5.11.

При испытаниях на СРТУ начало зарождения трещин на внешних металлических листах происходит в алюмостеклопластиках раньше, чем в монолитных алюминиевых листах – на стадии 20-30 % от числа циклов до полного разрушения образцов, с последующим замедлением роста трещины [201, 202].

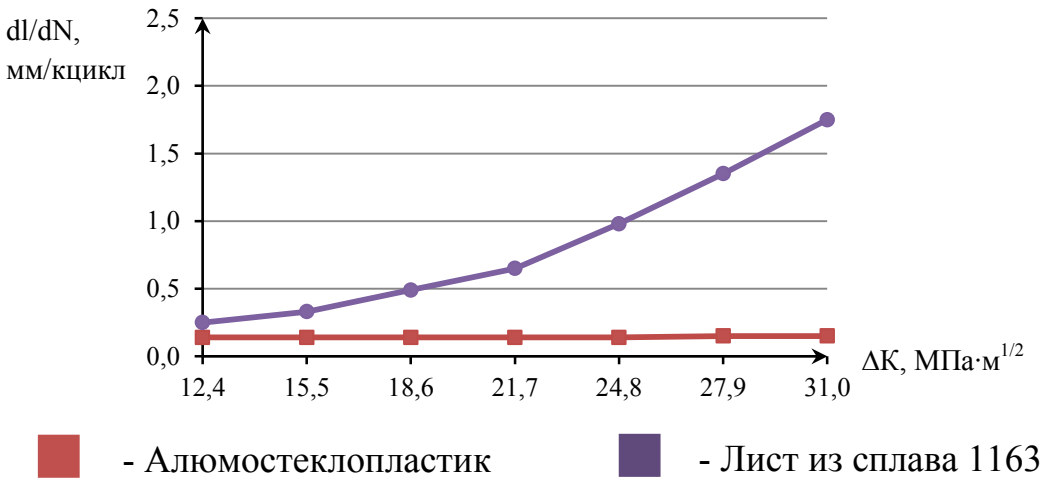


Рисунок 5.11 – Скорость роста трещины усталости в алюмостеклопластике и монолитном листе из сплава 1163 [201]

Установлено, что длина трещины усталости при одинаковом числе циклов нагружения, и, следовательно, скорость роста усталостной трещины обратно пропорциональны количеству слоев в структуре слоистых материалов (рисунок 5.12).

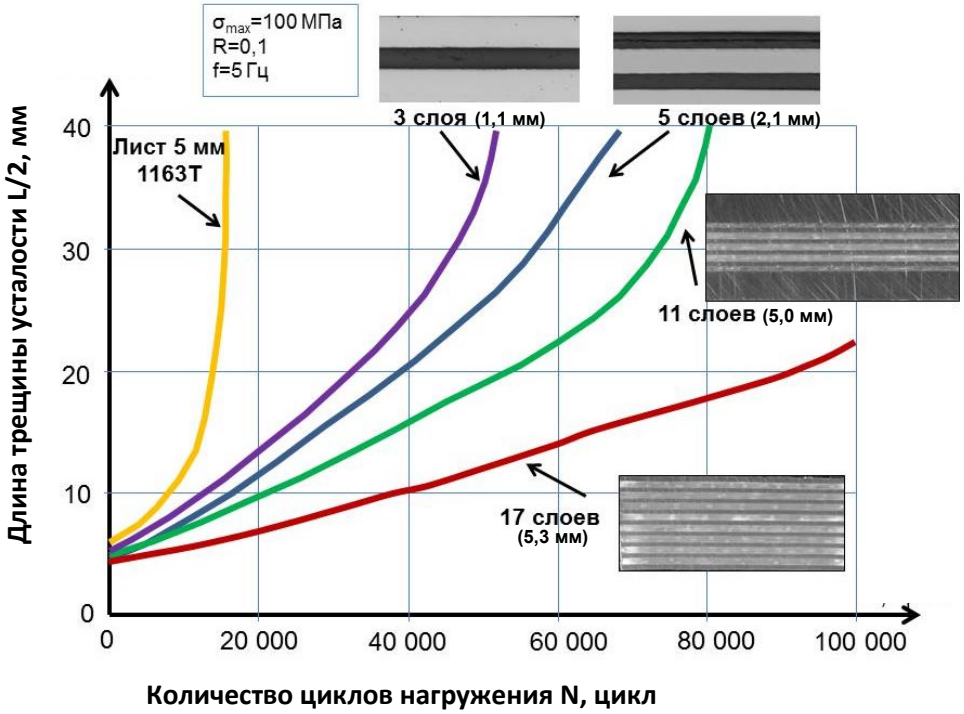


Рисунок 5.12 – Кривые роста трещины усталости в алюмостеклопластиках толщиной до 5,3 мм с различным количеством слоев и в монолитном листе из сплава 1163 [203]

Таким образом, скорость роста трещины усталости в слоистых алюмостеклопластиках меньше (более чем в 10 раз при ΔК=31 МПа·м$^{1/2}$) по сравнению с СРТУ в монолитных полуфабрикатах из алюминиевых сплавов Д16 и 1163. Начало зарождения трещин в наружных листах алюмостеклопластика происходит раньше, чем в монолитных алюминиевых листах, с дальнейшим послойным разрушением при существенном замедлении скорости развития трещин, обусловленным изменением их траектории в слоях стеклопластика.

5.3 Исследование влияния структуры алюмостеклопластиков на их усталостную долговечность

Одним из показателей надежности конструкции является характеристика усталостной долговечности материалов.

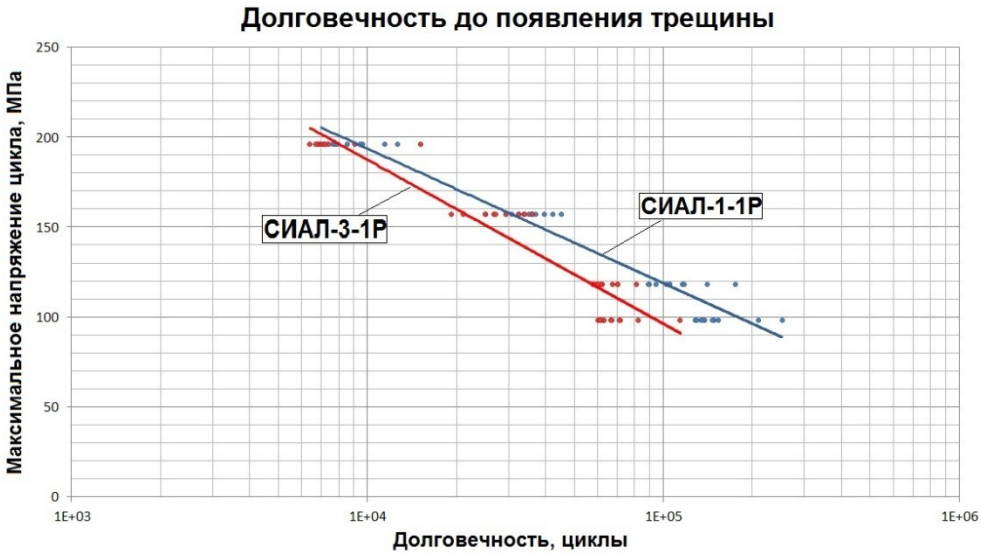
Представленные результаты усталостных испытаний показывают, что долговечность образцов алюмостеклопластиков зависит от укладки слоев стеклопластика, схем их армирования и уровня нагружения (таблица 5.6, рисунок 5.13). Значения малоцикловой усталости, полученные при испытаниях образцов СИАЛ-1-1Р с однонаправленной схемой армирования стеклопластика и образцов СИАЛ-3-1Р с перекрестным армированием стеклопластика (при продольном нагружении с $\sigma_{мах}$=157 МПа), показывают, что значения малоцикловой усталости при однонаправленной схеме армирования ($N_{ср}$=147 000 циклов) превосходят значения малоцикловой усталости при перекрестной схеме армирования ($N_{ср}$=134 650 циклов), что подтверждает возможность управления характеристиками МЦУ при проектировании конструкции путем оптимального выбора укладок (схем) армирования с учетом необходимых характеристик детали. Преимуществом перекрестной структуры СИАЛ-3-1Р является работа материала в двухосном напряженном состоянии.

В области меньших нагрузок (98 и 118 МПа), характерных для обшивок фюзеляжа, зафиксирована бóльшая разница по характеристикам МЦУ. При высоком напряжении цикла нагружения разница по долговечности уменьшается в зависимости от схемы армирования СИАЛ.

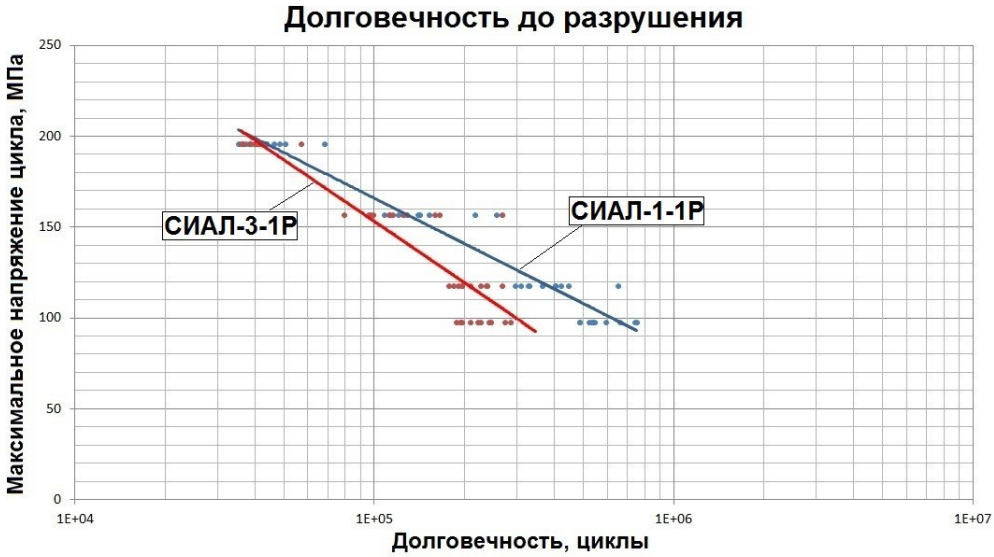
Характер разрушения образца при испытаниях на МЦУ из слоистого материала с расположением волокна по направлению приложения нагрузки представлен на рисунке 5.14.

Таблица 5.6 – Результаты испытаний на МЦУ продольных образцов СИАЛ на основе листов 1441

СИАЛ	Напряжение, МПа	Кол-во обр.	Размах варьирования X_{min}–X_{max}	Среднее значение $\overline{X}$	$\overline{X}$ lgN	$\overline{X}$ по lgN	Дисперсия, s^2 lgN	СКО, s lgN	Коэффициент вариации V lgN, %	$\overline{X}$ lg $_{0,9}$	$\overline{X}_{0,9}$ по lgN
СИАЛ-1-1Р армирование 0/0	До появления трещины в наружном алюминий-литиевом листе										
	98	10	128 200-252 400	158 000	5,19	154 140	0,009	0,10	1,87	5,19±0,06	154 140±1,14
	118	10	89 500-176 200	114 000	5,05	111 556	0,009	0,09	1,83	5,5±0,05	111 556±1,13
	157	10	30 900-45 500	36 920	4,56	36 684	0,003	0,05	1,13	4,56±0,03	36 684±1,07
	196	10	6 960-12 650	9 000	3,95	8 846	0,007	0,08	2,12	3,95±0,05	8 846±1,12
	До разрушения образца										
	98	10	483 500-751 900	584 400	5,76	577 270	0,005	0,07	1,23	5,76±0,04	577 270±1,10
	118	10	294 500-652 200	394 500	5,58	384 265	0,010	0,10	1,81	5,58±0.06	384 265±1,14
	157	10	95 700-254 900	147 000	5,15	140 458	0,018	0,13	2,59	5,15±0,08	140 458±1,19
	196	10	35 200-68 300	45 100	4,65	44 326	0,007	0,08	1,78	4,65±0,05	44 326±1,12
СИАЛ-3-1Р армирование 0/90	До появления трещины в наружном алюминий-литиевом листе										
	98	10	60 200-114 300	72 000	4,85	70 671	0,007	0,08	1,73	4,85±0,05	70 671±1,12
	118	10	58 100-81 300	65 000	4,81	64 649	0,002	0,05	0,97	4,81±0,03	64 649±1,06
	157	10	19 300-34 100	26 100	4,41	25 663	0,007	0,08	1,92	4,41±0,05	25 663±1,12
	196	10	6 400-15 200	8 000	3,89	7 726	0,012	0,11	2,86	3,89±0,06	7 726±1,16
	До разрушения образца										
	98	10	188 200-284 700	227 800	5,35	225 670	0,004	0,06	1,17	5,35±0,04	225 670±1,09
	118	10	177 100-267 500	211 800	5,32	210 074	0,003	0,06	1,09	5,32±0,03	210 074±1,08
	157	10	79 200-266 500	144 650	5,10	127 107	0,022	0,15	2,91	5,10±0,09	134 650±1,22
	196	10	35 900-56 800	41 100	4,61	40 774	0,003	0,06	1,21	4,61±0,03	40 774±1,08



а



б

Рисунок 5.13 – Характер зависимости малоцикловой усталости алюмостеклопластиков от схемы армирования слоев стеклопластика: а – долговечность до появления трещины, б – долговечность до разрушения

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

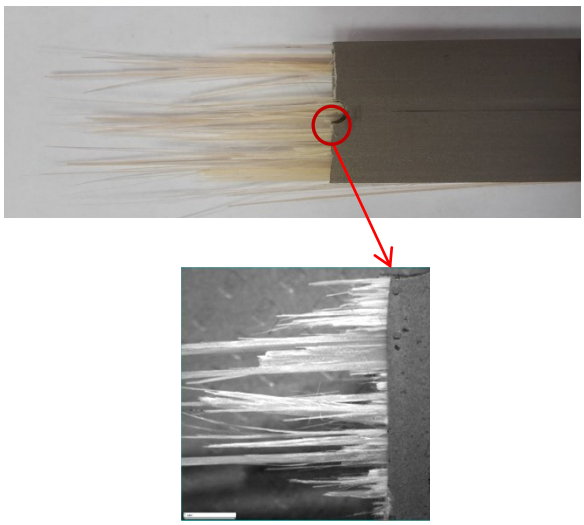


Рисунок 5.14 – Вид разрушения образца из слоистого материала СИАЛ после испытаний на МЦУ

Очаги разрушения образца алюмостеклопластика, расположенные по линии соединения металл-стеклопластик, показаны на рисунке 5.15. Разрушение стеклопластика в продольных образцах характеризуется тем, что при усталостном нагружении трещина появляется от отверстия и развивается послойно в слоях алюмостеклопластика до их окончательного разрушения. Во всех разрушенных образцах СИАЛ наблюдается вытягивание волокон в слое стеклопластика длиной около 20-30 мм, что связано с неравномерностью адгезии между стекловолокном и связующим в слое стеклопластика в СИАЛ.

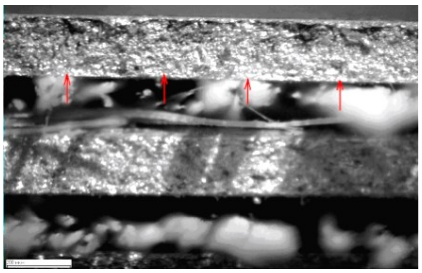


Рисунок 5.15 – Очаги разрушения (указаны стрелками) по границе металл-стеклопластик

Поскольку подавляющее число деталей авиационных конструкций подвергается сборке, отдельного внимания заслуживает исследование усталости различных крепежных соединений. Традиционным способом сборки является клепка. Результаты испытаний образцов на МЦУ различных соединений с помощью клепки приведены в таблице 5.7. Значения характеристик усталостной долговечности заклепочных соединений (СИАЛ-3) + (СИАЛ-3) значительно выше, чем заклепочных соединений с применением монолитных листов.

Таблица 5.7 – Усталостная долговечность заклепочных соединений

Компоненты сборки	N, кцикл
(СИАЛ-3) + (СИАЛ-3)	158±12
(СИАЛ-3) + 1163	56±5
1163 + 1163	51±5

Анализ результатов испытаний показывает, что уровень малоцикловой усталости алюмостеклопластиков находится в зависимости от характера укладки слоев стеклопластика и схем их армирования: на продольных образцах СИАЛ-1-1Р с однонаправленной схемой армирования долговечность выше, чем на образцах СИАЛ-3-1Р с перекрестным армированием. В наибольшей степени указанный эффект проявляется при максимальных напряжениях цикла 98 МПа, 118 МПа, 157 МПа.

5.4 Исследование структуры алюмостеклопластиков

Анализ структуры алюмостеклопластиков позволяет локально оценить состояние слоев материала: толщины слоев стеклопластика и металлических листов, общую толщину пакета, равномерность распределения связующего, отсутствие дефектов.

Структуру исследовали на микрошлифах из алюмостеклопластиков с однонаправленным (СИАЛ-1-1Р) и перекрестным (СИАЛ-3-1) армированием (рисунок 5.16). Показано, что толщина пакета СИАЛ зависит от вида стеклонаполнителя и объемного содержания связующего в слоях стеклопластика и составляет:

- 1,520-1,528 мм для СИАЛ-1-1Р с использованием клеевого препрега со стеклоровингом КМКС-2мР.120.РВМПН.30;

- 1,630-1,635 мм для СИАЛ-3-1 с использованием клеевого препрега со стеклотканью КМКС-2м.120.Т64.37.

В пакете СИАЛ толщины слоев составляют:

- слой стеклопластика с ровингом (из двух слоев клеевого препрега) - 0,266-0,278 мм,

- слой стеклопластика с тканью Т-64 (ВМП) (из двух слоев клеевого препрега) – 0,306-0,316 мм.

- металлический слой (толщина листов из алюминий-литиевого сплава 1441Т12) – 0,242-0,246 мкм.

Процентное содержание клеевого связующего в стеклопластике составляет:

- от 36 до 42 % об. у клеевого препрега со стеклоровингом,

- от 55 до 62 % об. у клеевого препрега со стеклотканью.

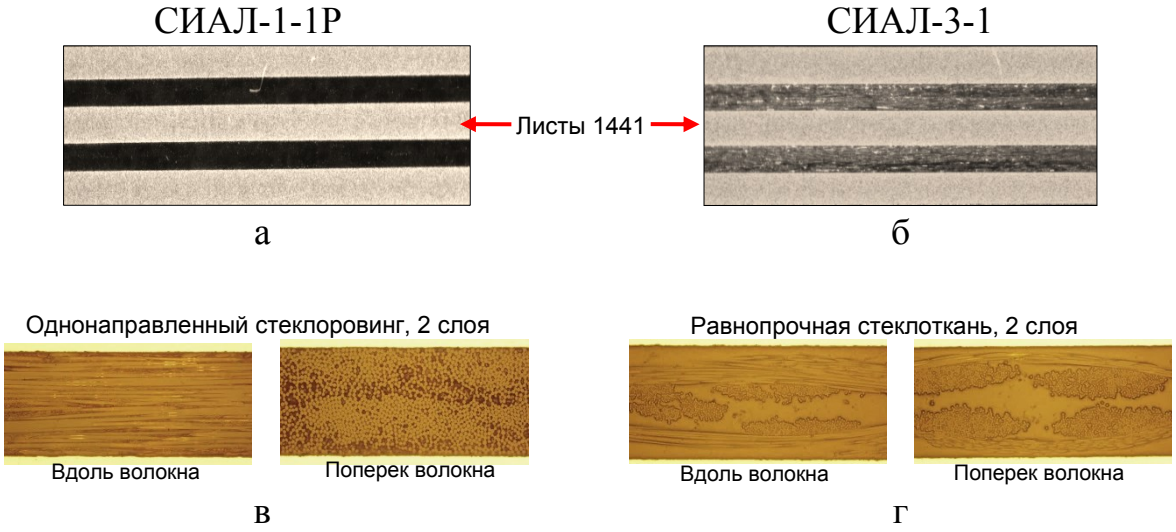


Рисунок 5.16 – Структуры алюмостеклопластиков: а – СИАЛ-1-1Р со стеклоровингом, б – СИАЛ-3-1 со стеклотканью; в, г – слои стеклопластика

По результатам исследования структур из алюмостеклопластиков, изготовленных по разработанным технологическим режимам автоклавного формования, можно сделать вывод:

- в заготовках СИАЛ отсутствуют дефекты (пористость, расслоения в зонах контакта стеклопластика с металлическими слоями);
- обеспечена равномерность толщины материала СИАЛ за счет равномерного распределения клеевого связующего в слоях стеклопластика.

5.5 Оценка стойкости слоистого алюмостеклопластика к ударным нагрузкам

Характерным видом повреждений поверхности деталей самолета в процессе эксплуатации могут быть дефекты ударного происхождения, возникающие при монтажных и ремонтных работах, например, при воздействии падающего инструмента, столкновении конструкции с грузовыми контейнерами и тележками в процессе технического обслуживания самолетов.

Для оценки влияния локальных ударных нагрузках на состояние поверхности материала СИАЛ был выбран способ повреждения образца при ударе свободно падающим грузом с высоты 1 м: средняя скорость соударения с поверхностью образцов СИАЛ, находящихся на жесткой опоре, составляла 5-8 м/с. Использовали наконечник полусферической формы и конический наконечник с закругленной торцевой поверхностью. Вид образцов после испытаний представлен на рисунке 5.17.

Исследование образцов после испытаний показало, что в месте удара наконечниками на поверхности СИАЛ формируются лунки как у монолитного алюминиевого сплава, но несколько меньшей глубины в результате демпфирования удара слоем стеклопластика. Анализ состояния стеклопластика при удаленных фрагментах верхних металлических листов показал, что за счет повышенной пластичности связующего на поверхности стеклопластика не образовалось дефектов (трещин и выкрашиваний).

Как правило, повреждения (углубления) на наружной поверхности образцов из СИАЛ без разрушения поверхностного слоя могут быть зашпаклеваны. В случае образования трещины в верхнем алюминиевом слое без потери сплошности в стеклопластике рекомендуется удалять поврежденный участок алюминий-литиевого листа с заполнением этой зоны клеевой пленкой.

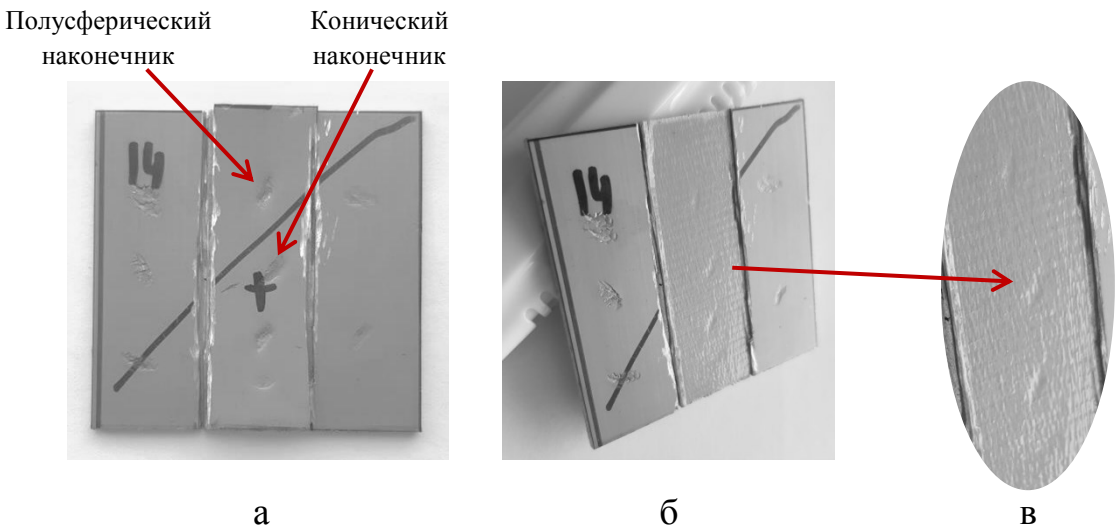


Рисунок 5.17 – Внешний вид образцов после испытаний падающим грузом: а – до снятия верхнего алюминиевого листа; б, в – локальная деформация стеклопластика в зоне удара без видимых трещин

5.6 Исследование огнестойкости, огненепроницаемости, молниестойкости алюмостеклопластиков

5.6.1 Оценка теплофизических характеристик алюмостеклопластиков

Наряду с исследованием прочностных характеристик слоистого материала СИАЛ были проведены работы по сравнительной оценке теплофизических характеристик с целью рассмотрения функциональных возможностей применения СИАЛ в конструкции самолета, такие как огнестойкость и молниестойкость. В таблице 5.8 приведены теплофизические свойства алюмостеклопластика с применением листов из сплава 1441 и стеклопластика с клеевым препрегом КМКС-2мР.120.РВМПН.30.

Таблица 5.8 – Теплофизические характеристики алюмостеклопластика

Характеристики	Температура испытаний, °С						
	-70	-50	0	20	50	100	150
Теплопроводность λ, Вт/(м · К)	1,39	1,50	1,59	1,68	1,71	1,72	1,73
Удельная теплоемкость C_p, Дж/(кг· К)	760	840	940	1020	1100	1240	1340
Температуропроводность $a \cdot 10^{-7}$, $м^2/с$	7,8	7,6	7,2	7,0	6,6	6,0	5,5

Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	–60÷–20 °С	–20÷0 °С	0÷20 °С	20÷50°С	50÷100 °С
	16,5	16,6	16,4	16,6	17,1

Благодаря своим теплофизическим характеристикам слоистый алюмостеклопластик имеет преимущество перед монолитными алюминиевыми листами за счет стойкости слоев из стеклопластика к прогоранию. При высокотемпературном нагреве происходят деструкция, абляция, которые приводят к появлению слоев высокопористого кокса с низкой теплопроводностью, что обеспечивает хорошую тепловую защиту.

5.6.2 Оценка огнестойкости алюмостеклопластиков

Для обеспечения безопасности при эксплуатации авиационной техники в обязательном порядке должны выполняться требования, предъявляемые к пожарной безопасности материалов и типовых конструктивных элементов на их основе. В ряде параграфов Авиационных правил предъявляются требования к огнестойкости или огненепроницаемости материалов в случаях воздействия открытого пламени в различных ситуациях при эксплуатации (наземный пожар от разлива топлива, пожар во внутренних отсеках, пожар в зонах двигателей и др.).

В АП-25 (нормы лётной годности самолётов транспортной категории) требования по огнестойкости (огненепроницаемости) изложены в ряде параграфов раздела D «Проектирование и конструкция» подраздела «Пожарная защита»: 25.859, 25.863, 25.865, 25.867, 25.869 и раздела E

«Силовая установка» подраздел «Пожарная защита силовой установки»: 25.1181, 25.1182, 25.1183, 25.1185, 25.1187, 25.1189, 25.1191, 25.1193, 25.1201. Аналогичные требования имеются и в авиационных правилах АП-23 и АП-33.

Испытания на установке (рисунок 5.18, таблица 5.9) проводили на образцах из листов слоистого алюмостеклопластика трех вариантов структур, отличающихся по количеству слоев алюминиевых листов (от 2 до 4) и слоев стеклопластика с различной ориентацией монослоев (от 2 до 4).

Рисунок 5.18 – Испытательная установка при одностороннем воздействии пламени на образец

Установлено, что при проведении испытаний у всех типов слоистых структур отсутствовало сквозное прогорание образца при воздействии в течение 15 мин открытого пламени с температурой 920 °С, наблюдалось прогорание наружного алюминиевого листа с частичным обугливанием первого слоя стеклопластика.

При испытаниях с температурой пламени 1100 °С наблюдается сквозное прогорание двух слоистых структур: 2/1 (0/90/0) через 15 мин и 3/2 (0,90) через 30 мин. У трех структур сквозное прогорание отсутствовало при

воздействии пламени в течение 60 мин: структуры 3/2 (0/90/0), 3/2 (0/90/0/90) и 4/3 (0/90) [204].

Таблица 5.9 – Результаты испытаний на прогораемость образцов из алюмостеклопластиков различных слоистых структур и алюминиевых листов

<table>
<tr><th colspan="4">Строение СИАЛ</th><th colspan="2">Условия и результаты испытаний</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Лист сплава 1441 / стеклопластик</th><th rowspan="2">Направление волокна в слое стеклопластика</th><th rowspan="2">Кол-во монослоев стеклопластика в слое</th><th rowspan="2">Общая толщина материала, мм</th><th colspan="2">Температура пламени горелки</th></tr>
<tr><th>920 ºС</th><th>1100 ºС</th></tr>
<tr><td>2/1</td><td>0/90/0</td><td>3</td><td>1,1</td><td rowspan="5">15 мин – отсутствует сквозное прогорание</td><td>15 мин - сквозное прогорание</td></tr>
<tr><td>3/2</td><td>0/90</td><td>2</td><td>1,6</td><td>30 мин - сквозное прогорание</td></tr>
<tr><td>3/2</td><td>0/90/0</td><td>3</td><td>1,85</td><td rowspan="3">60 мин - отсутствие сквозного прогорания</td></tr>
<tr><td>3/2</td><td>0/90/0/90</td><td>4</td><td>2,1</td></tr>
<tr><td>4/3</td><td>0/90</td><td>2</td><td>2,2</td></tr>
<tr><td colspan="3">Лист из сплавов Д16ч и 1441</td><td>2</td><td colspan="2">2 мин – сквозное прогорание</td></tr>
</table>

Зависимость изменения температуры на расстоянии 100 мм от поверхности образца представлена на рисунке 5.19.

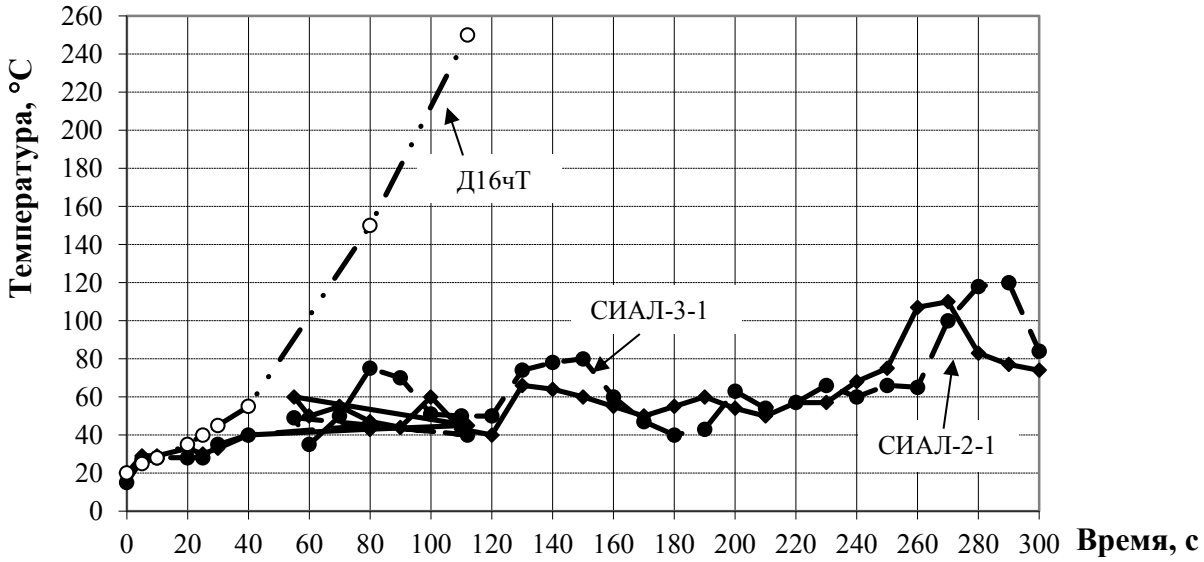


Рисунок 5.19 – Изменение температуры на расстоянии 100 мм с внешней стороны образцов от листов СИАЛ и Д16чТ при воздействии пламени 1100 °С

Для оценки возможности использования в конструкции самолета применительно к облицовкам багажно-грузового отсека и противопожарным перегородкам слоистого материала проведены квалификационные испытания во ФГУП «ГосНИИ ГА» на образцах алюмостеклопластика с использованием листов из сплава 1441 и стеклопластика с перекрестным равнопрочным армированием стеклоровингом. Испытания проводили стандартной аттестованной горелкой на образцах СИАЛ пятислойной и семислойной структуры с воздействием пламени на поверхность образца с температурой $1100^{\pm 38}$ ºС в течение 5 и 15 мин в соответствии с требованиями АП-25 (таблица 5.10, рисунок 5.20).

Таблица 5.10 – Результаты квалификационных испытаний на прогораемость образцов при одностороннем нагреве с температурой пламени $1100^{\pm 38}$ ºС

Структура СИАЛ	Время воздействия пламени, мин	Температура на расстоянии 100 мм от внешней поверхности образца, ºС №№ термопары							Оценка проникновения пламени и состояния образцов
		1	2	3	4	5	6	7	
3/2	1	45	48	50	51	48	47	45	Пламя не проникает на внешнюю сторону образцов, верхние слои образцов не разрушаются
	3	181	185	185	187	185	183	185	
	5	230	227	225	224	226	227	227	
	7	221	218	219	220	218	218	219	
	9	210	211	212	211	212	211	210	
	11	208	207	208	206	207	208	208	
	13	207	206	204	206	207	205	206	
	15	205	205	206	204	205	206	205	
4/3	1	47	49	49	50	50	49	48	
	3	182	184	183	186	187	185	184	
	5	231	230	229	228	228	227	226	
	7	221	219	217	219	218	218	217	
	9	209	210	211	212	212	210	209	
	11	206	207	207	206	207	208	206	
	13	207	206	205	205	204	205	205	
	15	204	204	203	204	205	205	205	

а

б

Рисунок 5.20 – Внешний вид установки для испытаний образцов алюмостеклопластиков на прогораемость: а – до начала испытаний, б – на 15-ой минуте испытания

Максимальные температуры в течение 5 минут на расстоянии 100 мм над поверхностью образцов составили 230-231 °С. Однако после пятой минуты температура снижалась и к 14-15 минутам достигла в среднем значения 205 °С за счет изменения структуры слоев стеклопластика с образованием воздушных прослоек между слоями. Внешний вид образца на 15-ой минуте испытания представлен на рисунке 5.21, а.

По результатам испытаний при температурой пламени $1100^{\pm 38}$ ºС установлено отсутствие проникновения пламени на внешнюю сторону образцов алюмостеклопластика (рисунок 5.21, б).

При анализе характера и последовательности разрушения образцов из алюмостеклопластика при прямом воздействии пламени можно сделать вывод: внешний тонкий (0,25-0,5 мм) алюминиевый слой в составе СИАЛ (независимо от марки сплава) прогорает примерно через 15 секунд (температура плавления алюминиевых сплавов не выше 700 ºС), далее в слоях стеклопластика, представляющих собой композицию связующего и стеклянных волокон с температурой плавления ~ 1700 ºС, при воздействии температур 350-500 ºС происходит процесс коксования связующего с образованием коксового слоя, газовых продуктов и воздушных прослоек,

замедляющих прогрев последующих слоев и исключающих дальнейшее сквозное прогорание СИАЛ.

Противодействию распространения пламени в слоистом материале способствуют два фактора – абляционный эффект с образованием продуктов горения и термодеструкция слоев, армированных стекловолокнами. Увеличение времени прогорания материала в конструкции обеспечивается увеличением количества монослоев препрега в СИАЛ.

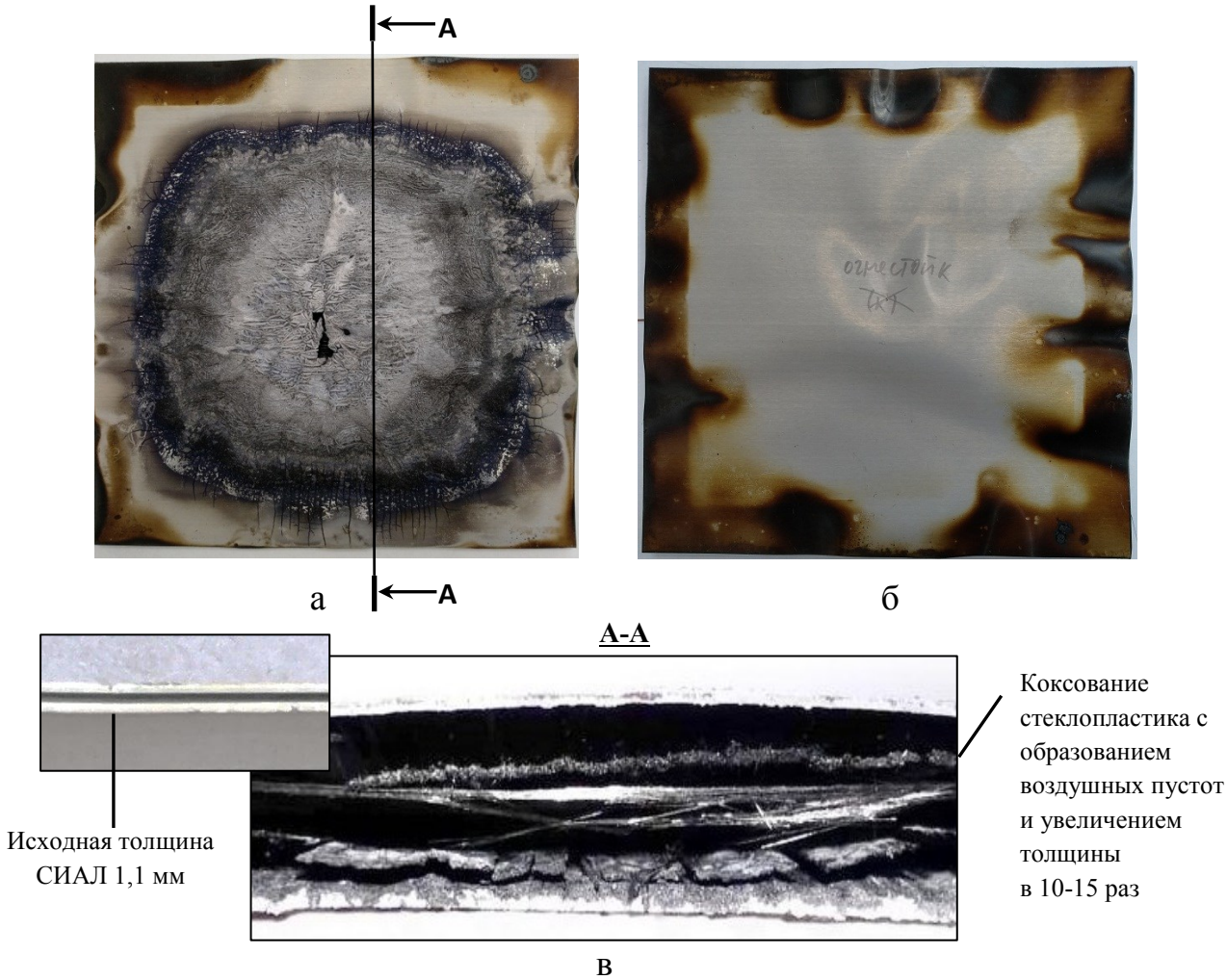


Рисунок 5.21 – Внешний вид образца после огневых испытаний:
а – со стороны воздействия пламени, б – с противоположной стороны,
в – образец в сечении (А-А)

Сравнительные огневые испытания образцов СИАЛ без защиты и с дополнительным огнезащитным покрытием ВЗО-9 вспенивающегося типа

толщиной 0,5 мм (ТИ 1.595-28-339) были проведены на лабораторной установке в соответствии с требованиями СТО 1-595-20-532 (метод В) при воздействии открытого пламени с температурой 1100 °С со стороны нанесенного на образец покрытия. Результаты проведенных сравнительных испытаний представлены на рисунке 5.22.

Внешний вид образцов с нанесенными покрытиями толщиной 0,5 мм и 2,5 мм приведены на рисунке 5.23.

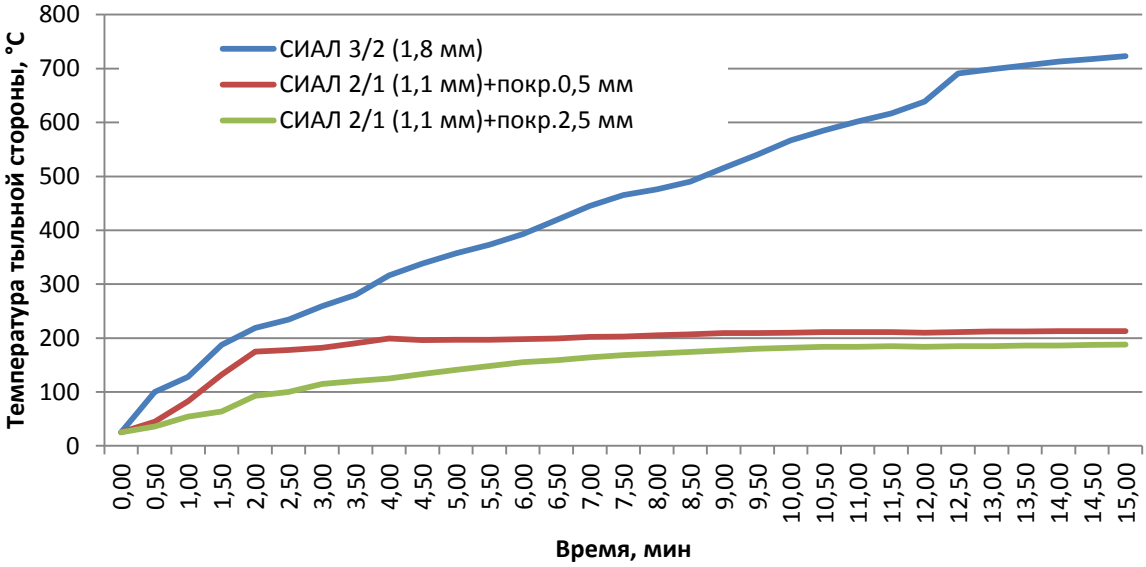


Рисунок 5.22 – Результаты сравнительных огневых испытаний СИАЛ без дополнительного покрытия и с покрытием толщиной 0,5 и 2,5 мм

Исходный образец с огнезащитным покрытием

Образец после огневых испытаний при температуре 1100 °С

Обратная сторона образца после испытаний без прогорания

Рисунок 5.23 – Внешний вид образцов СИАЛ до и после огневых испытаний

По результатам испытаний можно сделать вывод, что теплоизоляционные слои снижают нагрев внешних поверхностей обшивки в 2,5-3 раза и исключают деформацию поверхности образца.

Данные ВИАМ и ГосНИИ ГА о повышенной огнестойкости отечественных алюмостеклопластиков СИАЛ [204-206] близки к данным из литературных источников об огнестойкости аналогичных слоистых материалов типа GLARE, полученных при испытаниях зарубежными компаниями «Airbus» и «Boeing» [207-209]. Оценка огнестойкости материалов GLARE и СИАЛ в сравнении с монолитными листами из алюминиевых сплавов приведена в таблице 5.11. Исследования поведения слоистых алюмостеклопластиков при огневых испытаниях показали отсутствие сквозного прогорания при воздействии открытого пламени с температурой 1100 °С в течение 15 минут.

Таблица 5.11 – Сравнительная оценка огнестойкости материалов GLARE, СИАЛ и монолитных листов из алюминиевых сплавов

<table>
<tr><th colspan="2">Марка</th><th rowspan="2">Темпера-тура испытаний</th><th rowspan="2">Результаты испытаний</th><th colspan="2">Сторона, противоположная пламени</th></tr>
<tr><th>Европа, США</th><th>Россия</th><th>Максимальная температура, °С</th><th>Время, мин</th></tr>
<tr><td>GLARE 3 (2/1)</td><td>СИАЛ-3 (2/1)</td><td rowspan="3">1100 °С</td><td>отсутствие сквозного прогорания</td><td>220</td><td>5</td></tr>
<tr><td>GLARE 3 (3/2)</td><td>СИАЛ-3 (3/2)</td><td>отсутствие сквозного прогорания</td><td>160</td><td>5</td></tr>
<tr><td>GLARE 4 (2/1)</td><td>СИАЛ-2 (2/1)</td><td>отсутствие сквозного прогорания</td><td>215</td><td>10</td></tr>
<tr><td colspan="2">Монолитный лист 1,5-2,0 мм</td><td rowspan="2">1100 °С</td><td rowspan="2">сквозное прогорание</td><td rowspan="2">сквозное прогорание</td><td rowspan="2">1,5</td></tr>
<tr><td>2024Т3</td><td>Д16чТ</td></tr>
</table>

Изменение температуры на внешней и внутренней поверхностях обшивки фюзеляжа, изготовленной из материалов GLARE, в сравнении с обшивкой фюзеляжа, изготовленной из монолитного сплава 2024Т3, при огневых испытаниях показано на рисунке 5.24.

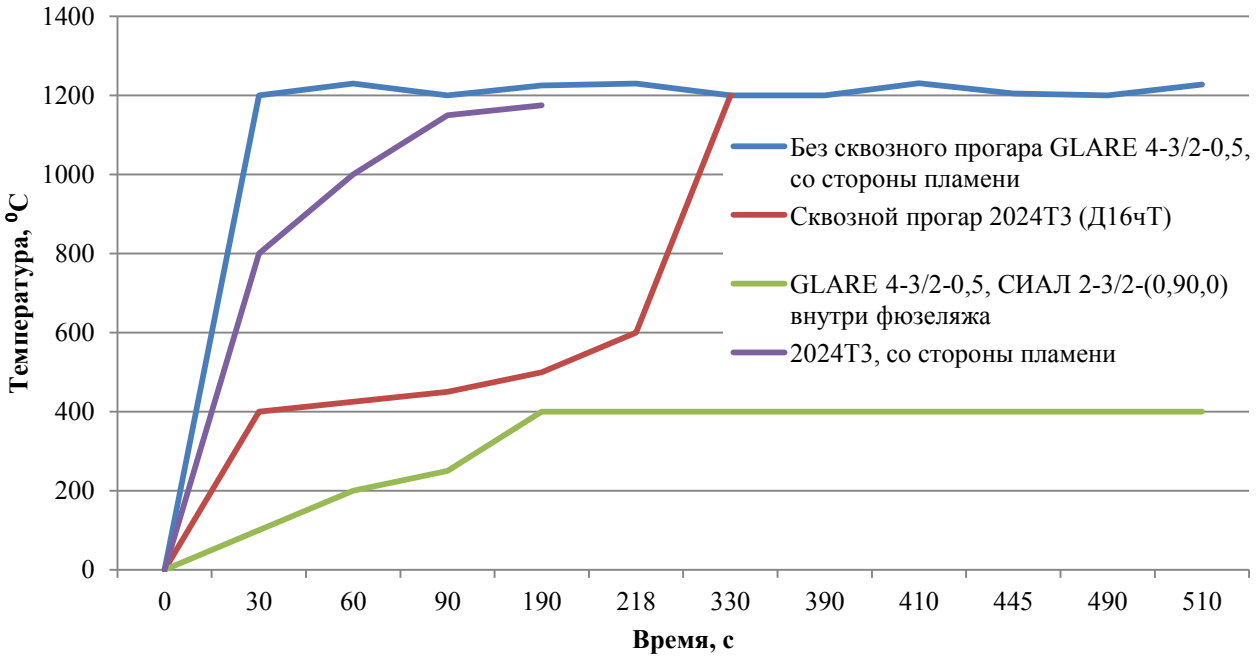


Рисунок 5.24 – Данные огневых испытаний компании «Airbus»: графики изменения температур на поверхности обшивок фюзеляжа из материала GLARE 4 (структуры 3/2) и листов 2024Т3

По результатам квалификационных испытаний во ФГУП «ГосНИИ ГА» и в соответствии с требованиями АП-25 установлено, что слоистые алюмостеклопластики обладают более высокой огнестойкостью при 15-ти минутном воздействии пламени с температурой $1100^{\pm 38}$ °С без прогорания при толщине материала 1,5 мм по сравнению с листами из монолитных алюминиевых сплавов толщиной 1,5-2,0 мм со сквозным прогоранием за 1,5-2 минуты. Высокая огнестойкость алюмостеклопластиков позволяет рекомендовать данный материал для применения в пожароопасных зонах конструкции и зонах, подвергающихся нагревам, таких как противопожарные перегородки, зоны обшивок фюзеляжа, пола и багажно-грузовых отсеков.

При непосредственном участии автора диссертации был проведен комплекс испытаний, отработаны методики по оценке пожаростойкости и огненепроницаемости материалов с целью использования при проектировании конструкций, разработан стандарт организации СТО 1-595-20-532-2017.

5.6.3 Испытания на огнестойкость и огненепроницаемость слоистых материалов с различными типами клеевого препрега

С учетом требований авиационного стандарта ISO 2685 и стандарта организации СТО 1-595-20-532-2017 были проведены испытания на огнестойкость листовых образцов трехслойного СИАЛ (2/1) с различными типами клеевого препрега на лабораторной установке (см. рисунок 5.18) при одностороннем воздействии открытого пламени (таблица 5.12).

Анализ результатов огневых испытаний показал, что внешний тонкий алюминиевый лист прогорает в течение 20-25 секунд, после чего действию пламени подвергается слой стеклопластика, который создает барьер воздействию пламени на последующие слои композиционного материала (рисунок 5.25).

Сторона воздействия пламени	Тыльная сторона	Сторона воздействия пламени	Тыльная сторона
а	б	в	г

Рисунок 5.25 – Внешний вид образцов слоистого материала после испытаний на стойкость к воздействию огня:

а, б – со стеклоровингом; в, г – со стеклотканью

Таблица 5.12 – Результаты испытаний на огнестойкость и огненепроницаемость образцов экспериментальных структур слоистых материалов в лабораторных условиях

№ п/п	Структура СИАЛ количество металлических листов / количество слоев стеклопластика (схема армирования стеклопластика)	Время испытаний / температура испытаний, мин / °С	Максимальная температура на расстоянии 100 мм от обратной стороны образца, °С
	Al лист / стеклоровинг (24 % связующего)		
1	2/1 (0,90,0)	5 / 1100	105
		15 / 1100	149
2	2/1 (0,90,90,0)	5 / 1100	104
		15 / 1100	141
3	2/1 (0,90)	5 / 1100	118
		15 / 1100	146
4	2/1 (0,90,0)	5 / 1100	104
		15 / 1100	147
5	2/1 (0,90,90,0)	5 / 1100	102
		15 / 1100	139
	Al лист / стеклоровинг (30 % связующего)		
6	2/1 (0,90)	5 / 1100	116
		15 / 1100	144
7	2/1 (0,90,0)	5 / 1100	106
		15 / 1100	148
8	2/1 (0,90,90,0)	5 / 1100	105
		15 / 1100	142
	Al лист / КМКС-2.120.Т60.37		
9	2/1 (0,90)	5 / 1100	129
		15 / 1100	158
10	2/1 (0,90,0)	5 / 1100	124
		15 / 1100	155
11	2/1 (0,90,0,90)	5 / 1100	120
		15 / 1100	148
	Al лист / КМКС-2м.120.Т60.55		
12	2/1 (0,90,0,90)	5 / 1100	117
		15 / 1100	143
13	2/1 (0,90,0)	5 / 1100	119
		15 / 1100	151
	Al лист / КМКС-2м.120.Т64.55		
14	2/1 (0,90,0,90)	5 / 1100	111
		15 / 1100	144
15	2/1 (0,90,0)	5 / 1100	119
		15 / 1100	157
16	2/1 (0,90)	5 / 1100	127
		15 / 1100	159
	Al лист / КМКС-2м.120.Т64.37		
17	2/1 (0,90)	5 / 1100	127
		15 / 1100	151
18	2/1 (0,90,0)	5 / 1100	117
		15 / 1100	150

При испытаниях на огнестойкость было установлено, что при воздействии в течение 15 мин открытого пламени с температурой 1100 °С у всех экспериментальных структур легкого огнестойкого слоистого материала отсутствовало проникновение пламени на тыльную сторону поверхности образца (сквозное прогорание). Со стороны воздействия пламени наблюдалось прогорание внешнего алюминиевого листа, а также частичное разрушение первого слоя стеклопластика. При контроле температуры на расстоянии 100 мм от тыльной стороны образца в течение 15 минут испытаний наилучшие результаты показали структуры на основе стеклоровинга: максимальная температура находилась в пределах 147-148 °С для структур с тремя монослоями и 139-142 °С для структур с четырьмя монослоями. У структур на основе стеклотканей с тремя и четырьмя монослоями температура была незначительно выше. Структуры СИАЛ на основе стеклотканей с двумя монослоями показали следующие результаты: на расстоянии 100 мм от тыльной стороны образца после воздействия пламени в течение 15 минут температура находилась в пределах 151-159 °С.

С целью исключения влияния на прогораемость окисной пленки, образующейся при прогорании первого алюминиевого листа и частично препятствующей проникновению пламени, были дополнительно проведены испытания экспериментальных структур, содержащих только стеклопластик с тремя и четырьмя монослоями (таблица 5.13) для определения наиболее стойкой к воздействию огня структуры слоя стеклопластика.

Установлено, что у структур на основе стеклоровинга с тремя монослоями с выкладкой (0,90,0) сквозное прогорание наблюдалось через 18-19 минут, с четырьмя монослоями с выкладкой (0,90,90,0) – через 28-32 минуты. У структур на основе стеклотканей Т60.37, Т60.55, Т64.37 с тремя монослоями сквозное прогорание наблюдалось через 13-15 минут, с четырьмя монослоями – через 25-28 минут. Из результатов испытаний видно, что структуры на основе стеклоровинга лучше противостоят воздействию пламени ввиду более плотной упаковки волокон в стеклопластике.

Таблица 5.13 – Экспериментальные структуры стеклопластиков

№ п/п	Ориентация слоев препрега в слое стеклопластика	Количество монослоев	Тип препрега	Время до сквозного прогорания, мин
1	0,90,0	3	КМКС-2мР.120.РВМПН.30 (24 % связующего ВСК-14-2мР)	18
2	0,90,90,0	4		28
3	0,90,90,0	4	КМКС-2мР.120.РВМПН.30 (30 % связующего ВСК-14-2мР)	32
4	0,90,0	3		19
5	0,90,0	3	КМКС-2м.120.Т64.37	13
6	0,90,90,0	4		25
7	0,90,0	3	КМКС-2.120.Т60.37	14
8	0,90,90,0	4		26
9	0,90,0	3	КМКС-2м.120.Т64.55	14
10	0,90,90,0	4		27
11	0,90,0	3	КМКС-2м.120.Т60.55	15
12	0,90,90,0	4		28

По результатам испытаний алюмостеклопластиков на огнестойкость и огненепроницаемость данные материалы могут быть рекомендованы для применения в пожароопасных зонах авиационных изделий [204, 210].

5.6.4 Оценка молниестойкости алюмостеклопластиков

Разрушение конструкции от попадания разряда молнии отличается от воздействия на поверхность СИАЛ открытого пламени. Молниезащита конструкций, особенно в зонах топливных баков, обеспечивается толщинами материалов, что значительно влияет на весовые характеристики изделий. Эффективность использования алюмостеклопластиков в качестве молниестойкого материала оценивалали в зонах обшивок панелей

топливного бака самолета Бе-103, выполненной из СИАЛ, в сравнении с алюминиевыми листами.

Сравнительные испытания проводились на образцах толщиной 1,0-1,3 мм из материала СИАЛ трехслойной структуры с использованием листов из сплава 1441 и стеклопластика с различными связующими и образцах из монолитных листов из сплава 1441 толщиной 2,5 мм (рисунок 5.26, таблица 5.14).

а

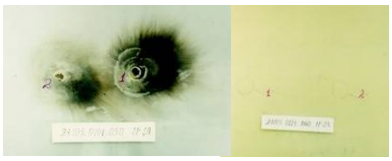
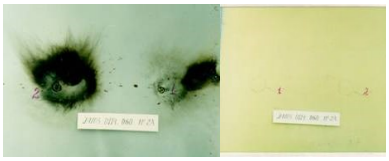
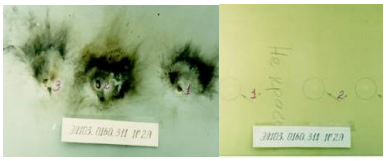
б

Рисунок 5.26 – Образец из СИАЛ после испытаний на молниестойкость: а – наружная сторона, б – внутренняя сторона

В результате воздействия импульса тока, имитирующего разряд молнии, сквозной прожог отсутствовал, как на монолитных листах из сплава 1441 толщиной 2,5 мм, так и на образцах из слоистого материала СИАЛ толщинами 1,3-1,5 мм. На внутренней стороне всех испытанных образцов имело место образование горячей точки с температурой, не превышающей 180 ºС, что является безопасным с учетом температуры воспламенения топливо-воздушной смеси более 230 ºС.

В образцах трехслойной структуры из СИАЛ толщинами 1,3-1,5 мм наблюдалось проплавление только первого металлического слоя. При этом температура горячих точек от воздействия импульса тока с внутренней стороны обшивки из СИАЛ не превышала 100 ºС.

Таблица 5.14 – Сравнительные испытания на молниестойкость образцов из СИАЛ и листов 1441

Материал образца панели	Толщина металлического слоя, мм		Результаты воздействия от удара молнией	
	1-й	3-й		
СИАЛ-3-1 (2/1) 1-й слой лист 1441 + 2-й слой стеклопластик + 3-й слой лист 1441	0,8	0,5	Расплавление внешнего слоя размером D=9-12 мм; деформация образца в месте контакта	
СИАЛ-3-1 (2/1) 1-й слой лист 1441 + 2-й слой стеклопластик + 3-й слой лист 1441	0,5	0,5	Расплавление внешнего слоя размером до D=12 мм; деформация образца в месте контакта	
Лист 1441	2,5		Образование кратера, обугливание краски на листовом материале	

По результатам испытаний панелей топливного бака, выполненных из слоистого материала СИАЛ трехслойной структуры, показано, что алюмостеклопластики толщиной 1,3-1,5 мм обеспечивают повышенную стойкость к удару молнии и сопоставимы по молниестойкости с монолитными металлическими панелями толщиной 2,5 мм при снижении массы конструкции.

Повышенная стойкость к удару молнии и огненепроницаемость алюмостеклопластиков позволяет рекомендовать слоистые листы СИАЛ в качестве молниезащитных обшивок, например, верхних панелей топливных баков самолета Бе-103 [129, 130].

5.7 Влияние климатических факторов на влагопоглощение и служебные свойства алюмостеклопластиков

5.7.1 Стойкость алюмостеклопластиков к коррозионному воздействию атмосферных факторов

Коррозионная стойкость материалов является важным фактором при эксплуатации изделий [211-214].

В силу того, что слоистые алюмостеклопластики сочетают в себе свойства полимерных и металлических материалов, к оценке их климатической стойкости требуются специальные подходы. Наибольшему влиянию климатических факторов подвергаются внешние металлические листы и незащищенные торцевые поверхности алюмостеклопластика вследствие возможных процессов влагопоглощения и деструкции материала. Протекание указанных процессов возможно в случае повреждения или отсутствия защиты внешних металлических и торцевых поверхностей, например, при нарушении герметичности и целостности защитных покрытий при постановке крепежа.

Для оценки поведения материала в коррозионных средах был проведен комплекс испытаний металлополимерного композиционного материала СИАЛ-3-1 на стойкость листов из алюминий-литиевого сплава 1441 и диффузионно-сорбционных свойств слоев стеклопластика. Схема укладки слоев в исследуемых образцах алюмостеклопластика СИАЛ-3-1 представлена на рисунке 5.27.

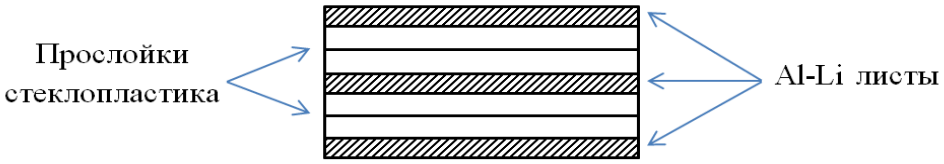


Рисунок 5.27 – Схема укладки слоев в исследуемых образцах алюмостеклопластика СИАЛ-3-1

Натурные испытания образцов алюмостеклопластка СИАЛ-3-1 с использованием в структуре листов алюминий-литиевого сплава 1441Т12 толщиной 0,25 мм после анодного оксидирования с последующим нанесением защитного адгезионного грунта ЭП-234 проводили в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова [215, 216].

Климатические условия в месте расположения полигона ГЦКИ сочетают в себе морской климат с повышенной влажностью и наличие высокого содержания хлоридов, что способствует ускорению процессов электрохимической коррозии.

При испытаниях образцов на стойкость к коррозионному воздействию на открытой площадке (рисунок 5.28) в условиях солнечных нагревов наиболее интенсивному воздействию подвергаются стеклопластиковые слои в СИАЛ за счет циклического насыщения влагой.

Увлажнение поверхностей образцов, установленных под навесом, примерно в 3 раза больше по сравнению с образцами, расположенными на открытой площадке. Отсутствие под навесом прямого солнечного воздействия увеличивало длительность присутствия влажной среды на поверхности образцов.

Рисунок 5.28 – Общий вид натурной экспозиции образцов на открытой площадке в ГЦКИ ВИАМ

Оценка коррозионной стойкости слоистых алюмостеклопластиков с искусственным межслойным непроклеем

Оценку диффузионно-сорбционных свойств алюмостеклопластика СИАЛ-3-1Р проводили по результатам испытаний образцов с искусственным повреждением в виде межслойного непроклея по боковой стороне (рисунок 5.29) после экспозиции в течение 6 месяцев на открытой площадке и под навесом в ГЦКИ; а также после выдержки 60 суток в камере солевого тумана (КСТ) [216].

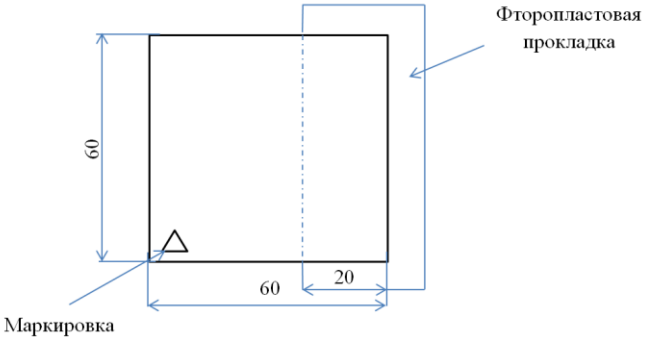


Рисунок 5.29 – Эскиз образца СИАЛ-3-1Р с межслойным непроклеем

При подготовке образцов для испытаний проводили их сушку в термостате при $T = 60$ °С с контролем изменения массы. Время сушки определяли получением стабильной массы образцов при взвешивании ($\Delta m < 0{,}02$ г).

Измерение массы во время сушки проводили на трех контрольных образцах с периодом взвешивания 1, 2, 3, 7 суток, далее через каждые 7 суток до получения стабильных весовых характеристик.

После 6 месяцев натурных испытаний образцов СИАЛ-3-1Р (структуры 4/3) размером 60×60 мм на открытой площадке в натурных условиях ГЦКИ на 5 % площади поверхности образцов наблюдали коррозионные поражения диаметром от 0,5 мм до 4,0 мм. По результатам визуальной оценки образцов после испытаний дальнейших расслоений в

местах регламентированных непроклеев и расслоений по торцам СИАЛ не обнаружено (рисунок 5.30).

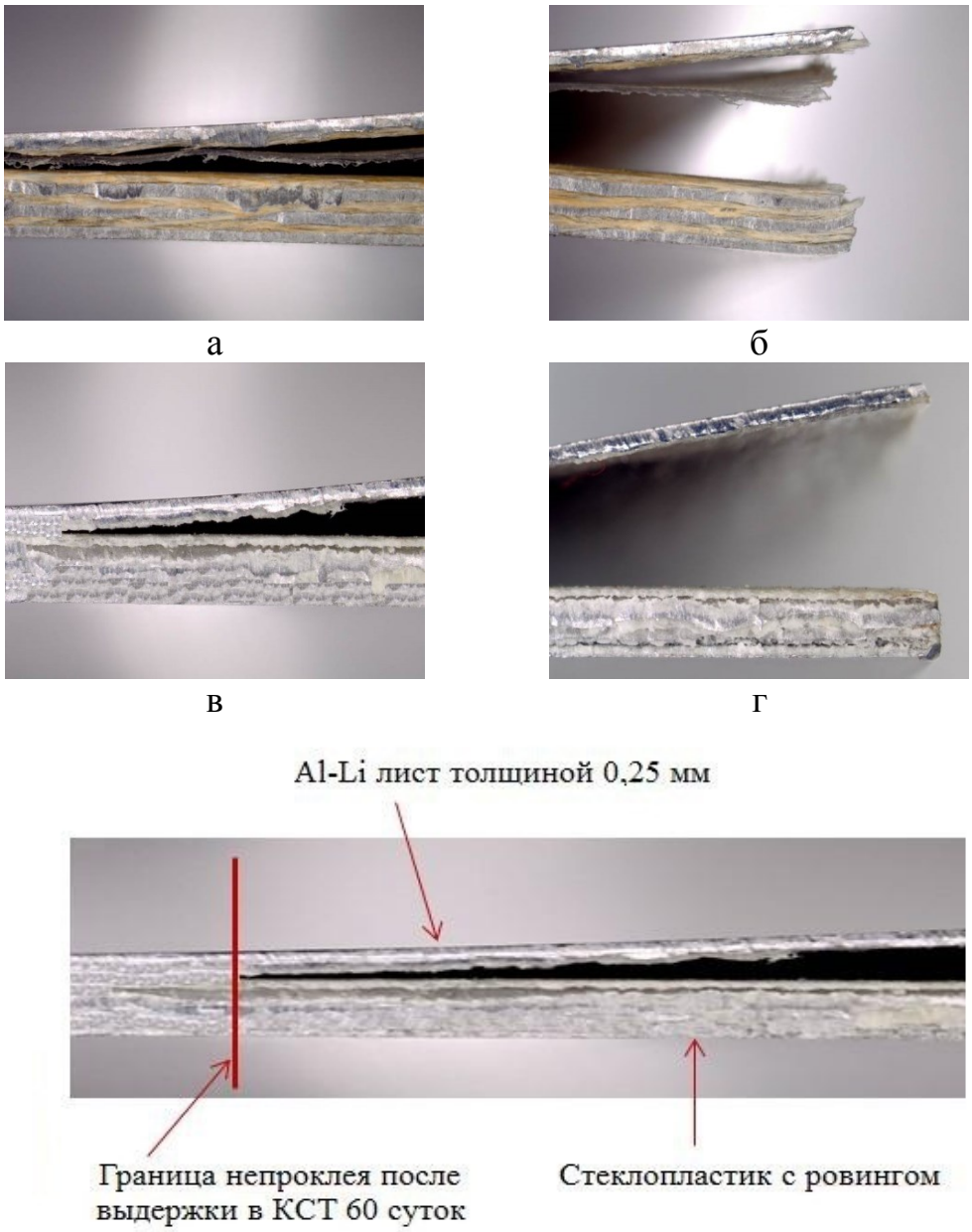


Рисунок 5.30 – Внешний вид образцов СИАЛ с искусственным непроклеем (х25): а, б – после 6 месяцев экспозиции в ГЦКИ ВИАМ на открытой площадке; в, г – после 6 месяцев экспозиции в ГЦКИ ВИАМ под навесом; д – после выдержки 60 суток в КСТ

Проникновение влаги по слоям материала СИАЛ может быть только по торцевым поверхностям в случае нарушения и отсутствия антикоррозионных

покрытий и/или герметизации. Однако необходимо учитывать, что стеклопластик обладает анизотропией по распределению влаги в зависимости от структуры и расположения волокон в пакете СИАЛ. Расслоение и набухание стеклопластика происходит по волокнам. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проектировании деталей.

По результатам оценки влагонасыщения материала СИАЛ-3-1Р было установлено, что на образцах с регламентированным непроклеем поглощение влаги составляет до 0,37 % от исходной массы после выдержки 60 суток в КСТ (рисунок 5.31).

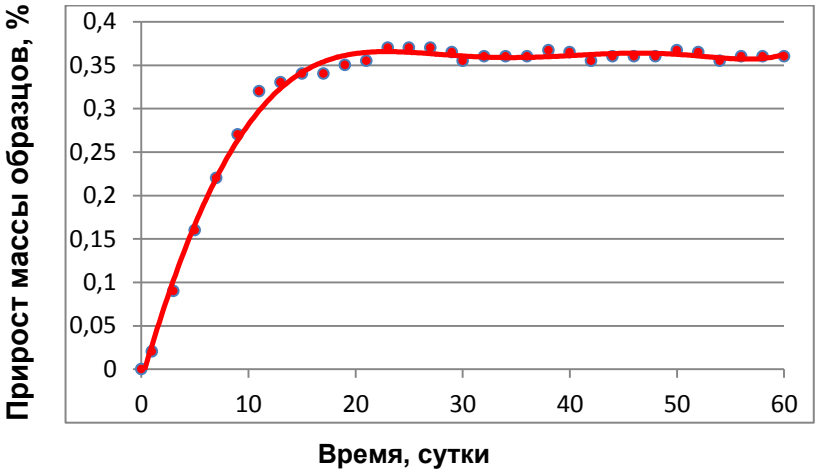
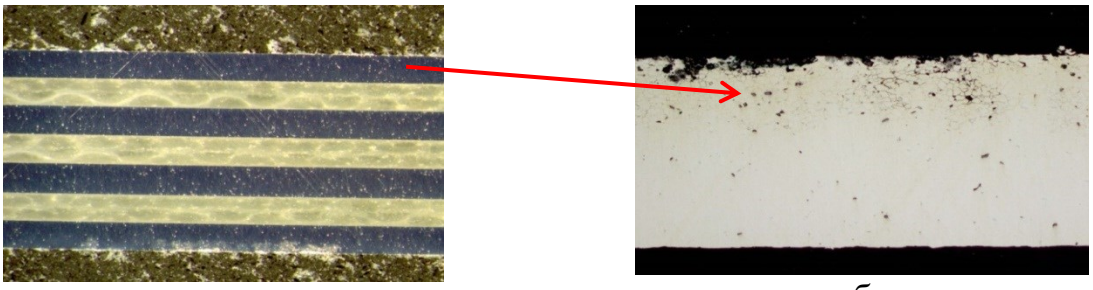


Рисунок 5.31 – Динамика влагонасыщения слоев стеклопластика в образцах СИАЛ-3-1Р с искусственным непроклеем после выдержки 60 суток в КСТ

Многослойная структура алюмостеклопластиков исключает возможность проникновения агрессивных сред по толщине образцов. В случае нарушения антикоррозионной защиты коррозионному поражению могут быть подвержены только внешние листы, что практически не снижает эксплуатационной надежности материала СИАЛ.

При испытаниях образцов без ЛКП после экспозиции в ГЦКИ ВИАМ под навесом в течение 4-х лет на внешних поверхностях образцов из СИАЛ-3-1Р были отмечены коррозионные язвенные поражения на листах из сплава 1441Т12. По результатам металлографических исследований

микрошлифов, вырезанных из мест локальных коррозионных повреждений образцов СИАЛ без антикоррозионных покрытий, было выявлено наличие межкристаллитной коррозии листов сплава 1441Т12 глубиной не более 0,15 мм (рисунок 5.32), питтинговой коррозии – 0,047 мм, что коррелирует с ранее полученными результатами коррозионных испытаний листов из сплава 1441Т12 (см. рисунок 3.18, раздел 3.2).



а б

Рисунок 5.32 – Микроструктура алюмостеклопластика после коррозионных испытаний: а – СИАЛ-3-1Р структуры 4/3, х25; б – следы межкристаллитной коррозии и язвенные коррозионные поражения внешних листов из сплава 1441Т12 без антикоррозионной защиты, х200

Испытания на растяжение образцов СИАЛ-3-1Р без антикоррозионных покрытий после экспозиции в ГЦКИ ВИАМ в течение 12-48 месяцев показали снижение механических характеристик (рисунок 5.33).

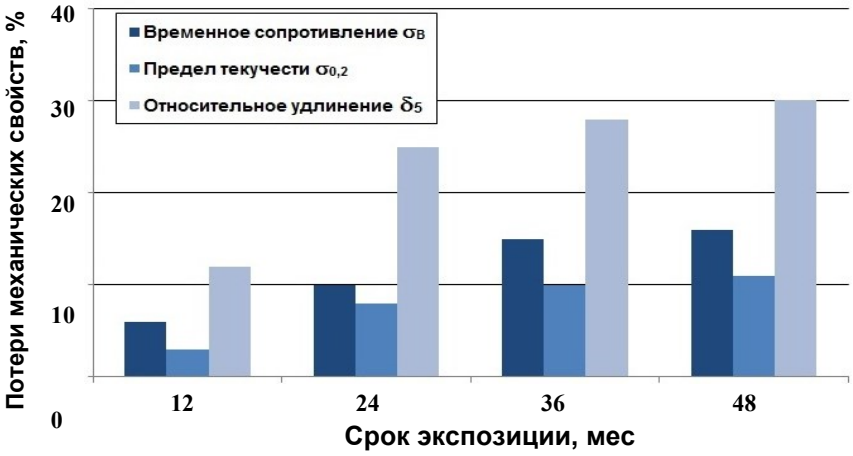


Рисунок 5.33 – Снижение механических свойств образцов СИАЛ-3-1Р после 12-48 месяцев экспозиции в натурных условиях ГЦКИ ВИАМ

Снижение механических свойств СИАЛ после 48 месяцев экспозиции образцов в натурных условиях ГЦКИ ВИАМ составляет: $\sigma_B \leq 16$ %, $\sigma_{0,2} \leq 11$ %, $\delta \leq 30$ %.

Оценка малоцикловой усталости образцов после коррозионных испытаний

Оценку влияния коррозионного воздействия на малоцикловую усталость проводили на образцах СИАЛ «полоса с отверстием» ($K_t = 2,6$) после экспозиции в камере солевого тумана в течение 6 месяцев. Для приближения условий эксперимента к реальным условиям при работе материала в случае нарушения антикоррозионной защиты торцевых поверхностей защитные покрытия были нанесены только на внешние поверхности листов из сплава 1441Т12 без защиты торцев.

После выдержки образцов в течение 6 месяцев в КСТ при осмотре были обнаружены солевой налет на внешних поверхностях, коррозионные поражения площадью до 90 % поверхности образцов, расслоения от торца до 10 мм (рисунки 5.34, 5.35).

После испытаний образцов СИАЛ-3-1Р на открытой площадке ГЦКИ ВИАМ с экспозицией 12 месяцев на образцах обнаружены единичные поверхностные коррозионные поражения диаметром до 4,0 мм и общей площадью до 10 % поверхности (рисунок 5.36). На торцах образцов обнаружены единичные коррозионные поражения диаметром до 0,5 мм, расслоения отсутствуют.

а

б

Рисунок 5.34 – Состояние поверхности образцов СИАЛ-3-1Р после экспозиции в КСТ в течение 6 месяцев:

а – лицевая сторона, б – оборотная сторона

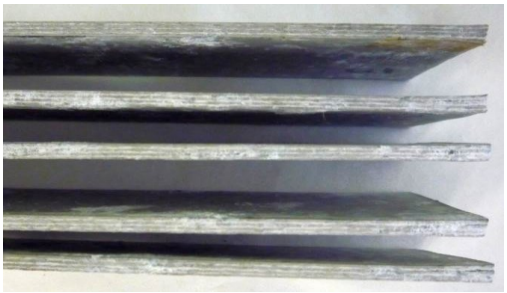


Рисунок 5.35 – Состояние торцевых поверхностей образцов СИАЛ-3-1Р после 6 месяцев испытаний в КСТ

а

б

Рисунок 5.36 – Состояние поверхности образцов СИАЛ-3-1Р после экспозиции на открытой площадке ГЦКИ в течение 12 месяцев:

а – лицевая сторона, б – оборотная сторона

При проведении испытаний на МЦУ нагрузка была увеличена до максимальных значений напряжения цикла σ_{max} = 370 МПа (обычно для оценки данного показателя монолитных листов в лабораторных условиях используют напряжения 157, 196 или 235 МПа).

По результатам испытаний на МЦУ образцов без защитных покрытий внешних и торцевых поверхностей из слоистого материала СИАЛ-3-1Р установлено снижение усталостной долговечности после экспозиции:

- на открытой площадке долговечность образцов снизилась на ~ 21 % с 13500 циклов (без воздействия коррозионной среды) до 10700 циклов;

- после выдержки в условиях камеры солевого тумана количество циклов до разрушения образца снизилось на ~ 43 % с 13500 циклов (без воздействия коррозионной среды) до 7700 циклов.

Испытания образцов с защитным покрытием на 4-х точечный изгиб

Для оценки работы под напряжением алюмостеклопластиков с применяемыми в конструкциях схемами защитных покрытий использовали метод испытаний на 4-точечный изгиб образцов из СИАЛ-3-1Р с различными видами лакокрасочных покрытий с учетом их невысокой пластичности:

3 образца – покрытие грунтом ЭП-0215 по регламентированной технологии с горячей и холодной сушкой при нанесении слоев;

3 образца – покрытие по схеме грунт ЭП-0215 + эмаль ВЭ-69, включая торцы образцов. Схема покрытия – грунт ЭП-0215 (2 слоя), горячая сушка, холодная сушка, эмаль ВЭ-69 (2 слоя), холодная сушка;

3 образца – с герметизированными торцами по схеме грунт ЭП-0215 с гальваническим покрытием;

3 образца – без покрытия.

С целью имитации деформации при эксплуатации конструкции из слоистого материала с напряжениями растяжения в поверхностных слоях

образцы нагружали по схеме 4-х точечного изгиба в струбцинах при $\sigma = 150$ МПа ($0{,}5 \cdot \sigma_{0,2}$, где $\sigma_{0,2} = 300$ МПа) при стреле прогиба образца СИАЛ - 1,64 мм (см. рисунок 2.5, глава 2.2).

По результатам натурной экспозиции в ГЦКИ ВИАМ в течение 4-х месяцев дефектов защитных покрытий в виде растрескиваний и отслоений в образцах СИАЛ не обнаружено (рисунок 5.37).

а

б

Рисунок 5.37 – Образец СИАЛ-3-1Р для испытаний на 4-х точечный изгиб: а – установка образца в струбцину, б – растянутая зона

По состоянию образцов после испытаний в части коррозионных поражений можно сделать следующие выводы:

- слоистый материал СИАЛ по результатам коррозионных испытаний подтвердил свою высокую коррозионную стойкость в условиях морского климата, искусственный непроклей на образцах не вызывает дополнительных расслоений и деструкции слоев стеклопластика;

- многослойная структура алюмостеклопластика препятствует развитию коррозионных поражений в слоях по толщине образца, коррозионные поражения возникают только на внешних поверхностях металлических листов в случае нарушений антикоррозионной защиты; выполнение требований антикоррозионной защиты ЛКП, герметизации торцевых поверхностей и зон установки крепежа обеспечивает высокий

уровень служебных характеристик алюмостеклопластиков в любых условиях внешней среды;

- отсутствие антикоррозионной защиты слоистого материала приводит к снижению его усталостной долговечности; установлено, что после выдержки в условиях открытой площадки ГЦКИ ВИАМ количество циклов до разрушения снижается на 21 %; после выдержки в условиях КСТ – на 43 %;

- при испытаниях на 4-х точечный изгиб образцов с защитными покрытиями в натурных условиях ГЦКИ ВИАМ в течение 4-х месяцев разрушений защитных покрытий не происходит.

5.7.2 Исследование влагонасыщения алюмостеклопластиков

Для оценки кинетики сорбции влаги были выбраны:

- три структуры разработанных слоистых алюмостеклопластиков с различной схемой армирования стекловолокном: СИАЛ-1-4Р, СИАЛ-3-2Р, СИАЛ-3-1Р с применением клеевого препрега на ровинге марки КМКС-2мР.120.РВМПН.30 с клеевым связующим ВСК-14-2мР (таблица 5.15);

- равнопрочный СИАЛ-3 (50:50 %) на основе клеевого препрега с тканью КМКС-1.80.Т60.37 и клеевым связующим ВСК-14-1.

Структура исследованных образцов СИАЛ представлена на рисунке 5.38. Для исследования использовали образцы размеров: 100×10 мм, 100×25 мм (продольные), 10×100 мм, 25×100 мм (поперечные).

Таблица 5.15 – Состав алюмостеклопластиков

№ слоя	СИАЛ-1-4Р	СИАЛ-3-2Р	СИАЛ-3-1Р
Схема армирования	100:0 %	70:30 %	50:50 %
1	Лист В-1469Т1 (толщиной 0,5 мм)	Лист 1441Т12 (толщиной 0,35 мм)	Лист 1441Т12 (толщиной 0,25 мм)
2	Стеклоровинг КМКС-2мР.120.РВМПН.30 толщиной от 0,25 до 0,30 мм		
3	Лист В-1469Т1 (толщиной 0,5 мм)	Лист 1441Т12 (толщиной 0,35 мм)	Лист 1441Т12 (толщиной 0,25 мм)
4	Стеклоровинг КМКС-2мР.120.РВМПН.30 толщиной от 0,25 до 0,30 мм		
5	Лист В-1469Т1 (толщиной 0,5 мм)	Лист 1441Т12 (толщиной 0,35 мм)	Лист 1441Т12 (толщиной 0,25 мм)

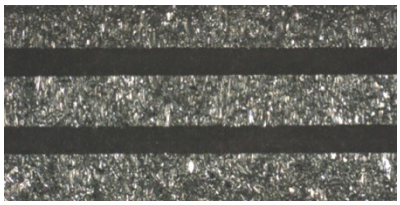


Рисунок 5.38 – Структура пятислойных алюмостеклопластиков для исследования влагонасыщения

Кинетика сорбции влаги слоистых алюмостеклопластиков

Перед началом сорбционных испытаний образцы высушивали в эксикаторе над поверхностью прокаленного силикагеля до стабилизации массы при температуре 60 °С, затем образцы взвешивали для определения исходной массы и увлажняли при той же температуре над поверхностью воды в эксикаторе с притёртой крышкой. Контроль массы образцов проводили после 1, 2, 3, 7, 9, 11, 14, 17, 21, 27 суток.

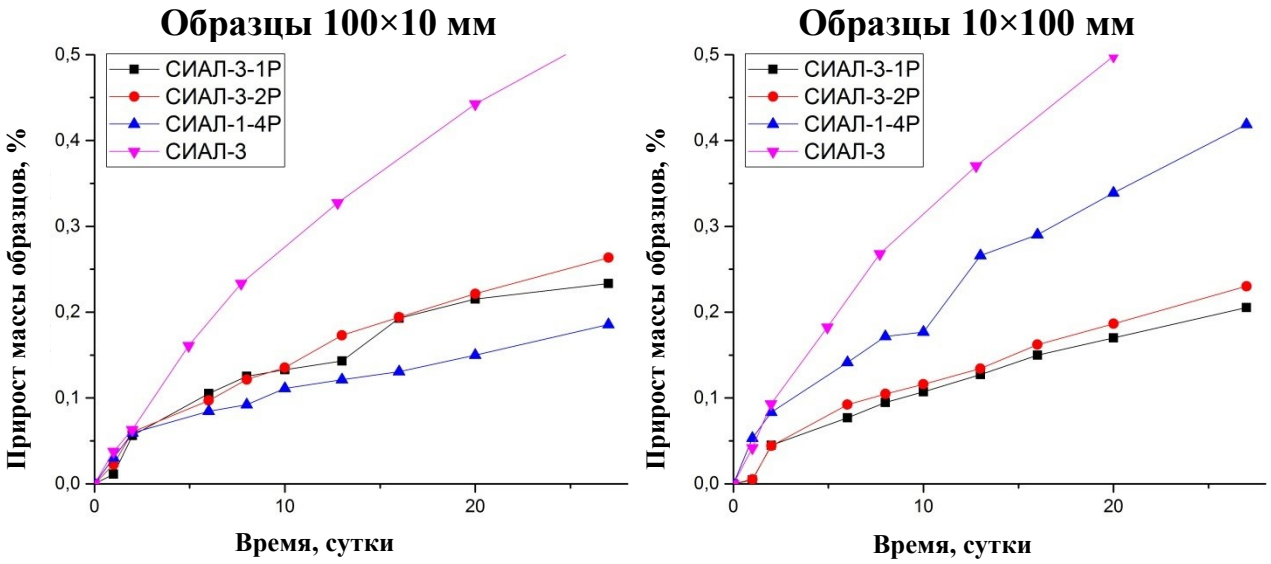
Сравнение кинетики сорбции влаги проводили на слоистых металлостеклопластиках с различным видом слоев стеклопластика:

- с клеевым препрегом марки КМКС-2мР.120.РВМПН.30 на основе клеевого связующего ВСК-14-2мР;

- с клеевым препрегом марки КМКС-1.80.Т60.37 на основе клеевого связующего ВСК-14-1.

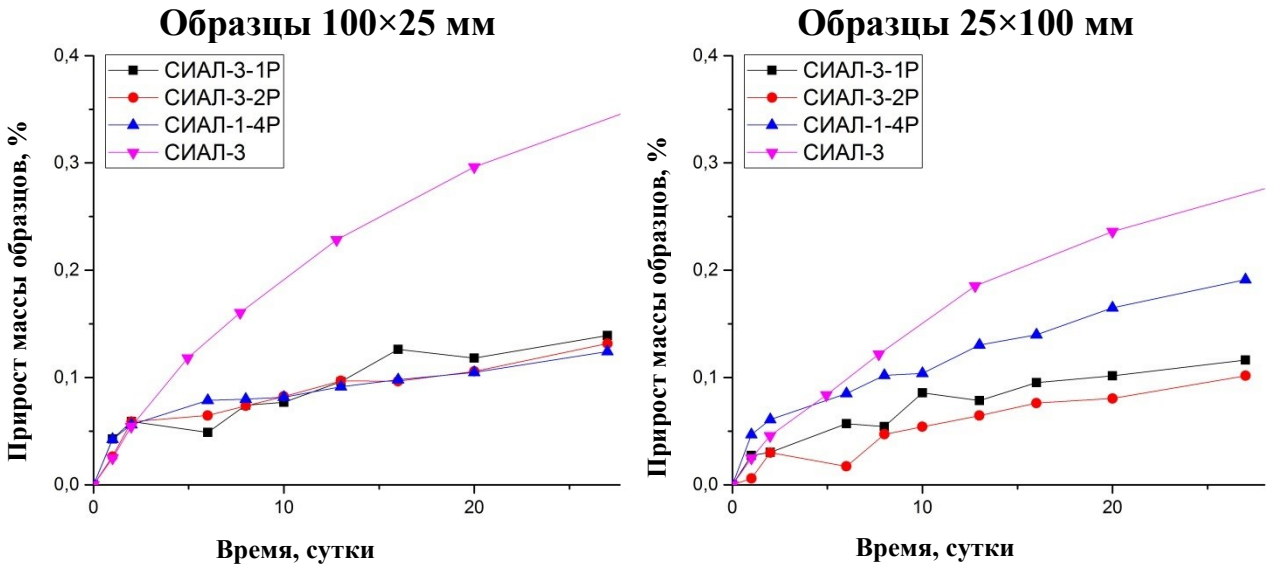
Использовали значения относительного изменения массы, приведенные в литературе [170, 213, 214]; условия эксперимента, описанные в [170], совпадали с условиями испытаний образцов в настоящей работе. На рисунках 5.39 и 5.40 представлена кинетика прироста массы образцов СИАЛ-3, СИАЛ-1-4Р, СИАЛ-3-2Р, СИАЛ-3-1Р различных размеров.

Показано, что применение выбранного клеевого связующего ВСК-14-2мР (СИАЛ-1-4Р, СИАЛ-3-2Р, СИАЛ-3-1Р) для клеевого препрега с ровингом обеспечивает менее интенсивную сорбцию влаги по сравнению с алюмостеклопластиком СИАЛ-3 на основе клеевого препрега с тканью и клеевым связующим ВСК-14-1. Для однонаправленных структур (СИАЛ-1-4Р) интенсивность влагонасыщения более выражена, по сравнению с равнопрочными структурами (СИАЛ-3-1Р и СИАЛ-3), и зависит от направления вырезки образцов (см. рисунки 5.39, б и 5.40, б).



а б

Рисунок 5. 39 – Кинетика сорбции влаги в образцах алюмостеклопластиков: а – продольные, б – поперечные



а б

Рисунок 5.40 – Кинетика сорбции влаги в образцах алюмостеклопластиков: а – продольные, б – поперечные

Выводы по главе 5

1. В результате исследований служебных свойств разработанных слоистых алюмостеклопластиков установлено:

- использование армирующего наполнителя в стеклопластике из высокопрочных высокомодульных стеклянных волокон позволяет получить высокий уровень прочности и модуля упругости алюмостеклопластиков: σ_B – 1100-1200 МПа и E до 72 ГПа для однонаправленных структур СИАЛ, σ_B – 600-700 МПа и E до 65 ГПа для перекрестно-армированных структур СИАЛ;

- в образцах из слоистых материалов за счет слоев из стеклопластика усталостная трещина развивается медленнее (dl/dN = 0,15-0,20 мм/кцикл при $\Delta K = 31$ МПа·м$^{1/2}$), чем в монолитных материалах;

- уровень малоцикловой усталости алюмостеклопластиков зависит от укладки слоев стеклопластика и их схем армирования: на продольных образцах СИАЛ-1-1Р с однонаправленной схемой армирования долговечность выше – среднее число циклов до разрушения

$N_{ср}$=147 000 циклов при напряжении $\sigma_{мах}$=157 МПа, по сравнению с $N_{ср}$=134 650 циклов для образцов СИАЛ-3-1Р с перекрестным армированием;

- за счет повышенной пластичности связующего в составе стеклопластика материалы СИАЛ показали высокую стойкость к ударным нагрузкам от свободно падающего груза;

- применение алюмостеклопластиков на базе листов из Al-Li сплавов 1441 и В-1469 в деталях позволяет снизить их массу на 9-15 % за счет пониженной плотности и повышенного модуля упругости по сравнению с деталями из листов алюминиевых сплавов.

2. Установлено, что слоистые алюмостеклопластики обладают более высокой стойкостью при воздействии пламени с температурой 1100 °С в течение 15-30 минут по сравнению с листами из монолитных алюминиевых сплавов и обеспечивают температуру на тыльной стороне СИАЛ 160-220 °С, что позволяет применять данный материал в пожароопасных зонах авиационных конструкций: противопожарных перегородках, в зонах обшивок фюзеляжа, пола и багажно-грузового отсека.

3. Разработан стандарт организации СТО 1-595-20-532-2017 для оценки огнестойкости и огненепроницаемости слоистых материалов СИАЛ, предназначенных для пожароопасных зон в авиационной технике.

4. Показано, что молниестойкость алюмостеклопластиков толщиной 1,3-1,5 мм сопоставима с молниестойкостью монолитных панелей из листов сплава 1441 толщиной 2,5 мм. При ударе молнией зоны поражений в алюмостеклопластиках ограничиваются повреждением только наружного металлического слоя.

5. При условии антикоррозионной защиты внешних поверхностей, торцев и отверстий под крепеж, в деталях из алюмостеклопластиков обеспечивается повышенная коррозионная стойкость. Способом защиты этих поверхностей является нанесение грунтов, эмалей, герметиков по схемам в соответствии с требованиями конструкторской документации.

6. Результаты оценки влагопоглощения слоями стеклопластика в образцах СИАЛ при непосредственном контакте с коррозионной средой показали, что применение клеевого связующего ВСК-14-2мР для клеевого препрега с ровингом обеспечивает снижение в 3 раза интенсивности сорбции влаги, по сравнению с ранее используемым клеевым связующим ВСК-14-1, в алюмостеклопластиках СИАЛ-3 на основе клеевого препрега с тканью. Для однонаправленных структур СИАЛ интенсивность влагонасыщения более выражена по сравнению с равнопрочными структурами алюмостеклопластиков и зависит от направления вырезки образцов.

Глава 6 Исследование влияния технологических процессов при изготовлении и формообразовании конструктивных элементов на структуру и свойства алюмостеклопластиков

Изготовление деталей конструкций из алюмостеклопластиков и сборочные процессы требуют особых подходов по сравнению с традиционно применяемыми листами из алюминиевых сплавов.

6.1 Оценка параметров резки, сверления и гибки листовых заготовок алюмостеклопластиков

При формообразовании и изготовлении деталей из алюмостеклопластиков, компоненты которого имеют разные физико-механические характеристики, возможно использование традиционных технологических процессов и оборудования, применяемых для монолитных материалов.

Однако имеются и определенные отличия, связанные, прежде всего, с существенно меньшей технологической пластичностью слоев армированного пластика и наличием границ раздела между компонентами при слоисто-волокнистом строении. Следует учитывать и различие других свойств полимерных слоев (высокую прочность волокон, пониженные жесткость и сопротивление сжатию), а также анизотропию свойств листов композиционного материала с учетом направлений укладки препрега в стеклопластике.

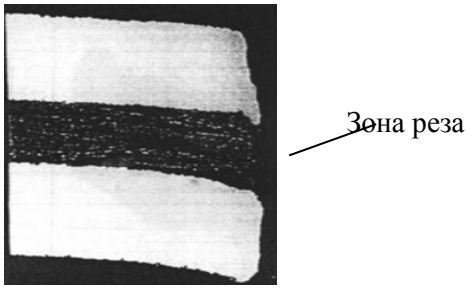
В связи с вышесказанным необходима корректировка параметров режимов резки, формообразования, механической обработки, клепки и др.

При изготовлении деталей из СИАЛ основными операциями являются формирование и фрезерование контура, сверление, развертывание и зенкование отверстий.

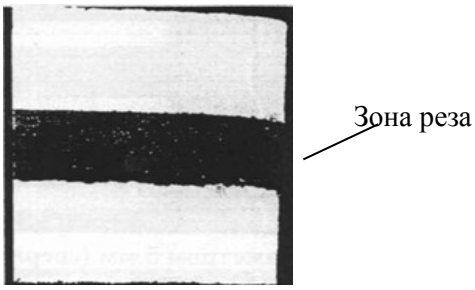
При механической обработке СИАЛ отмечается быстрый износ инструмента, вызваный повышенной твердостью стеклянных волокон. Резание изношенным инструментом не позволяет получать качественную обработанную поверхность и вызывает интенсивный нагрев зон обработки, приводящий к расслоению материала.

Анализ состояния кромок подтверждает, что при резке трех- и пятислойных СИАЛ толщиной 1,2-2,2 мм на основе сплава 1441 различными методами повреждению подвергаются в основном кромки (изгиб, деформация, образование заусенцев, выкрашивание компонентов связующего в слое стеклопластика и др.), ширина деформированной зоны не превышает 2 мм. При этом ширина деформированной кромки алюминиевых листов не превышает 1 мм (рисунок 6.1) [217]. Исследование характера деформации кромок после резки различными способами, в зависимости от требований к кромкам детали, позволяет выбрать оптимальную технологию и инструмент.

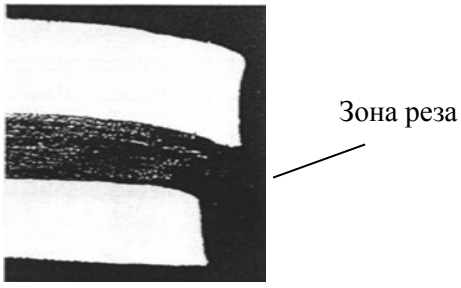
Для получения качественной кромки рекомендуется оставлять технологический припуск для последующей чистовой обработки фрезерованием или зачистки ручным инструментом.



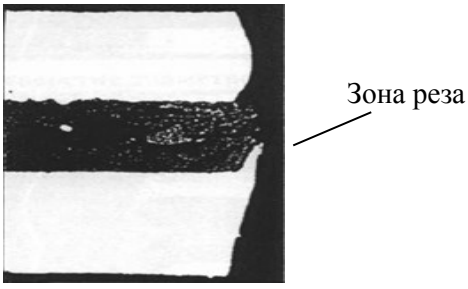
Раскрой на гильотинах



Раскрой рычажными ножницами



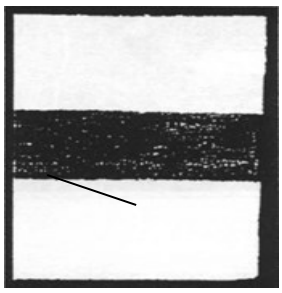
Раскрой ручными ножницами



Ручная обработка ножовочным полотном

Рисунок 6.1 – Состояние кромок после резки СИАЛ различными способами

Зона обработки



Зона реза

Обработка напильником

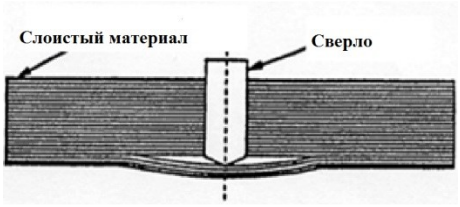
Станочная обработка фрезой

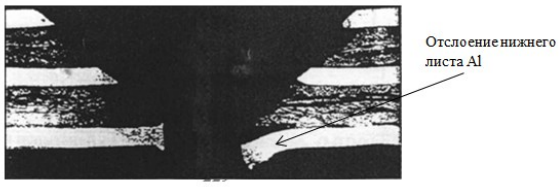
Рисунок 6.1 (продолжение) – Состояние кромок после резки СИАЛ различными способами

Для алюмостеклопластиков предъявляются требования к качеству поверхности и точности размера отверстий под установку заклепок, аналогичные требованиям нормативной документации для алюминиевых сплавов.

При нарушениях технологии сверления (без технологической опоры) в зоне выхода инструмента могут образовываться расслоения и заусенцы на выходе сверла, а при изношенной режущей кромке – местные вырывы и разрывы материала в зоне реза.

Для исключения отслоений на выходе сверла при сверлении отверстий (рисунок 6.2, а, б) и при резке заготовок дисковой фрезой необходимо использовать технологические опоры, обеспечивающие надежный прижим [217].





а б

Рисунок 6.2 – Характер возможных отслоений нижних слоев (а) и отслоение нижнего Al листа с образованием заусенцев при сверлении без технологического прижима на выходе инструмента в образце алюмостеклопластика (б)

Для исследования и оценки технологических возможностей слоистого материала СИАЛ при сверлении, клепке и формообразовании были подготовлены образцы из листовых заготовок алюмостеклопластика СИАЛ-3-1Р толщиной 1,5 мм с применением листов толщиной 0,25 мм из сплава 1441Т12. В образцах предусматривали зону искусственного непроклея. Изучали поведение слоев в структуре материалов после установки заклепок из сплава В65 и их высверливания. Клепку осуществляли прессовым и ударным методами. Общий вид образцов СИАЛ представлен на рисунке 6.3.

Сверление отверстий проводили острозаточенными сверлами в два перехода (при предварительном сверлении диаметр отверстия на 0,5-1,5 мм меньше номинального) для исключения появления расслоений в зоне выхода сверла, заусенцев и др. повреждений с использованием технологической опоры.

Зенкование гнезд с углом 90° и 120° под потайные головки заклепок, а также контроль их качества проводили методами и средствами в соответствии с действующей нормативной документацией.

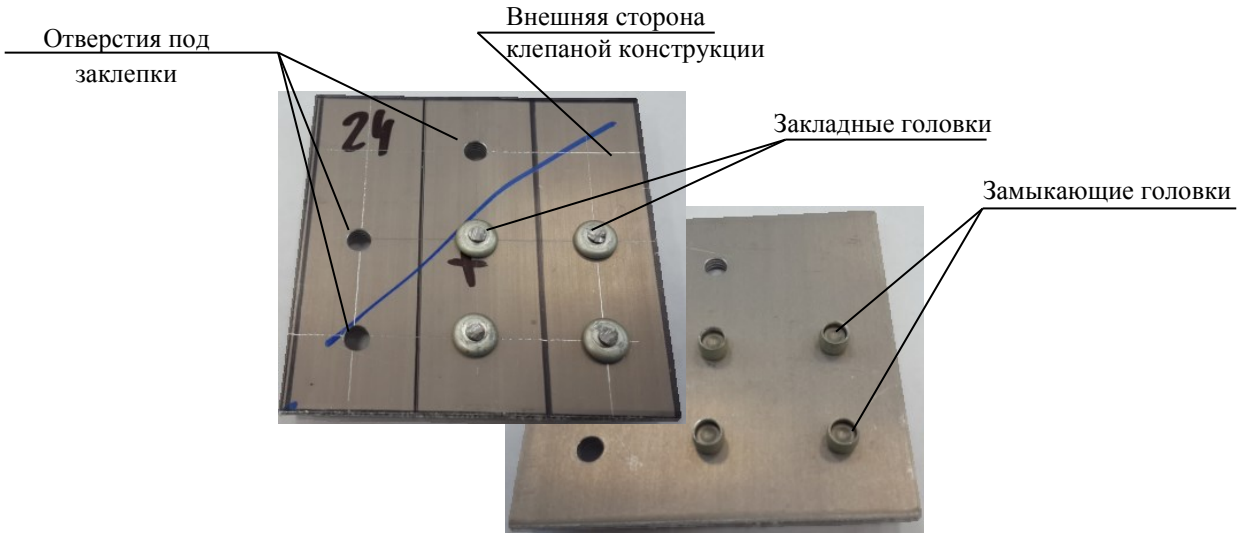


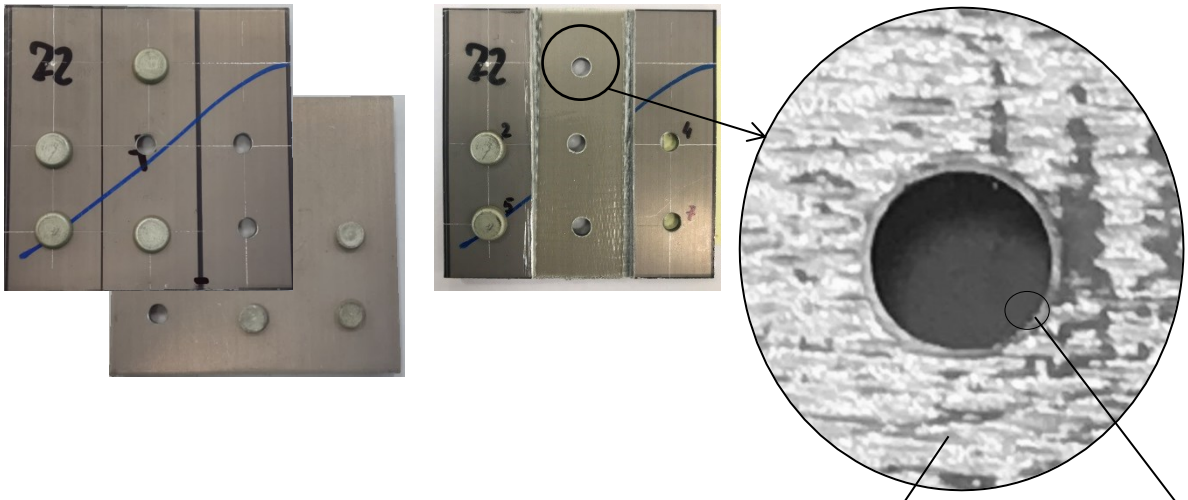
Рисунок 6.3 – Образцы СИАЛ с просверленными отверстиями и установленными заклепками

Так как соединения в конструкциях выполняются разнотипными заклепками (рисунок 6.4), в работе проводили сравнительные исследования качества заклепочных соединений с использованием различных видов применяемых заклепок (таблица 6.1).

Качество заклепочного соединения в значительной степени зависит от состояния отверстий до и после клепки, поведения материала при деформации отверстий при осадке заклепки, наличия натягов в соединениях и способов клепки. При визуальной оценке состояния поверхности стеклопластика после удаления заклепок и верхнего металлического листа в зоне клепки повреждений образцов СИАЛ-3-1 не обнаружено.

Таблица 6.1 – Перечень заклепок для отработки технологии клепки и оценки состояния заклепочных соединений

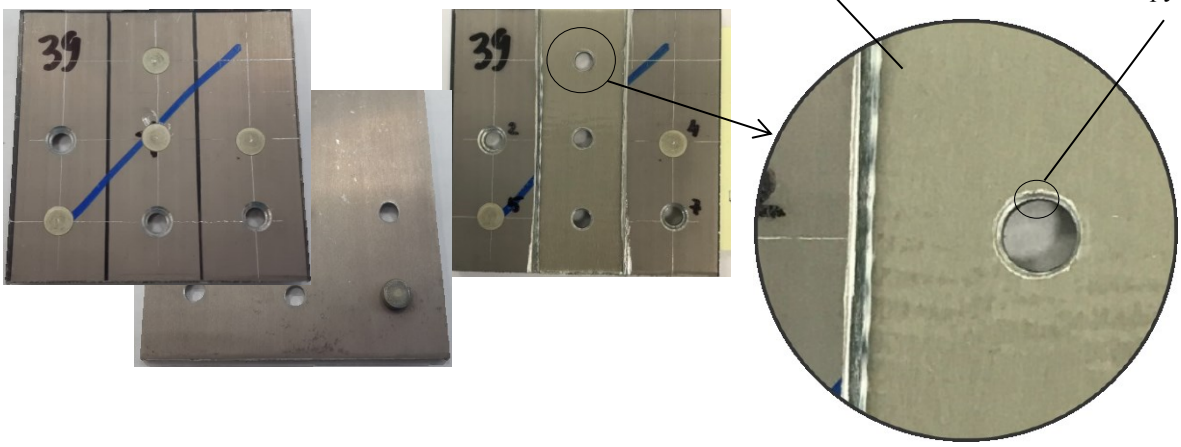
№ п/п	Вид заклепки	
	Название	НД
1	С плоско-скругленной головкой	ОСТ 1 34076-85
2	С уменьшенной потайной головкой	ОСТ 1 11647-74
3	С уменьшенной потайной головкой с компенсатором	ОСТ 1 34047-80
4	С плоско-скругленной головкой с сердечником	ОСТ 1 11296-74



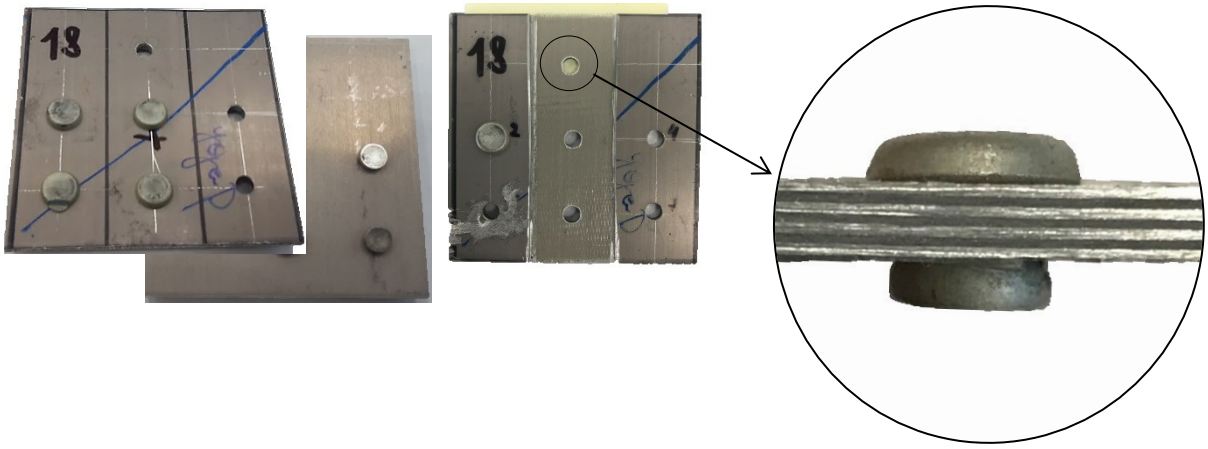
а – прессовая установка заклепки

В зоне отверстия после клепки дефектов стеклопластика не обнаружено

Поверхность со снятым верхним листом Al-Li сплава после удаления заклепки

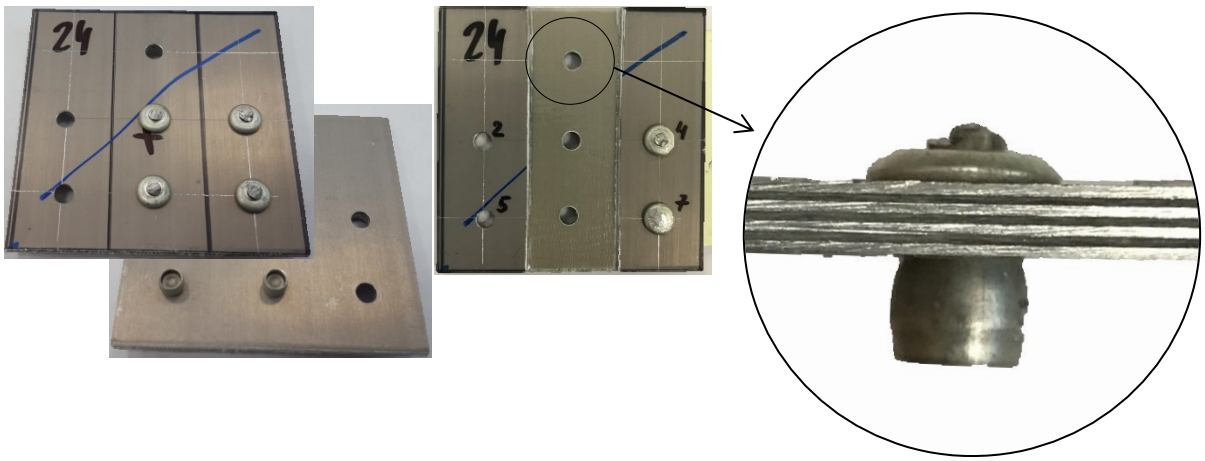


б – прессовая установка потайной заклепки

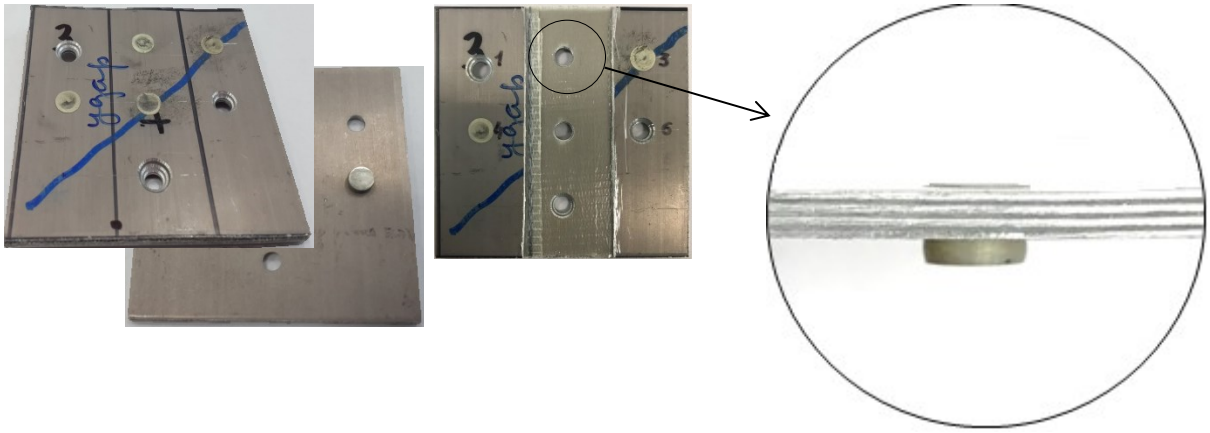


в – ручная ударная установка заклепки

Рисунок 6.4 – Виды заклепочных соединений



г – клепка односторонними заклепками

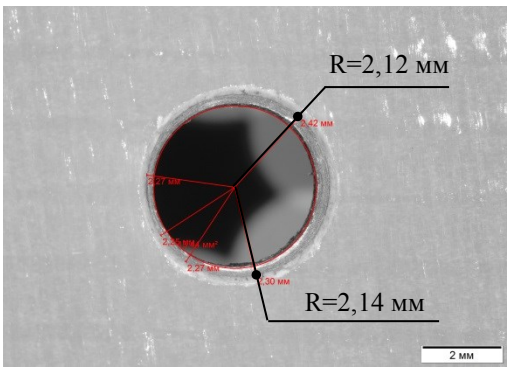


д – клепка заклепками с компенсатором

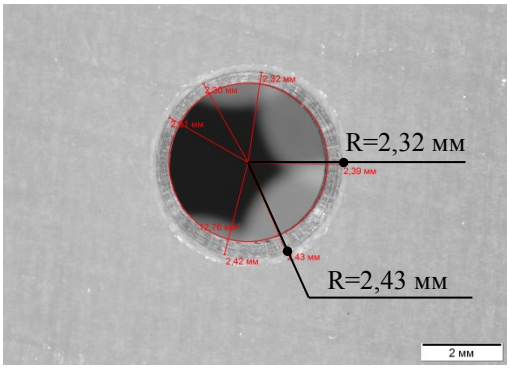
Рисунок 6.4 (продолжение) – Виды заклепочных соединений

Проведены эксперименты на специальных образцах с оценкой поведения стеклопластика в заклепочных соединениях.

На рисунке 6.5 показаны кромки отверстий до установки заклепок и после их удаления. Результаты замеров диаметров отверстий заклепок представлены в таблице 6.2.



а



б

Рисунок 6.5 – Кромки отверстий: а – до установки,

б – после удаления заклепок

Отверстия сохранили свою форму с некоторым увеличением диаметра в соответствии с уровнем напряжений при установке (осадке) заклепки. Трещин, расслоений и деформации пакета СИАЛ в зоне отверстий не обнаружено.

По результатам проведенных испытаний установлено, что сверление отверстий в пакете из разных материалов, резко отличающихся по своим физико-механическим характеристикам, практически не повлияло на точность диаметра и качество поверхности отверстий.

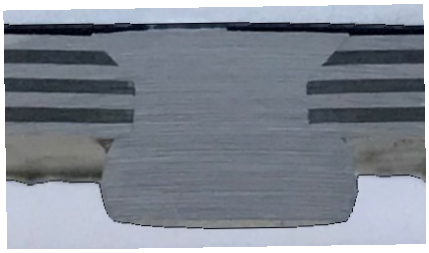
Таблица 6.2 – Замеры отверстий до и после постановки заклепок

Вид заклепки	Метод установки заклепки	Диаметр отверстия под заклепку, мм			Диаметр отверстия после удаления заклепки, мм		
		Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.	Среднее
Заклепка с плоско-скругленной головкой	Ударный	4,09	4,14	4,12	4,14	4,20	4,18
		4,18	4,24	4,21	4,20	4,24	4,22
		4,14	4,18	4,16	4,24	4,26	4,25
	Прессовый	4,19	4,26	4,22	4,14	4,21	4,18
		4,11	4,26	4,19	4,20	4,22	4,21
		4,14	4,18	4,16	4,20	4,26	4,23
Заклепка с уменьшенной потайной головкой	Прессовый	4,12	4,14	4,13	4,24	4,26	4,25
		4,10	4,16	4,13	4,22	4,24	4,23
		4,12	4,10	4,11	4,20	4,24	4,22
Заклепка с уменьшенной потайной головкой с компенсатором	Ударный	4,12	4,16	4,14	4,24	4,26	4,25
		4,18	4,24	4,21	4,22	4,28	4,25
		4,10	4,16	4,13	4,25	4,28	4,27
Заклепки с плоско-скругленной головкой с сердечником	Прессовый	4,10	4,12	4,11	4,19	4,23	4,21
		4,06	4,08	4,07	4,12	4,15	4,14

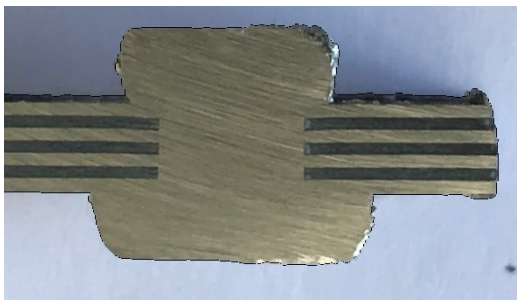
1 Примечание – Замер диаметров отверстий проводили с лицевой и обратной стороны образцов

Установлено незначительное расхождение в размерах диаметров отверстий (до 0,26 мм) на входе и выходе инструмента (см. рисунок 6.5), которое компенсируется при установке заклепок (заполняется телом заклепок).

Анализ структуры заклепочных соединений не выявил расслоений в листах СИАЛ-3-1Р и трещин в стеклопластике. В ряде случаев наблюдалось образование гофра, деформация алюминиевых листов и обжатие пластика до 1,2 % в зонах замыкающих головок (рисунок 6.6).



а



б

Рисунок 6.6 – Формирование заклепочных соединений в алюмостеклопластиках:
а – заклепка с потайной головкой,
б – заклепка с плоско-скругленной головкой

Для применения в изделиях авиационной техники деталей из алюмостеклопластиков взамен деталей из традиционных материалов с целью снижения веса и повышения служебных характеристик конструкций, проведены исследования процессов подсечки, гибки, листовой штамповки и отбортовки, а также их влияния на состояние металлических внешних слоев и слоев стеклопластика после деформации.

Для определения конструктивно-технологических возможностей деформации слоистых металлополимерных материалов проведена оценка состояния слоев стеклопластика при изгибах заготовок, как в зонах растяжения, так и в зонах сжатия на образцах с определением минимально допустимого радиуса гибки до сохранения целостности стеклопластика в пакете материала СИАЛ.

По стандартной методике был определен минимальный радиус гибки R_{min} образцов СИАЛ, при котором образец не имел на поверхности визуально различимых дефектов (трещин, следов локализации деформации (утонения)).

Критические размеры радиусов гибки слоистого материала СИАЛ определяются, главным образом, способностью стеклопластика к деформации. По результатам эксперимента на образцах СИАЛ-3-1Р (4/3) толщиной 2,2 мм с искусственным непроклеем с учетом расположения зон растяжения и сжатия установлено, что при гибке с радиусами 10 мм и 20 мм

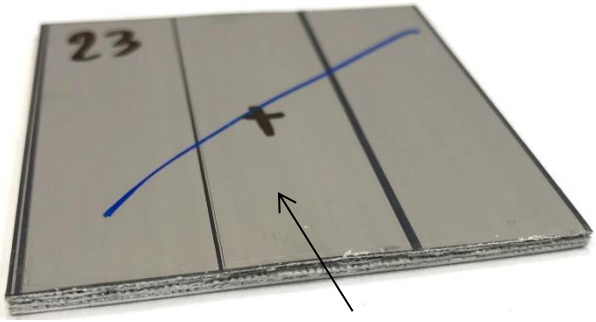
в зоне растяжения образца наблюдаются разрушения и трещины стеклопластика, а в зоне сжатия обнаружено частичное расслоение. При деформации с радиусом 50 мм на образцах СИАЛ по всему сечению дефектов не обнаружено (рисунок 6.7).

По результатам проведенных испытаний было установлено, что окончательно изготовленный слоистый материал СИАЛ-3-1Р (4/3) толщиной 2,2 мм обладает удовлетворительной технологической пластичностью при изгибе с минимально допустимым радиусом гибки R_{min} не менее 50 мм.

Формообразование деталей методом послойной выкладки с последующей термообработкой под давлением позволяет получать детали, в том числе гнутые профили, с радиусами перехода практически без ограничений.

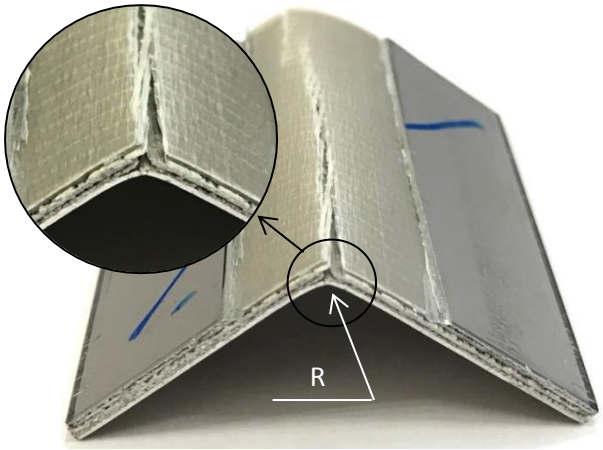
При изготовлении гнутых профилей из СИАЛ методом свободной гибки на профилегибочных машинах или методом стесненного изгиба необходимо учитывать минимально допустимый радиус гибки.

По результатам оценки состояния материала в зонах деформаций заготовок из СИАЛ после применения операций гибки, резки, сверления и др. можно утверждать, что поведение алюмостеклопластиков аналогично монолитному листу за исключением некоторых поправок по соотношениям толщины листового материала и величины деформаций.



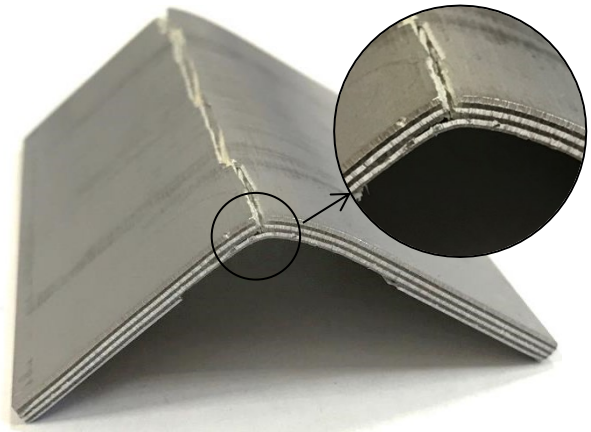
Зона непроклея наружного слоя с одной стороны листа с полосой фторопластной ленты шириной 20 мм

а



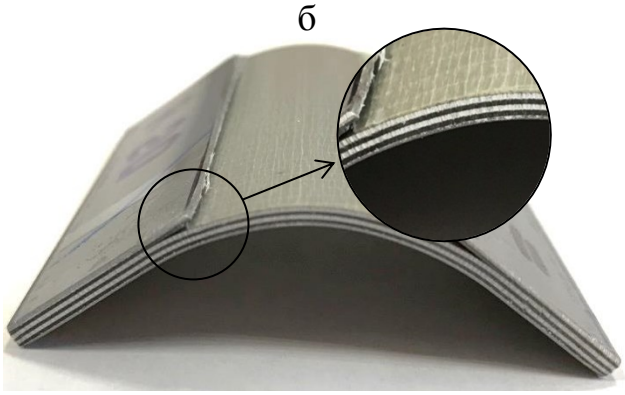
Трещины стеклопластика в зоне изгиба

б

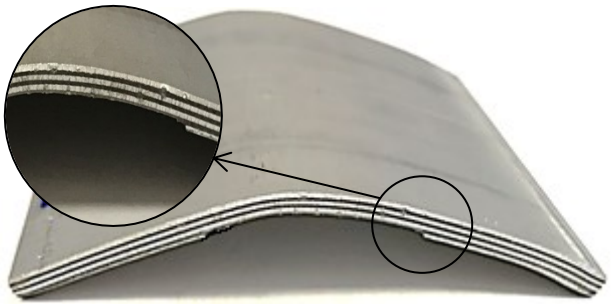


Трещины в верхнем металлическом листе, частичное расслоение материала в зоне изгиба

в



г



д

Рисунок 6.7 – Общий вид образцов из СИАЛ-3-1Р (4/3) толщиной 2,2 мм после испытания на изгиб: а – исходное состояние; б, в – с радиусом гибки R = 10 мм в зоне растяжения и сжатия стеклопластика; г – с радиусом гибки R = 20 мм в зоне растяжения; д – с радиусом гибки R = 50 мм в зоне сжатия

6.2 Разработка силовой схемы распределения нагрузок слоистой гибридной панели, проектирование 3D модели и изготовление конструктивно-подобных образцов

Проектирование, изготовление и испытание конструктивно-подобных образцов с целью сравнительной оценки эффективности использования в гибридной конструкции слоистого материала СИАЛ и полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов, взамен традиционных конструкций из алюминиевых сплавов, показано на примере прототипа фрагмента верхней панели отсека центроплана самолета Ту-204.

Силовая схема распределения нагрузок панели центроплана самолета Ту-204 представлена на рисунке 6.8.

Для сравнительных испытаний выбран фрагмент верхней панели центроплана из зоны наибольших эксплуатационных напряжений, полученных при расчете на прочность. Выбор конструктивных параметров фрагмента проводился с сохранением несущей способности традиционной и гибридной панелей крыла:

$$P_{\text{традиционной панели}} = P_{\text{гибридной панели.}}$$

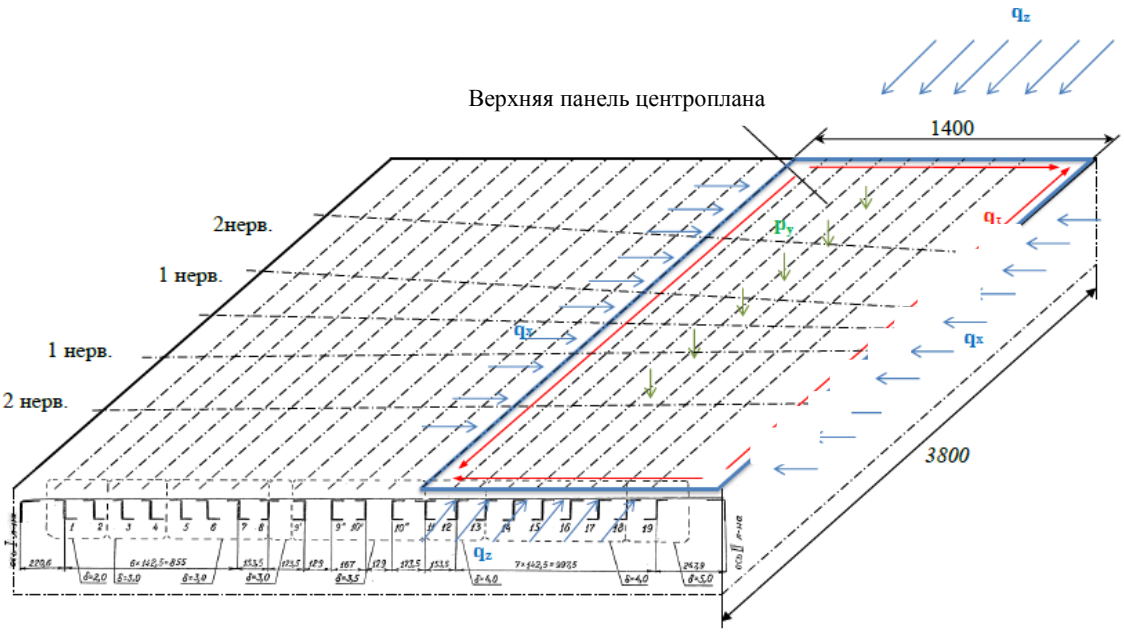


Рисунок 6.8 – Выбранный фрагмент панели центроплана с учетом схемы распределения нагрузок

При разработке конструктивно-силовой схемы гибридной панели (рисунок 6.9) было проведено сравнение напряженно-деформированного состояния, рассчитанного методом конечных элементов. Были построены конечно-элементные модели для фрагментов четырехстрингерных панелей центроплана размером 455,5×600 мм: фрагмента гибридной панели с использованием листов и прессованных профилей из сплавов В-1469, 1441 и панели прототипа из листов и профилей серийного сплава В95очТ2 [176].

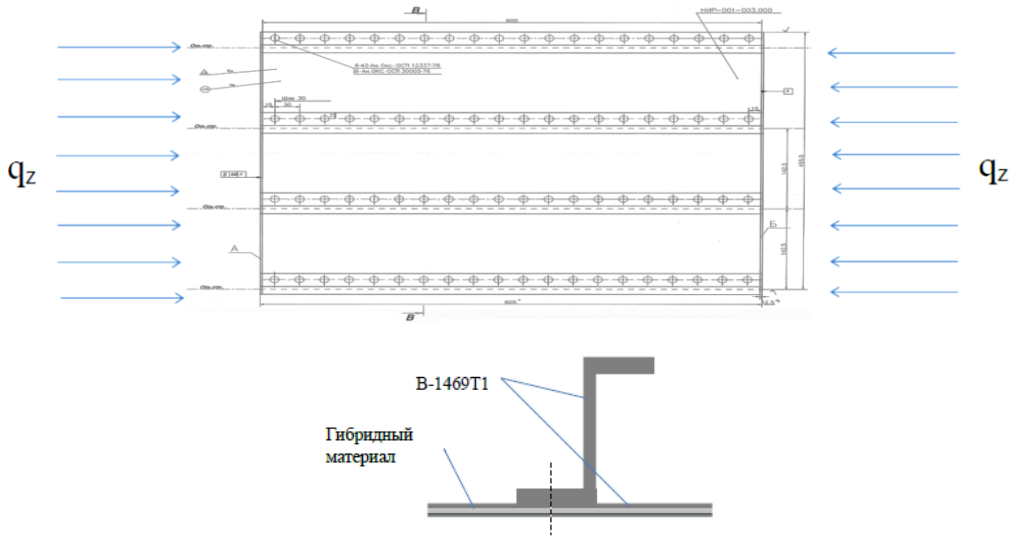


Рисунок 6.9 – Эскиз конструктивно-силовой схемы гибридной панели центроплана

Максимальные напряжения в панели центроплана самолета Ту-204 возникают в районе стрингеров при среднем нормальном напряжении (обшивка + стрингер) $\sigma_z \approx -360$ МПа [176]. В качестве расчетных приняты сжимающие нагрузки в верхней панели центроплана от потока $q_z \approx -3000$ Н/мм. Определены площади поперечных сечений стрингеров с учетом рассчитанной толщины обшивки.

При расчете несущей способности гибридных панелей на сжатие за основу был принят расчет панелей из монолитных материалов. Механические характеристики слоистого материала были получены расчетом с использованием математической модели (см. главу 4.1), при этом обшивку рассматривали как монолитный материал [176-178, 218].

На базе конструктивно-силовой схемы фрагмента верхней панели центроплана, работающей на сжатие, определены параметры гибридной панели (рисунок 6.10):

- габариты панели 455,5×600 мм с четырьмя элементами жесткости (прессованными стрингерами) и обшивкой из слоистого материала;

- стрингер Z-образного сечения из алюминий-литиевого сплава В-1469Т1 с шагом установки стрингеров $t_{стр}$=142,5 мм;

- обшивка толщиной ~ 5,0 мм из алюмостеклопластика (структура № 10, см. таблицу 4.17, глава 4.6) имеет следующую структуру: листы толщиной 1,5 мм из сплава В-1469, листы толщиной 0,35 мм из сплава 1441, чередующиеся с четырьмя слоями стеклопластика;

- расчетная несущая способность слоистой гибридной панели при сжатии должна соответствовать несущей способности прототипа и составлять не менее $q_{н.с.}$≈ 3000 кН/м.

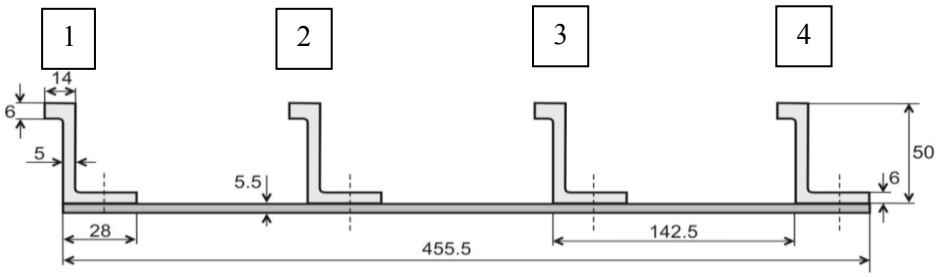
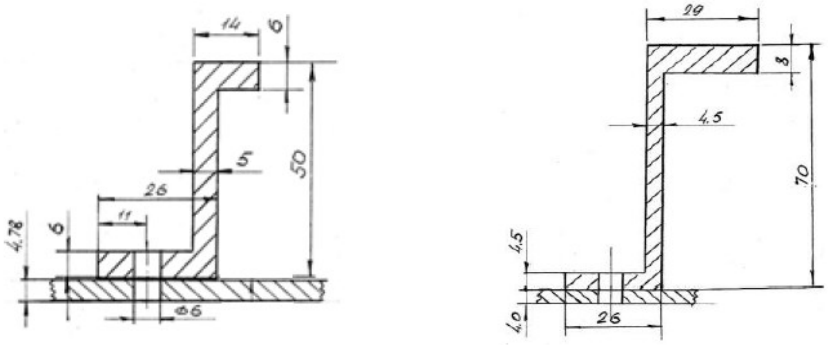


Рисунок 6.10 – Поперечное сечение панели центроплана с обшивкой из слоистого материала

Таблица 6.3 – Силовые факторы при расчете несущей способности четырехстрингерного образца из фрагмента слоистой гибридной панели

№ стрингера	Силовые факторы потери устойчивости		
	Критическое напряжение, $\sigma_{нс}$	Суммарный поток сил, $Q_{нс}$	Нагрузка, $P_{нс}$
	МПа	кН/м	кН
1	463	4402	412
2	430	3041	518
3	430	3041	518
4	463	4402	412
Максимальная суммарная несущая способность, кН:			1860

Выбор сечения и расчет прессованного профиля основывался на сравнении с сечением и материалом профиля в исходной панели по прочности, жесткости и габаритным характеристикам. Полученная расчетом несущая способность при сжатии образца из сплава В95очТ2 составила 1570 кН, а максимальная несущая способность слоистой гибридной панели – 1860 кН (таблица 6.3). По результатам расчетов определено оптимальное сечение профиля из сплава В-1469 (рисунок 6.11, а), отличающееся от сечения профиля из сплава В95очТ2 (рисунок 6.11, б) [176-178, 218-221].



а б

Рисунок 6.11 – Габариты стрингеров: а – прессованный профиль из сплава В-1469, б – прессованный профиль из сплава В95очТ2

Характер деформации конструктивно-подобного образца в момент потери устойчивости показан на рисунке 6.12 в виде расчетной математической модели для гибридной конструкции панели со слоистой обшивкой и стрингеров из Al-Li сплавов.

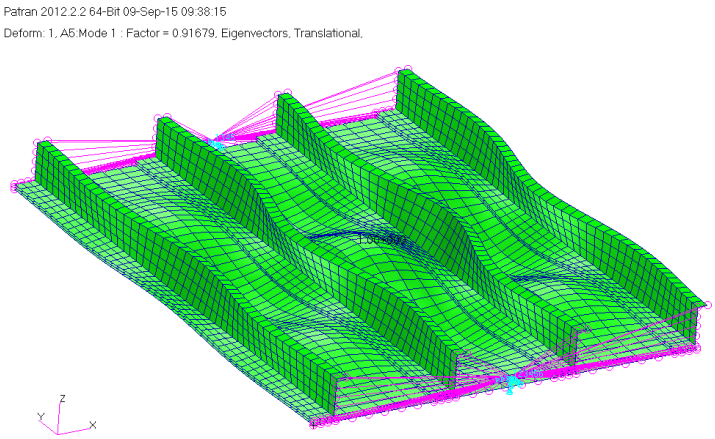


Рисунок 6.12 – Характер деформации при потере устойчивости конструктивно-подобного образца

В расчетах не учитывалось снижение жесткости фрагмента панели из-за местной потери устойчивости элементов конструкции, которая снижает величину критической нагрузки и предшествует общей потере устойчивости фрагментов панели. Предположительно, в данном случае значение критической нагрузки $P_{кр}$ = 2100×0,91679 = 1925 кН является завышенным.

Представленная конструктивно-силовая схема позволила уменьшить сечение стрингера, что привело к уменьшению площади поперечного сечения гибридной панели центроплана.

По разработанным чертежам в промышленных условиях ПАО «ВАСО» изготовлены четырехстрингерные конструктивно-подобные образцы фрагмента слоистой гибридной панели центроплана со слоистой обшивкой из чередующихся слоев металлических листов и стеклопластиков, силовым набором из прессованных профилей (рисунок 6.13).

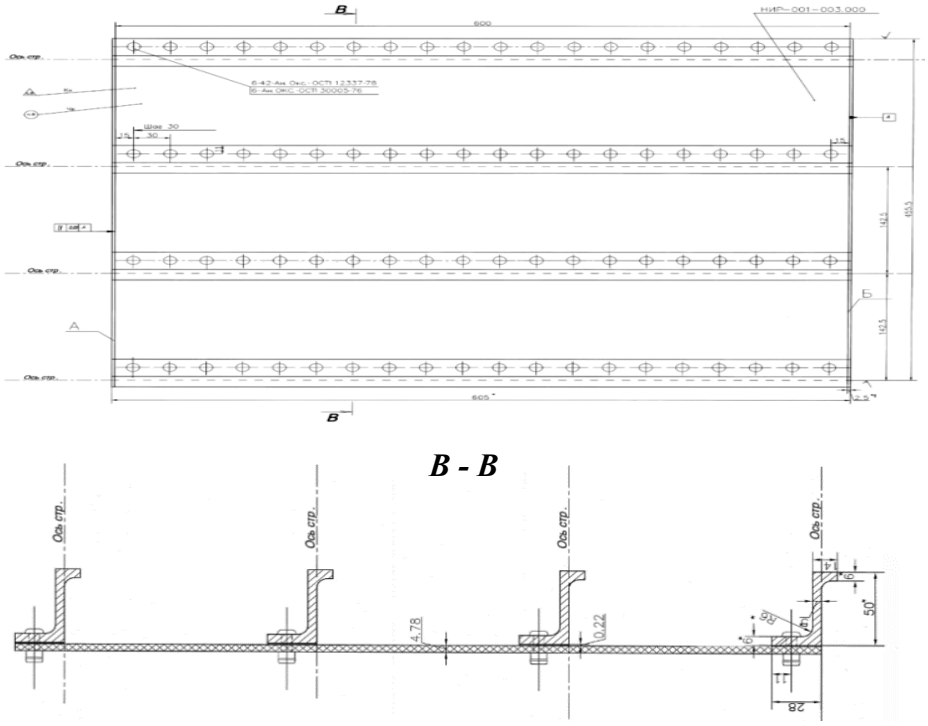


Рисунок 6.13 – Фрагмент панели центроплана с обшивкой из слоистого материала и силового набора из профилей

Крепление стрингеров к обшивке осуществляли с помощью болтовых соединений, хорошо работающих на срез (использовали болты с

уменьшенной шестигранной головкой из титанового сплава ВТ 16) (рисунок 6.14) [222]. Оценку качества постановки крепежа проводили визуально с помощью лупы.

На оборудовании самолетостроительного объединения ПАО «ВАСО» по разработанной технологии (ТР 1.2.2403-2015) изготовлены конструктивно-подобные образцы с обшивкой из слоистого материала и прессованными стрингерами с использованием болтовых соединений для определения несущей способности при сжатии и весовой эффективности при применении материалов СИАЛ взамен традиционных алюминиевых сплавов. Результаты испытаний приведены в главе 7.3.

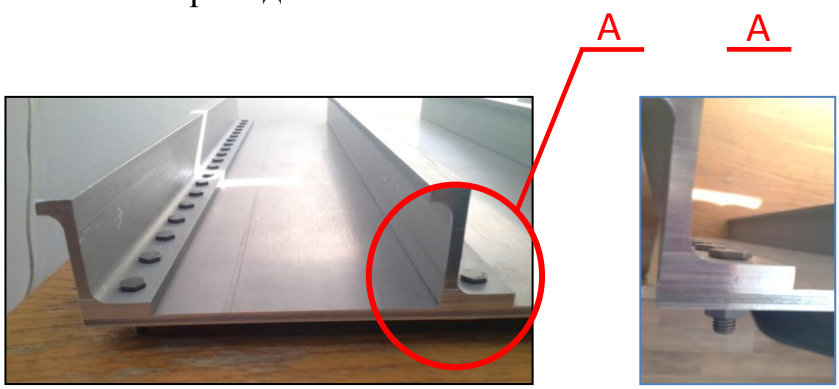


Рисунок 6.14 – Общий вид конструктивно-подобного образца фрагмента панели центроплана с обшивкой из слоистого материала

При изготовлении ребристых панелей, выполненных механической обработкой и последующим формообразованием из монолитных плит, коэффициент использования материала (КИМ) колеблется в пределах 0,12-0,30.

Повышение КИМ до 0,35-0,45 обеспечивается в случае использования комбинированных панелей, в которых полотно обшивки изготавливают фрезерованием с формированием усиления для установки стрингерного набора.

При оптимальном раскрое листовых заготовок и оптимизации укладки, минимизирующей последующую механическую обработку поверхностей

формируемых деталей, обеспечивается КИМ в пределах до 0,75-0,80, а суммарно с приклепанными стрингерами из прессованных профилей – до 0,65-0,70.

По разработанной технологии (ТР 1.2.2697-2018) была изготовлена створка капота двигателя вертолета Ка-226Т с обшивкой из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ-2-1Р [210].

При изготовлении деталей и конструктивно-подобных образцов сложной криволинейной формы (двойной кривизны) основное внимание уделяли проектированию 3D моделей, изготовлению и доработке технологической оснастки с учетом пружинения деталей в процессе изготовления для обеспечения соответствия геометрических параметров готовых деталей.

Выводы по главе 6

1. Изучены процессы гибки, резки, фрезерования, сверления отверстий в заготовках из слоистого материала. Показано, что качество поверхностей кромок и отверстий соответствует требованиям к отверстиям в обычном монолитном материале.

2. Установлен минимально допустимый радиус гибки R_{min} для формообразования деталей из алюмостеклопластиков СИАЛ-3-1Р (4/3) толщиной 2,2 мм, который составляет не менее 50 мм.

3. Проведена оценка состояния слоев стеклопластика в заклепочных соединениях слоистого материала. Показано, что трещины в стеклопластике, а также деформации и расслоения по толщине образцов СИАЛ отсутствуют.

4. Изготовлены по разработанным технологиям конструктивно-подобные образцы с обшивками из слоистых материалов с использованием полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов для определения несущей способности при сжатии, долговечности, огненепроницаемости и весовой эффективности в сравнении с конструкциями из традиционных материалов.

Глава 7 Опробование алюмостеклопластиков в деталях и конструктивно-подобных образцах

В конструкциях планера самолетов Бе-200, Бе-103 (рисунок 7.1) в настоящее время взамен традиционного алюминиевого сплава 1163 нашли применение листы и профили из алюминий-литиевого сплава 1441, обеспечивая снижение массы агрегатов до 10 %. Положительный опыт использования данных материалов в конструкциях подтвердил, что полуфабрикаты из сплава 1441 обеспечивают повышенный ресурс и коррозионную стойкость гидросамолетов в условиях эксплуатации [130].

а

б

Рисунок 7.1 – Самолеты-амфибии: легкий Бе-103 (а) и многоцелевой Бе-200 (б)

Применение листов из алюминий-литиевых сплавов, взамен алюминиевых сплавов традиционных систем легирования, в слоистых материалах СИАЛ позволяет увеличить весовую эффективность алюмостеклоплатиков [225-229].

С применением алюмостеклопластиков были изготовлены конструктивно-подобные образцы со стрингерным набором и элементы гибридных конструкций:

- панель отсека фюзеляжа самолета с использованием обшивки из слоистого материала СИАЛ-3-1Р;
- фрагмент гибридной панели крыла самолета Ту-204 с обшивкой из алюмостеклопластика с использованием в структуре Al-Li сплава 1441;

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

7.1 Конструктивно-подобный образец панели отсека фюзеляжа самолета с обшивкой из алюмостеклопластика

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 алюмостеклопластика СИАЛ-3-1Р толщиной 1,5 мм (КПО № 1, рисунок 7.2) и листов из алюминиевого сплава 1163АТВ (КПО № 2) и стрингерами из профилей сплава Д16Т.

Изготовление конструктивно-подобных образцов панели отсека фюзеляжа с применением слоистого материала СИАЛ проводили по разработанной технологической рекомендации ТР 1.2-2265-2012.

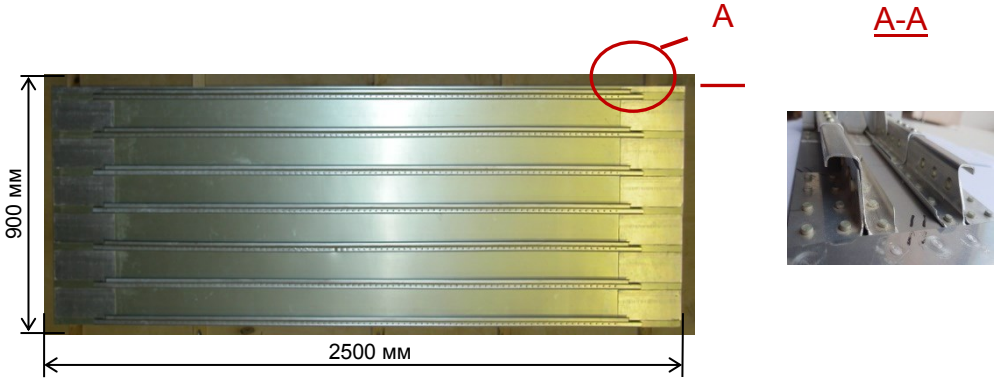


Рисунок 7.2 – Фрагмент верхней панели отсека фюзеляжа

На основании анализа результатов проведенных совместно с ФГУП «ЦАГИ» сравнительных испытаний с оценкой усталостных характеристик и скорости роста трещин (Протоколы испытаний № 25, 26 от 20.10.2012 г.), сделаны следующие выводы:

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

- ресурсные характеристики конструктивно-подобных образцов с обшивкой из СИАЛ-3-1Р, разрушение которой произошло при N_1 = 307 634 циклов нагружения, выше примерно в 2 раза по сравнению с панелью с обшивкой из листов сплава 1163АТВ, разрушившейся при циклическом нагружении при N_2 = 159 435 циклов.

7.2 Створка капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого алюмостеклопластика

В целях снижения массы и повышения огнестойкости конструкции изготовлены по разработанной технологии натурные образцы капота облегченной конструкции из алюмостеклопластика СИАЛ-2-1Р толщиной 1,2 мм (рисунок 7.3) и проведена их сравнительная оценка с капотом двигателя вертолета Ка-226Т с обшивкой из титанового сплава ОТ4-1. Показано снижение массы створки капота до 20 % и увеличение времени прогорания обшивки капота (более 15 мин) при воздействии пламени с температурой 1100 °С [210, 227] (Акт № 053А-191115 от 15.11.2019 г. (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.

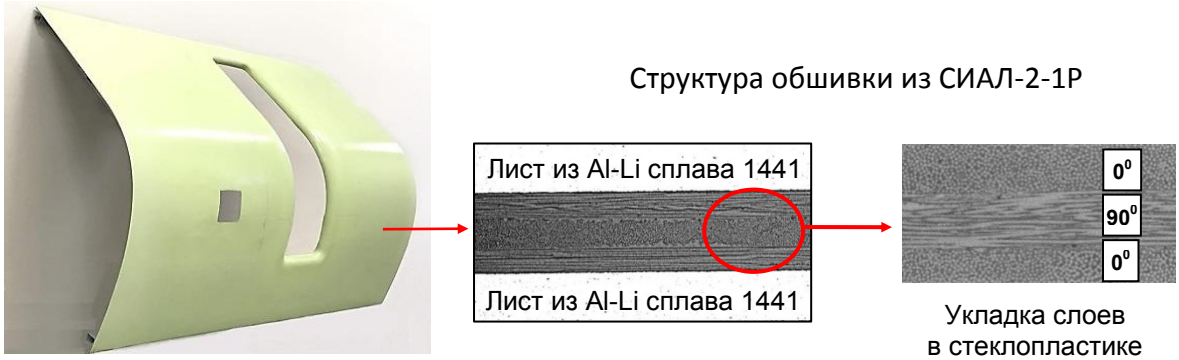


Рисунок 7.3 – Створка капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого материала СИАЛ-2-1Р

По результатам исследований образцов алюмостеклопластика во ФГУП «ГосНИИ ГА» (Протоколы испытаний № СИАЛ 4/3-118-2011 от 17.08.2011 г.), а также данных испытаний на огнестойкость и огненепроницаемость при температуре пламени 1100 ºС образцов, вырезанных из створки капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого материала СИАЛ, установлено отсутствие проникновения пламени на внешнюю сторону образцов (рисунок 7.4, таблица 7.1).

а б

Рисунок 7.4 – Вид поверхности образца со стороны нагрева горелкой (а) и с внешней стороны (б)

Таблица 7.1 – Сравнительная оценка огнестойкости и огненепроницаемости материалов из конструкционных сплавов и слоистого алюмостеклопластика

Материал	Толщина образцов, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B, МПа	Модуль упругости E, ГПа	Плотность d, кг/м^3	Огнестойкость и огненепроницаемость
		Средние значения			
Алюмостеклопластик СИАЛ-2-1Р	1,2	700	65	2350	Отсутствует сквозное прогорание при 1100 °С в течение 15 мин
Алюминиевый лист из сплава 1163	2,5	450	70	2780	Прогорание в течение 5 мин
Титановый лист из сплава ОТ4-1	0,8	750	115	4500	Отсутствует сквозное прогорание при 1100 °С в течение 15 мин

7.3 Конструктивно-подобный образец фрагмента гибридной панели крыла с обшивкой из алюмостеклопластика

Расчет на прочность фрагмента панели центроплана с обшивкой из слоистого алюмостеклопластика

Расчет на прочность (несущую способность) четырехстрингерных гибридных панелей крыла на базе листов и профилей из алюминий-литиевого сплава проводили в соответствии с СТО 1-595-30-458-2014 с оценкой потери устойчивости стрингера с обшивкой, как потери устойчивости шарнирно-опертого стержня, длиной равной расстоянию между нервюрами. Учитывали также местную потерю устойчивости полок стрингера и потерю устойчивости обшивки между стрингерами.

Критические напряжения при потере устойчивости обшивки находили по расчетной схеме одного стрингера с приложением сжимающих усилий вдоль стрингера (рисунок 7.5), где L – расстояние между поперечными

силовыми элементами (нервюра), $t_{стр}$ – расстояние между линией крепления стрингеров, $t_з$ – шаг между заклепками.

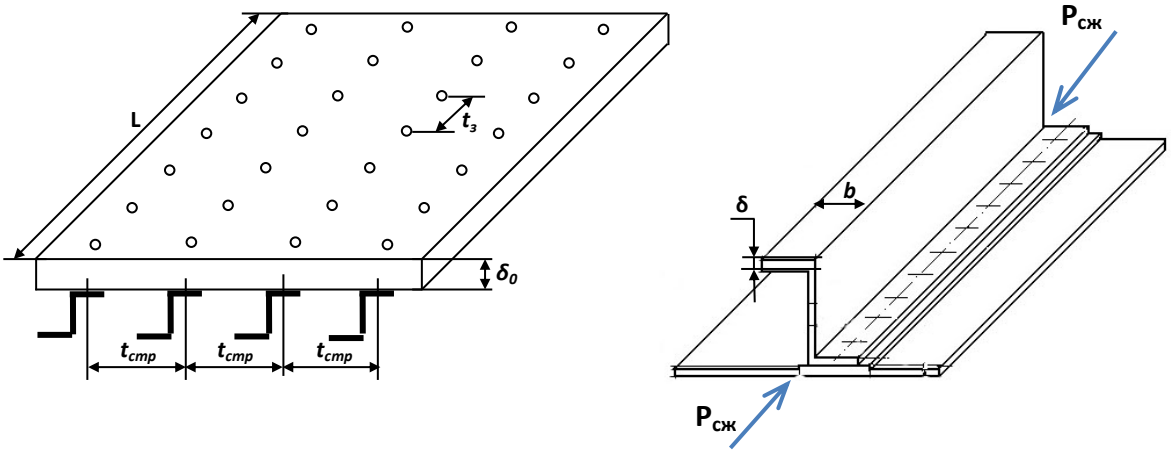


Рисунок 7.5 – Расчетная схема нагружения панели

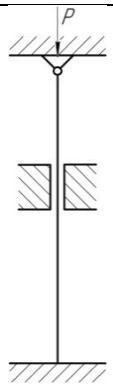
При одноосном сжатии напряжения потери устойчивости обшивки $\sigma_{кр.}^{обш}$ определяли по формуле:

$$\sigma_{кр.}^{обш} = KE\left(\frac{\delta_o}{t_{стр}}\right)^2, \qquad (1)$$

где K – коэффициент граничных условий обшивки, E – модуль упругости, δ_o – толщина обшивки, $t_{стр}$ – ширина обшивки (которая равна шагу стрингеров).

Граничные условия при испытаниях – заделка по сторонам приложения сил приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Граничные условия при испытаниях образцов

Граничные условия		
Шарнирное опирание с двух сторон	Защемление с двух сторон	Шарнир и защемление
C[1] = 1	C = 0,5	C = 0,699
		

1 Примечание – С – коэффициент граничных условий, зависящий от устройства опор и способа нагружения стержня

Расчет критических напряжений потери устойчивости обшивки между механическим креплением $\sigma_{кр.}^{мз}$ определялся по формуле:

$$\sigma_{кр.}^{мз} = \frac{\pi^2 E}{3(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta_o}{t_{закл}}\right)^2, \tag{2}$$

где E – модуль упругости, δ_o – толщина обшивки, $t_{закл}$ – шаг заклепок (болтов), μ – коэффициент Пуассона.

Расчет критических напряжений местной потери устойчивости в зоне по сечению стрингера:

$$\sigma_{кр}^{местн} = K_м E\left(\frac{\delta}{b}\right)^2, \tag{3}$$

где b – ширина полки стрингера, δ – толщина полки стрингера, $K_м$ – коэффициент граничных условий (зависимосит от соотношения и взаимного расположения полок стрингера).

При общей потере устойчивости стрингера с обшивкой провели расчет критических напряжений методом редукционных коэффициентов с использованием последовательных приближений.

Соединения обшивки и стрингера выполнили с помощью болтов или заклепок, что обеспечило совместную работу элементов конструкции при

испытаниях на сжатие, которая характеризуется редукционным коэффициентом.

Напряжение общей потери устойчивости панели $\sigma_{кр}^{общ}$ вычисляли следующим образом:

$$\sigma_{кр}^{общ} = CE\pi^2\left(\frac{i}{l}\right)^2, \tag{4}$$

где C – коэффициент граничных условий ($C = 1$ – для шарнирного опирания), E – модуль упругости, i – радиус инерции, $i = \sqrt{\frac{I}{F}}$ – для сечения обшивки с учетом редукционного коэффициента, l – длина стержня.

Напряжение общей потери устойчивости вычисляли с использованием соответствующих кривых устойчивости для материала стрингера ($\sigma_{кр}^{общ}$) и для материала обшивки ($\sigma_{кр.обш}^{общ}$).

Допускаемые напряжения в стрингере определяли как

$$\sigma_{доп}^{стр} = \min\begin{cases}\sigma_{кр}^{общ} \\ \sqrt{\sigma_{кр}^{общ}\sigma_{кр.\min}^{местн}}\end{cases}, \tag{5}$$

Допускаемые напряжения в обшивке определяли как

$$\sigma_{доп}^{обш} = \sqrt{\sigma_{кр}^{обш}\sigma_{кр}^{*}}, \tag{6}$$

где $\sigma_{кр}^{*} = \min\begin{cases}\sigma_{кр}^{мз} \\ \sigma_{кр.обш}^{местн№1} \\ \sigma_{кр.обш}^{общ}\end{cases}$,

$\sigma_{кр.обш}^{местн№1}$ – напряжения в материале обшивки при местной потере устойчивости полки стрингера, прилегающей к обшивке.

Потеря устойчивости стрингера с присоединенной обшивкой происходит при напряжениях несущей способности, которые определяли по формуле:

$$\sigma_{нс} = \frac{\sigma_{доп}^{обш}F_{обш} + \sigma_{доп}^{стр}F_{стр}}{F_{обш} + F_{стр}}, \tag{7}$$

где $F_{общ}$ – площадь поперечного сечения обшивки типового элемента гибридной панели; $F_{стр}$ – площадь поперечного сечения стрингера типового элемента гибридной панели.

Экспериментальное определение несущей способности при сжатии фрагментов гибридной панели центроплана

Испытания на сжатие конструктивно-подобных образцов (455,5×600 мм) из фрагмента слоистой гибридной панели центроплана проводили совместно с ФГУП «ЦАГИ» [223-225] (Протоколы испытаний определения несущей способности при сжатии №№ 3-1/03-03, 3-2/03-03, 3-3/03-03, 3-4/03-03, 3-5/03-03, 3-6/03-03 от 20-22.04.2015 г.). На рисунке 7.6 показан установленный в испытательную машину фрагмент гибридной панели центроплана.

Геометрические параметры двух конструктивно-подобных образцов гибридной панели представлены в таблице 7.3.

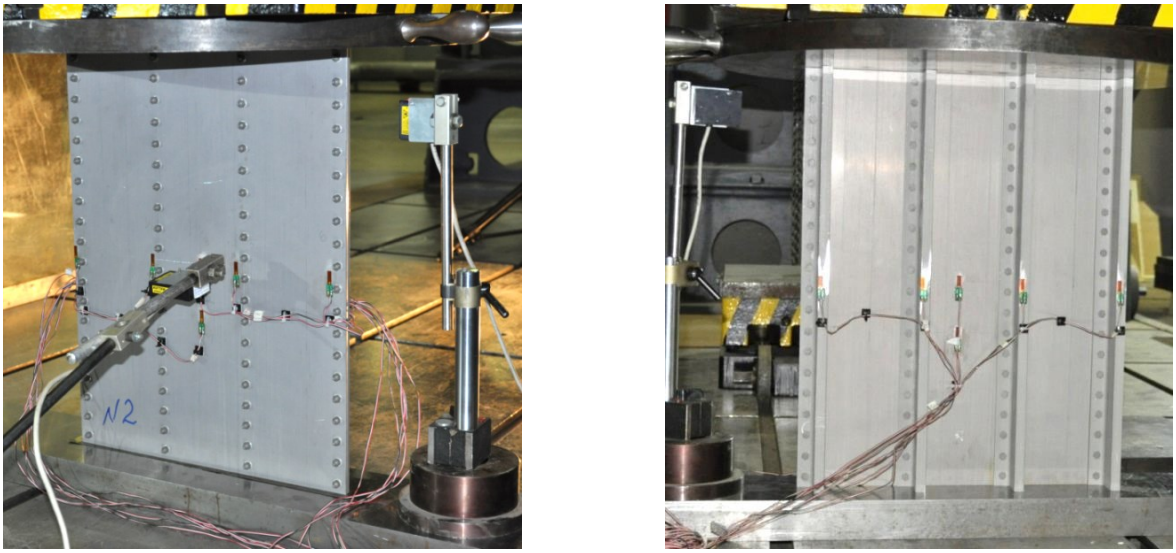


Рисунок 7.6 – Подготовка к испытаниям конструктивно-подобных образцов гибридной панели

Таблица 7.3 – Геометрические параметры КПО гибридной панели

КПО	Ширина панели	$\delta_{обш}$	$\delta_{стр}$	l_1	l_2	h_1	$h_{стр}$
	мм						
№ 1	455	5,16	4,90	14,09	28,07	6,19	50,51
№ 2	455	5,20	4,93	14,08	28,09	6,12	50,44

Нагружение образцов проводили со скоростью 1,25 мм/мин с поэтапным увеличением сжимающей нагрузки от расчетной (20 %, 64 %, 95 %, разрушение). Равномерность нагружения КПО по ширине контролировали тензорезисторами.

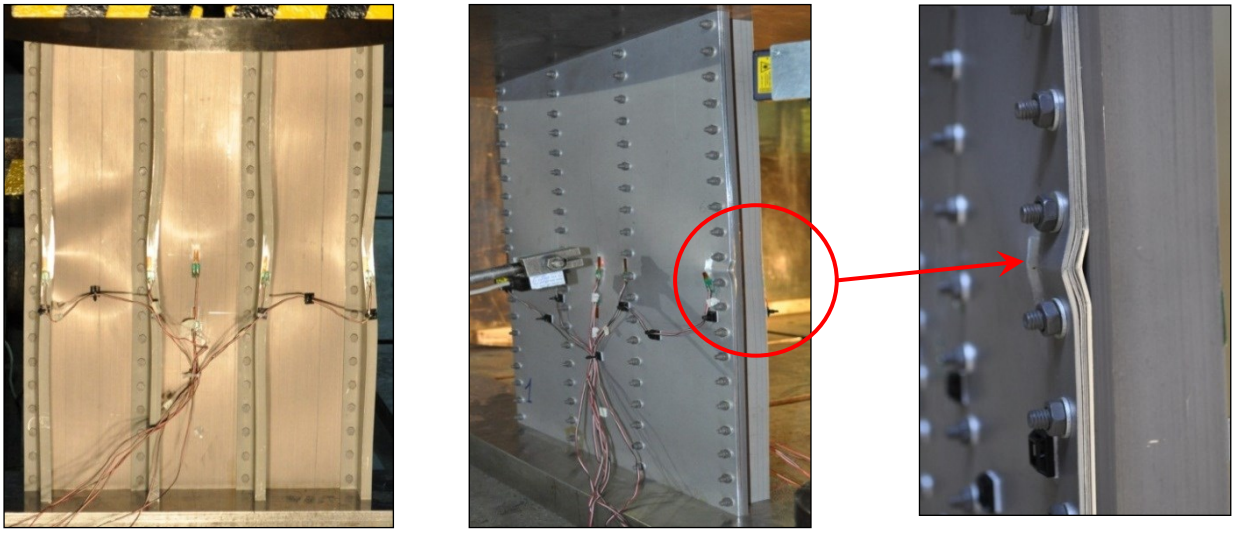
При нагружении образцов до 95 % от расчетной нагрузки видимых нарушений целостности и остаточных деформаций не обнаружено.

Результаты экспериментального определения несущей способности конструктивно-подобных образцов приведены в таблице 7.4.

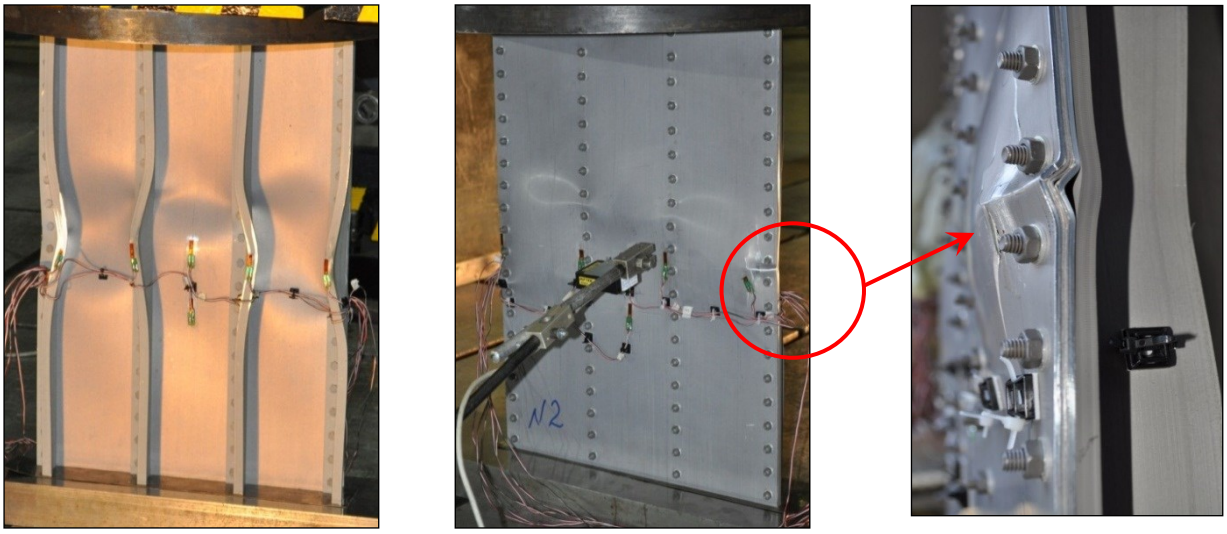
Таблица 7.4 – Результаты испытания на сжатие четырехстрингерных конструктивно-подобных образцов

Номер панели	$F_{факт}$	Эксперимент		
		P_{max}	σ_{max}	$\sigma_{м.п.у.\ обш}$
	мм^2	кН	МПа	
1	4 240	1860	438,7	438,7
2	4 292	1875	437,2	437,2

Характер разрушения КПО фрагмента слоистой гибридной панели крыла представлен на рисунке 7.7.



а



б

Рисунок 7.7 – Вид конструктивно-подобных образцов гибридной панели после испытаний: а – КПО № 1, б – КПО № 2

Деформирование фрагмента гибридной панели до местной потери устойчивости слоистой обшивки происходило в линейной зоне диаграммы деформирования «σ-ε» (рисунок 7.8).

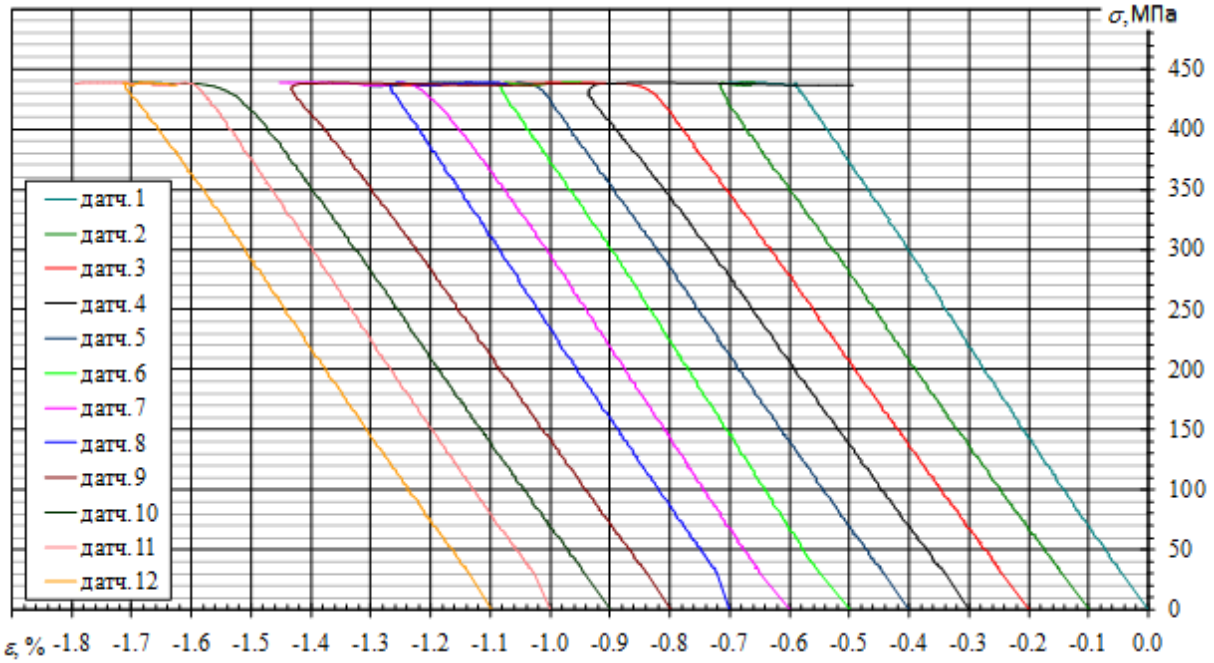


Рисунок 7.8 – Диаграммы «*σ*-*ε*» деформирования при сжатии конструктивно-подобных образцов до потери устойчивости

Определены нагрузки потери устойчивости конструктивно-подобных образцов: P_{max1} = 1860 кН и P_{max2} = 1875 кН по диаграммам деформирования *«P-Δl»* и *«P-Δf»* (рисунки 7.9, 7.10), которые подтверждают стабильность поведения образцов при испытаниях.

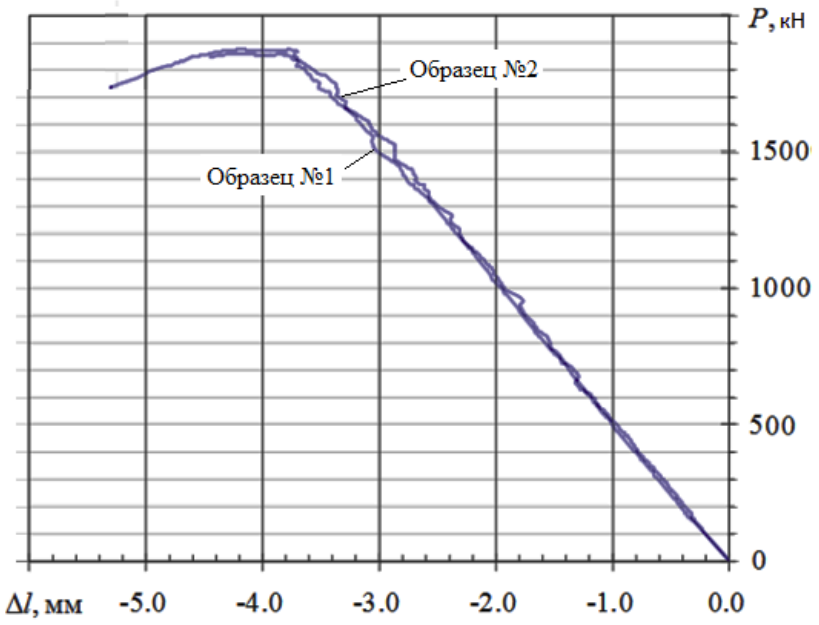


Рисунок 7.9 – Диаграммы деформирования «*P*-Δ*l*» конструктивно-подобных образцов при сжатии

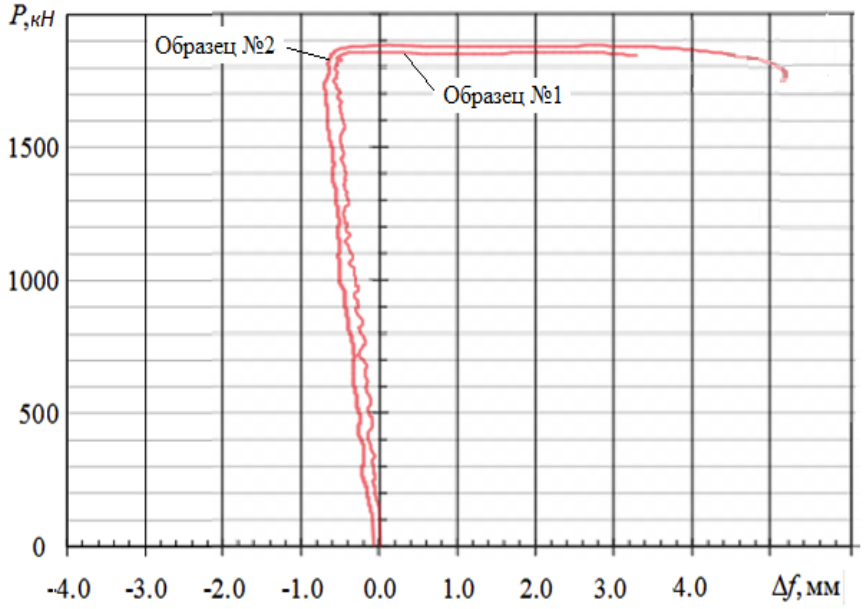


Рисунок 7.10 – Диаграммы деформирования «*P*-Δ*f*» конструктивно-подобных образцов при сжатии

Анализ полученных результатов показал, что разрушение КПО происходило в результате потери устойчивости стрингеров.

Искривление стрингеров при $\sigma_{м.п.у.\ обш} = 438{,}7$ МПа обуславливает местную потерю устойчивости слоистой обшивки у КПО № 1, что приводит к потере несущей способности фрагмента гибридной панели в целом при $\sigma_{max} = 438{,}7$ МПа. При этом нагрузка составила $P_{max1} = 1860$ кН.

Деформация обшивки КПО № 2 происходила в зоне потери устойчивости стрингера. Местная потеря устойчивости обшивки и потеря несущей способности наступили одновременно при $\sigma_{м.п.у.\ обш} = 437{,}2$ МПа и нагрузке $P_{max2} = 1875$ кН.

Проведен сравнительный анализ весовой эффективности гибридных конструкций с обшивкой из слоистого материала с использованием листов и профилей из алюминий-литиевых сплавов 1441, В-1469 и монолитных панелей из плит сплава В95очТ2 (таблицы 7.5, 7.6).

Таблица 7.5 – Весовые характеристики одного погонного метра монолитной панели верхней панели центроплана самолета Ту-204

Конструкция	Материал	d	F	G (1 п/м)
		кг/м^3	мм^2	кг
Обшивка	В95очТ2	2850	570,00	1,625
Стрингер			607,75	1,732
Монолитная панель			1177,75	3,357

Таблица 7.6 – Весовые характеристики одного погонного метра слоистой гибридной панели

Конструкция	Материал	d	F	G (1 п/м)
		кг/м^3	мм^2	кг
Обшивка из слоистого материала	Лист 1,5 мм В-1469Т1 + стеклопластик + СИАЛ-1-1 (3/2) + стеклопластик + лист 1,5 мм В-1469Т1	2450	681,15	1,669
Стрингер	Прессованный профиль В-1469Т1	2670	490	1,308
Гибридная панель	Профиль + слоистый алюмостеклопластик на базе листов из Al-Li сплавов 1441, В-1469	2541	1171,15	2,977

По расчету при одинаковой несущей способности по сжатию масса 1 п/м элемента гибридной конструкции слоистой панели центроплана с алюминий-литиевыми стрингерами легче на ~ 11,3 % массы 1 п/м элемента конструкции панели крыла самолета Ту-204 из сплава В95очТ2.

По результатам испытаний КПО с использованием слоистых алюмостеклопластиков подтверждена эффективность их применения как в растянутых, так и в длительно работающих сжатых зонах (верхние обшивки крыла) элементов конструкций [218].

Испытания КПО фрагмента прототипа гибридной панели центроплана самолета Ту-204, в т.ч. во ФГУП «ЦАГИ», показали, что благодаря многослойному строению и характеристикам исходных компонентов (листов разной толщины из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков) она обладает преимуществами перед монолитными панелями из алюминиевых сплавов В95очТ2: 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 г. совместных работ ФГУП «ВИАМ» и

ПАО «Туполев» о возможности применения в авиационных конструкциях слоистых алюмостеклопластиков на базе листов из сплава 1441 и прессованных полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов.

Сравнение прочностных характеристик слоистого алюмостеклопластика и монолитного алюминиевого листа показало, что металлополимерный композиционный материал превосходит высокопрочный сплав В95очТ2 по служебным характеристикам (таблица 7.7) [176, 218].

Таблица 7.7 – Значения характеристик материалов для обшивок панелей крыла (продольное направление)

Характеристики	Слоистый алюмостеклопластик (экспериментальное (min – max) / расчетное значение)	Лист толщиной 5 мм из сплава В95очТ2 (экспериментальное (min – max) значение)
Плотность d, кг/м^3	2451-2452 / ---	2850
Временное сопротивление разрыву 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 (dl/dN), мм/кцикл (при ΔК=31,0 МПа·м$^{1/2}$)	0,15-0,20 / ---	2,3-2,7
МЦУ: $N_{ср}$, кцикл (f=5 Гц, σ_{max}=157 МПа)	200-220 / ---	180-200
Нагрузка потери устойчивости P_{max}, кг	Четырехстрингерный образец (445,5×600 мм)	
	186 000-188 000 *1	157 000 *2

2 Примечания

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

2 Расчетное значение для образца из монолитной панели сплава В95очТ2

Анализ результатов всесторонних исследований и испытаний алюмостеклопластиков на стандартных образцах и КПО показал эффективность применения слоистых материалов СИАЛ за счет высоких показателей трещиностойкости, долговечности, огненепроницаемости и пониженной плотности.

Разработаны ТР 1.2-2403-2015, ТР 1.2.2157-2010, ТР 1.595-34-868-2009, ТР 1.595-34-698-2006 на применение материалов СИАЛ в конструкциях.

Результаты всесторонних исследований и испытаний образцов из слоистых материалов позволяют рекомендовать применение алюмостеклопластиков в элементах конструкции планера:

- обшивки панелей отсеков фюзеляжа;
- противопожарные перегородки;
- дублеры обшивок в зонах иллюминаторов в отсеках фюзеляжа;
- стыковочные ленты соединений отсеков фюзеляжа;
- стенки перегородок;
- дублеры окантовок дверных проемов;
- обшивки панелей крыла разной толщины из слоистого материала с выкладкой местных усилений в зонах крепления силовых элементов;
- обшивки агрегатов в зонах с повышенными требованиями по молниестойкости;
- обшивки в зонах повышенных температур в сочетании с дополнительными специальными покрытиями.

Выводы по главе 7

1. Разработаны предложения по применению в конструкциях планера самолетов слоистых материалов СИАЛ, обеспечивающих снижение массы

конструкции, повышение надежности и ресурса в сравнении с конструкциями из традиционных алюминиевых сплавов.

2. Отработаны технологии изготовления в промышленных условиях конструктивно-подобных образцов и деталей конструкций с применением алюмостеклопластиков:

- фрагмент панели отсека фюзеляжа с обшивкой из СИАЛ-3-1Р, обеспечивающей преимущества по усталостной долговечности в 2 раза по сравнению с конструкцией из алюминиевого сплава 1163Т;

- створка капота двигателя вертолета из огнестойкого слоистого алюмостеклопластика СИАЛ-2-1Р, обеспечивающего огненепроницаемость при 1100 °С в течение 15 мин и более, и снижение массы капота двигателя до 20 % по сравнению с конструкцией из титанового сплава ОТ4-1; подтверждены преимущества по технологичности при изготовлении деталей сложной криволинейной формы с учетом совмещения операций формообразования с полимеризацией клеевого связующего;

- фрагмент гибридной панели центроплана с обшивкой из слоистого алюмостеклопластика с использованием листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков, обеспечивающий высокое сопротивление скорости роста трещины усталости (более чем в 10 раз) и увеличение до 20 % несущей способности конструктивно-подобных образцов при сжатии по сравнению с конструкцией из алюминиевого сплава В95очТ2.

3. Проведен сравнительный анализ весовой эффективности панелей с обшивкой из слоистого материала с использованием листов и стрингеров из алюминий-литиевых сплавов 1441, В-1469. Показано, что применение алюмостеклопластиков в конструктивно-подобных образцах взамен монолитных панелей из сплава В95очТ2 обеспечило повышение весовой эффективности на 11,3 %.

4. Разработан метод расчета на прочность обшивочных панелей отсеков планера с использованием листового слоистого материала.

5. По результатам всесторонних исследований и испытаний алюмостеклопластиков на стандартных образцах и КПО доказано, что использование в структуре СИАЛ листов из алюминий-литиевых сплавов обеспечивает снижение массы и повышение служебных характеристик конструкции.

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 ообработке, разработки способа подготовки поверхности листов под склейку в комбинированном по составу электролите, исследований, в том числе, с применением математического моделирования, влияния состава и структуры слоистых алюмостеклопластиков на их физико-механические свойства, разработаны технологические процессы изготовления отдельных металлических и полимерных составляющих (тонких листов из сплава 1441, стеклопластиков с применением доработанного клеевого связующего в сочетании с высокомодульным стеклоровингом) и режимы автоклавного формования алюмостеклопластиков 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 алюмостеклопластиков 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 σ_B = 600-1200 МПа, плотностью d = 2300-2400 кг/м^3, модулем упругости E = 65-72 ГПа, низкой скоростью роста трещины усталости dl/dN = 0,15-0,20 мм/кцикл при ΔK = 31,0 МПа·м$^{1/2}$ и обеспечивающие температуру эксплуатации до 120 °С.

2. Алюмостеклопластики нового поколения превосходят:

- алюмостеклопластики 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 6,0×10^{10} 1/мм^3 при содержании первичных эвтектических фаз в слитке менее 1 %, что обеспечивает повышение технологической пластичности слитков (δ > 120 %)

в интервале температур горячей прокатки 430-470 °С, а также при холодной прокатке листов.

3.2. Разработан трехступенчатый режим старения Т12: температурный интервал Т = 150-200 °С, суммарное время τ = 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: σ_B = 415-435 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 320-325 МПа, δ = 8,5-14,5 % (в продольном направлении), РСК 2-3 балла для использования в составе алюмостеклопластиков 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 алюмостеклопластиков за счет получения анодного слоя с более развитым рельефом.

5. Определено, что максимальные упруго-прочностные характеристики стеклопластика и адгезионные свойства по границам поверхностей стеклопластик-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 азотосодержащего), полисульфона и отвердителя ароматического типа, обеспечивающее оптимальные значения динамической вязкости в интервале температур 90-120 °С, что при автоклавном формовании алюмостеклопластиков при давлении $P_ф$, температуре $T_ф$ = 170-180 °С и времени выдержки при формовании $t_ф$, 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 алюмостеклопластиков.

7. Разработаны технологические режимы автоклавного формования, совмещающие процессы полимеризации клеевых связующих в препрегах алюмостеклопластика 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 алюмостеклопластиков методом автоклавного формования.

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

9. Определены особенности распространения усталостных трещин в СИАЛ: начало зарождения трещин в наружных металлических листах алюмостеклопластика 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 стеклопластика. Скорость роста трещины усталости в слоистых алюмостеклопластиках ниже, более чем в 10 раз, по сравнению с листами из традиционных алюминиевых сплавов Д16 и 1163.

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

11. Показано, что антикоррозионная защита внешних и торцевых поверхностей деталей из слоистых алюмостеклопластиков 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 натурных коррозионных испытаний в ГЦКИ ВИАМ в течение 1 года.

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

13. Показаны преимущества по молниестойкости образцов из СИАЛ применительно к верхним панелям топливных баков. Зоны поражений от удара молнией в алюмостеклопластиках толщиной 1,3-1,5 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 алюмостеклопластиков при сохранении структуры и физико-механических характеристик материала.

15. Разработаны схемы сращивания металлических листов в алюмостеклопластиках 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 алюмостеклопластиков и традиционных материалов, с оценкой по весовым и ресурсным характеристикам показали:

- применение обшивки из алюмостеклопластика 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 алюмостеклопластика 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 В95очТ2;

- применение огнестойкого легкого слоистого алюмостеклопластика 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 огненепроницаемость при 1100 °С в течение более 15 минут.

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

Разработанная нормативная документация

Разработана следующая нормативная документация:

- по материалам СИАЛ

ТУ 1-595-34-1832-2019	Листы из алюмостеклопластика марки СИАЛ
ТУ 1-595-34-892-2005	Слоистые листы из алюмополимерного материала марки СИАЛ (применительно к СИАЛ-1-1, СИАЛ-3-1)
ТР 1.2.1882-2006	Изготовление алюмополимерных композиционных слоистых материалов СИАЛ на основе сплава 1441 и клеевого препрега КМКС 2.120.Т60 (применительно к СИАЛ-1-1)
ТР 1.2.2265-2012	Изготовление конструктивных элементов из СИАЛ-1441 (применительно к СИАЛ-1-1, СИАЛ-3-1)
ТУ 149-0121-2015	Листы из высокопрочного алюмостеклопластика марки СИАЛ-1-4Р
ТИ 1.595-34-641-2014	Изготовление высокопрочного градиентного алюмостеклопластика марки СИАЛ-3-2Р
ТУ 1-595-34-1537-2015	Листы из высокопрочного алюмостеклопластика марки СИАЛ-3-2Р
ТР 1.2-2403-2015	Изготовление фрагмента прототипа конструкции гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 и слоистого алюмостеклопластика
ТР 1.2.2404-2015	Анодное оксидирование алюминий-литиевых сплавов в комбинированном электролите
ТР 1.2.2697-2018	Изготовление прототипа капота двигателя вертолета из материала марки СИАЛ-2-1Р
ММ 1.2.085-2008	Исследование структуры, оценка механических и ударных свойств многослойного высокопрочного алюмостеклопластика типа СИАЛ

ТИ 1.595-34-665-2014	Изготовление пожаростойкого градиентного металлостеклопластика марки СИАЛ-3-5Р
ТР 1.2.1789-2004	Контроль слоистых металлостеклопластиков (СИАЛ) акустическим методом
ТР 1.2.1796-2004	Изготовление обшивок двойной кривизны из МПКМ СИАЛ и АЛОР
ТР 1.2.1913-2006	Изготовление алюмополимерных композиционных материалов СИАЛ-1-1Р и СИАЛ-2-1Р на основе сплава 1441Т11 и клеевого препрега КМКС-2мР.120.РВМПН.30
ТР 1.2.2157-2010	Применение СИАЛ на базе листов 1441
ТР 1.595-34-871-2009	Изготовление элементов соединений из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ
ТИ 1.595-34-723-2014	Изготовление соединений слоистых алюмостеклопластиков
ТР 1.2.2398-2015	Изготовление высокопрочного слоистого алюмостеклопластика марки СИАЛ-1-4Р
ТР 1.595-14-471-2004	Изготовление алюмополимерных композиционных слоистых материалов СИАЛ на основе сплава 1441
ТР 1.595-34-698-2006	Применение слоистого алюмостеклопластика СИАЛ-1-1Р на базе листов 1441
ТР 1.595-34-772-2007	Изготовление опытных заготовок из слоистого высокопрочного ударостойкого алюмостеклопластика СИАЛ и его компонентов
ТР 1.595-34-868-2009	Применение и изготовление материала типа СИАЛ
ТУ 1-595-34-1063-2008	Многослойные высокопрочные листы из алюмополимерного материала марки СИАЛ
СТО 1-595-20-532-2017	Оценка огнестойкости и огненепроницаемости материалов, предназначенных для пожароопасных зон в авиационной технике

- по листам сплава 1441

ТР 1.2.2668-2018	Изготовление деталей из алюминиевого сплава марки 1441
ТР 1.2.2667-2018	Изготовление листов из алюминий-литиевого сплава марки 1441
ТР 1.2.2016-2008	Изготовление неплакированных тонких листов из сплава 1441
ТУ 1-804-516-2012	Листы из алюминиевого сплава марки 1441 с односторонней плакировкой
ТУ 1-804-407-2004	Листы из алюминиевого сплава марки 1441 толщиной 0,3 – 0,4 мм с твердой регламентированной плакировкой (РД)
Изменение № 6 к ТУ 1-804-407-2004	Листы из алюминиевого сплава марки 1441 толщиной 0,25 – 0,4 мм с твердой регламентированной (РД), нормальной плакировкой (А)

Патенты по теме диссертации

1. 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. Опубл. 20.10.2008.

2. 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. Опубл. 20.06.2006.

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 металлостеклопластика. Патент на изобретение 2618072 Рос. Федерация. Опубл.05.11.2015.

4. 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. Опубл. 14.07.2004.

5. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Шестов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Попов Ю.О. //Градиентный металлостеклопластик и изделие, выполненное из него. Патент 2655215. Рос. Федерация. Опубл. 15.09.2015.

6. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Самохвалов С.В., Сенаторова О.Г., Шестов В.В., Сидельников В.В. //Способ соединения слоистого алюмостеклопластика. Патент 2570469 Рос. Федерация. Опубл. 10.12.2015.

7. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова. О.Г., Махсидов В.В., Шестов В.В., Иошин Д.В. //Слоистый алюмостеклопластик и изделие, выполненное из него. Патент 2600765 Рос. Федерация. Опубл. 04.10.2016.

8. 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 на изобретение 2641744 Рос.Федерация. Опубл. 02.03.2017.

9. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Сомов А.В., Сидельников В.В., Нефедова Ю.Н. //Огнестойкий слоистый металлостеклопластик и изделие, выполненное из него. Патент 2676637 Рос.Федерация. Опубл. 09.01.2019.

Список сокращений и условных обозначений

МПКМ – металлополимерный композиционный материал;

СИАЛ – Стеклопластик И Алюминий – слоистый алюмостеклопластик;

GLARE – Glass ALuminium Reinforced;

ПКМ – полимерный композиционный материал;

d – плотность;

σ_B – временное сопротивление;

σ_B/d – удельная прочность;

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести при растяжении;

δ (δ_5) – относительное удлинение после разрыва на базе $l_0=5d_0$;

d_0 – начальный диаметр образца для испытаний на растяжение;

E – модуль нормальной упругости, определенный статическим методом при растяжении;

$\sigma_{-0,2}$ – условный предел текучести при сжатии;

$E_{сж}$ – модуль нормальной упругости, определенный статическим методом при сжатии;

τ_B – предел прочности при сдвиге;

$T_{экс}$ – температура эксплуатации;

ЗСВ – зона, свободная от выделений у границ зерен;

G_{12} – модуль сдвига в плоскости слоя;

$\bar{E}$ – приведенный модуль упругости;

α_{Me} – коэффициент линейного расширения алюминиевого листа;

$\alpha_{Ст}$ – коэффициент линейного расширения стеклопластика;

V_{Me} – объемная доля металла в структуре слоистого материала;

$V_{Ст}$ – объемная доля стеклопластика в структуре слоистого материала;

$1/\rho$ – удельное электросопротивление;

B_i – коэффициент жесткости слоистого композиционного материала, которые входят в обобщенный закон Гука, разрешенный относительно напряжений,

b_i – коэффициент, определяющий связь напряжений и деформаций в глобальной системе координат с напряжениями и деформациями в каждом из монослоев;

h_i – толщина монослоя;

t – приращение температуры;

$S_{отсл}$ – прочность при отслаивании;

СРТУ (dl/dN) – скорость роста трещины усталости;

ΔК – интервал коэффициента интенсивности напряжений;

B – ширина образца;

МЦУ – малоцикловая усталость;

K_t – коэффициент концентрации напряжений;

σ_{max} – максимальное напряжение цикла при испытании на усталость;

N_p – число циклов до разрушения при испытании на усталость;

$N_{ср}$ – среднее число циклов до разрушения при испытании на усталость;

f – частота нагружения при испытании на усталость;

R – коэффициент асимметрии цикла при испытании на усталость;

Ø – диаметр отверстия в образце;

L – длина образца;

lтр – длина усталостной трещины;

ε – степень деформации;

K_{IC} – вязкость разрушения (критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации);

$K_C^у$ – условный коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации;

$\sigma_{изг}$ – предел прочности при изгибе;

$d_{ср}$ – средний размер зерна;

Δl – осевая деформация;

Δf – отклонение от плоскости;

Ан.Окс.хр. – анодное окисление в хромовой кислоте;

КСТ – камера солевого тумана;

КТ – камера тепла и влаги;

ГЦКИ ВИАМ – Геленджикский центр климатических испытаний;

МЦКИ ВИАМ – Московский центр климатических испытаний;

РСК – расслаивающая коррозия;

$\sigma_{кр}$ – критическое напряжение при коррозионном растрескивании;

ОЧК – отъемная часть крыла самолета;

q_z – поток нормальных сил, действующих в панели по оси Z;

q_x – поток нормальных сил, действующих в панели по оси X;

σ_z – нормальные напряжения, действующие в панели по оси Z;

σ_x – нормальные напряжения, действующие в панели по оси X;

$t_{стр}$ – шаг стрингеров;

$P_{нс}$ $(_{max})$ – нагрузка потери устойчивости;

$\sigma_{нс}$ – критическое напряжение потери устойчивости;

$Q_{нс}$ – суммарный поток сил, при котором происходит потеря устойчивости;

$P_{кр}$ – критическая расчетная нагрузка потери устойчивости панели;

$\sigma_{м.п.у.\ обш}$ – напряжение, при котором происходит местная потеря устойчивости обшивки;

R – перемещения свободного торца панели при испытаниях на несущую способность при сжатии;

R_{min} – минимальный допустимый радиус при изгибе;

ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия;

ДФПС – диаграмма фазовых превращений при старении;

ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия;

ДТА – дифференциальный термический анализ;

КЛТР – коэффициент линейного теплового расширения;

$T_ф$ – температура автоклавного формования;

$t_ф$ – выдержка при автоклавном формовании;

МР – методическая рекомендация;

ММ – методический материал;

МК – методика контроля;

ТР – технологическая рекомендация;

ПИ – производственная инструкция;

ТУ – технические условия;

AITM – Airbus Industrie Test Method;

Д – продольное направление вырезки образца;

П – поперечное направление вырезки образца;

В – высотное направление вырезки образца;

КПО – конструктивно-подобный образец;

БГО – багажно-грузовой отсек;

КИМ – коэффициент использования металла (материала);

ЛКП – лакокрасочные покрытия;

1 п/м – один погонный метр;

НС – направление сращивания

Нормативные ссылки

СТО 1-595-20-532-2017	Оценка огнестойкости и огненепроницаемости материалов, предназначенных для пожароопасных зон в авиационной технике
ТУ 1-804-407-2004	Листы из алюминиевого сплава марки 1441 толщиной 0,3–0,4 мм с твердой регламентированной плакировкой (РД)
ТУ 1-804-317-93	Листы плакированные из алюминиевого сплава марки 1441
ТУ 1-804-439-2007	Листы из алюминиевого сплава марки В-1469 толщиной от 0,8 до 3,0 мм
ТУ 1-804-440-2007	Профили прессованные из алюминиевого сплава марки В-1469
МР-21-31-85	Выявление макро и микроструктуры алюминия и его сплавов методом химического травления
ММ 1.2.028-2004	Металлографический анализ алюминиевых деформируемых сплавов, легированных литием
ММ 1.2.085-2008	Исследование структуры, оценка механических и ударных свойств многослойного высокопрочного алюмостеклопластика типа СИАЛ
РТМ 1.2.032-83	Измерение температурных границ фазовых и структурных превращений в никелевых сплавах типа ЖС посредством дифференциального термического анализа
ММ 1.595-17-225-2004	Измерение остаточных напряжений на анализаторе напряжений PSF-3M фирмы «RIGAKU»
ГОСТ 9651-84	Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах
ГОСТ 11701-84	Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент

ГОСТ 1497-84	Металлы. Методы испытаний на растяжение
ГОСТ 11150-84	Металлы. Методы испытания на растяжение при пониженных температурах
РТМ 1.2А.096-2000	Методы исследования состояния материала деталей ГТД после эксплуатации
ГОСТ 9.904-82	Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию
ГОСТ 14759-69	Клеи. Метод определения прочности при сдвиге;
ГОСТ 9.909-86	Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы испытаний на климатических испытательных станциях
СТО 1-595-591-499-2015	Проведение натурных климатических испытаний металлических, неметаллических материалов и защитных покрытий
ГОСТ 25.502-79	Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость
ММ 1.2.002-2001	Методика испытаний для оценки малоцикловой усталости (МЦУ) слоистого металлокомпозита (типа СИАЛ)
РТМ 1.2А.015-99	Методы механических испытаний клеевых соединений металлов
ГОСТ Р 57739-2017	Композиты полимерные. Определение температуры стеклования методом динамического механического анализа
ТУ 1-595-12-1475-2014	Связующее клеевое марки ВСК-14-2мР
ТУ 1-595-14-1034-2008	Связующие клеевые марок ВСК-14

ГОСТ 25.503-97	Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие
ГОСТ Р 57745-2017	Композиты полимерные. Определение предела прочности при межслойном сдвиге ламинатов методом короткой балки
ГОСТ 25.506-85	Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении
ММ 1.2.003-2001	Метод испытания для оценки скорости роста трещины усталости в слоистом металлокомпозите (типа СИАЛ)
ГОСТ 9454-78	Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах
ГОСТ 33496-2015	Композиты полимерные. Метод испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом
ММ 1.595-30-148-2002	Оценка характера разрушения металлокомпозитов
ТР 1.2.1789-2004	Контроль слоистых металлостеклопластиков (СИАЛ) акустическим методом
ГОСТ 9.913-90	Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний
ГОСТ 9.017-74	Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на общую коррозию

ГОСТ 9.021-74	Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию
ГОСТ 9.908-85	Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости
ТУ 1-595-14-1200-2011	Связующее клеевое марки ВСК-14-3
АП-25 (2008)	Авиационные правила. Часть 25.Нормы летной годности самолетов транспортной категории
ГОСТ 20018-74	Сплавы твердые спеченные. Методы определения плотности
МИ 1.2.031-2011	Методика измерений тепло- и температуропроводности материалов на основе тугоплавких соединений в диапазоне температур от 20 °С до 1400 °С;
ГОСТ Р 56754-2015	Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК)
МИ 1.2.023-2011	Методика измерений коэффициента линейного расширения полимерсиликатных нанокомпозитов и металлических образцов
ГОСТ 14019-2003	Материалы металлические. Метод испытания на изгиб
ПИ 1.2.343-87	Листовая штамповка деталей из алюминиевых сплавов
СТО 1-595-30-478-2015	Метод проведения повторно-статических испытаний при программном нагружении фрагмента гибридной панели крыла
ТР 1.2.2667-2018	Изготовление листов из алюминий-литиевого сплава марки 1441

ГОСТ 9.039-74	Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы.
ГОСТ 12.1.007-76	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности
ТР 1.595-34-871-2009	Изготовление элементов соединений из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ
ТР 1.2.2403-2015	Изготовление фрагмента прототипа конструкции гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 и слоистого алюмостеклопластика
ТР 1.2.2697-2018	Изготовление прототипа капота двигателя вертолета из материала марки СИАЛ-2-1Р
СТО 1-595-30-458-2014	Методика определения удельной теплоёмкости и температуры стеклования ПКМ с использованием дифференциально-сканирующей калориметрии
ОСТ 1 92133-2002	Метод определения коррозионной стойкости полуфабрикатов из алюминиевых термически упрочняемых сплавов
ОСТ 1 12085–77	Болты с уменьшенной шестигранной головкой из титанового сплава для соединений со специальной переходной посадкой
ПИ 1.2.699-2007	Термическая обработка полуфабрикатов и деталей из алюминия и алюминиевых деформируемых сплавов
ТР 1.2.2404-2015	Анодное оксидирование высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 в комбинированном электролите;
ПИ 1.2.265-88	Приготовление и применение грунтовки ЭП-0234;
ТУ 1-804-453-2008	Листы неплакированные из алюминиевого сплава марки 1441 толщиной от 0,3 до 0,5 мм

ММ 1.595-17-344-2007	Определение фазового состава и ориентационных соотношений фаз в сплаве 1441
Паспорт № 1777	Паспорт на сплав В-1469
Паспорт № 1002	Паспорт на сплав В95пч/оч
Паспорт № 1710	Паспорт на сплав 1441
Паспорт № 1774	Паспорт на слоистый листовой алюмостеклопластик марки СИАЛ
Паспорт № 1926	Паспорт на слоистый листовой алюмостеклопластик марки СИАЛ
Паспорт № 1909	Паспорт на слоистый листовой алюмостеклопластик марки СИАЛ
ТИ 1.595-12-743-2014	Изготовление связующего клеевого марки ВСК-14-2мР
ПИ 249-2000	Клепка металлических конструкций
ТР 1.2.2388-2014	Интеграция в слоистый алюмостеклопластик оптоволоконных сенсоров деформации на брэгговских решетках
РТМ 1.2.015-98	Методы механических испытаний клеевых соединений металлов
РТМ 1.2.015-2013	Методы механических испытаний клеевых соединений металлов
ОСТ 1 34040-79	Заклепки с плоско-скругленной головкой с компенсатором. Конструкция и размеры
ОСТ 1 34047-80	Заклепки с уменьшенной потайной головкой с углом 90° с компенсатором. Конструкция и размеры;
ОСТ 1 90148-74	Металлы. Метод испытания на срез
ОСТ 1 00656-81	Заклепки с сердечником. Технические условия.
ОСТ 1 34076-85	Заклепки с плоско-скругленной головкой. Конструкция и размеры

ОСТ 1 34098-85	Заклепки с потайной головкой с углом 120° из алюминиевого сплава В65. Конструкция и размеры;
ОСТ 1 11647-74	Заклепки с уменьшенной потайной головкой с углом 120°. Конструкция и размеры
СТО 1-595-30-458-2014	Метод расчета на прочность (несущую способность) гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава и слоистого алюмостеклопластика
ASTM D2344/D2344M - 16	Short-beam strength testing of polymer matrix composite materials (interlaminar shear)
АП-23 (2018)	Авиационные правила. Часть 23. Нормы летной годности гражданских легких самолетов
АП-33 (2012)	Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов
ТР 1.2.2265-2012	Изготовление конструктивных элементов из СИАЛ-1441 (применительно к СИАЛ-1-1, СИАЛ-3-1)
ISO 2685:1998	Aircraft - Environmental test procedure for airborne equipment - Resistance to fire in designated fire zones
ТИ 1.595-28-339-2011	Изготовление огнезащитной пасты ВЗО-9
ГОСТ 16350-80	Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей
ISO 9223:1992	Corrosion of metals and alloys; corrosivity of atmospheres; classification
СТО 1-595-591-473-2015	Определение коэффициента диффузии влаги и предельного влагосодержания ПКМ

Список литературы

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3-33.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 226-230.
3. Антипов В.В. Современные алюминиевые сплавы для авиакосмической техники // В сборнике: Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья - основа инновационного развития экономики России. Сборник докладов II Международной научно-технической конференции (посвящается 85-летию со дня основания ФГУП «ВИАМ»-ведущего материаловедческого центра страны). 2017. С. 1.
4. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов // М.: Наука. 2005. 275 с.
5. Туполев А.А., Сулименков В.В., Зельтин В.К. Повышение эксплуатационных характеристик и эффективности конструкций пассажирских самолетов. В сборнике: Металловедение алюминиевых сплавов // М.: Наука. 1985. С. 22-40.
6. Новожилов Г.В., Мишин В.И. Алюминиевые сплавы в широкофюзеляжных самолетах // В сборнике: Металловедение алюминиевых сплавов. М: Наука. 1985. С 18-22.
7. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Бронз А.В., Сомов А.В., Серебренникова Н.Ю. Высокопрочные и сверхпрочные сплавы традиционной системы Al-Zn-Mg-Cu, их роль в технике и возможности развития // ТЛС. 2016. № 2. С. 43-49.

8. Алюминиевые сплавы. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справочное руководство. Т. I. Под ред. Шалина Р.Е., Туманова А.Т. // М.: Металлургия. 1984. 341 с.
9. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справочное руководство. Т. IV. Под ред. Ливанова В.А., Елагина В.И. // М.: Металлургия. 1985. 408 с.
10. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы // М.: Металлургия. 1979. 208 с.
11. Фридляндер И.Н., Добромыслов А.В., Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе // МиТОМ. 2005. № 7. С. 17-23.
12. Алюминиевые сплавы. Промышленные алюминиевые сплавы. Справочное руководство. Т. II. Под ред. Фридляндера И.Н., Квасова Ф.И. // М.: Металлургия. 1984. 539 с.
13. Сенаторова О.Г., Сухих А.Ю., Сидельников В.В. и др. Развитие и перспектива применения высокопрочных алюминиевых сплавов для катаных полуфабрикатов // ТЛС. 2002. № 4. С. 28-33.
14. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г. Общая характеристика, классификация алюминиевых сплавов. Алюминий-литиевые сплавы. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II. Под ред. Фридляндера И.Н., Каблова Е.Н., Сенаторовой О.Г., Шалина Р.Е. // М.: Машиностроение. 2001. С. 13-19.
15. Авиационные материалы. 75 лет. Избранные труды ВИАМ 1932–2007. Юбилейный научно-технический сборник. Под ред. Каблова Е.Н. // М.: ВИАМ. 2007. 439 с.
16. Сенаторова О.Г., Грушко О.Е., Ткаченко Е.А., Антипов В.В., Молостова И.И., Сидельников В.В. Новые высокопрочные алюминиевые сплавы и материалы // ТЛС. 2007. № 2. С.17-24.

17. Rioja R.J., Denzer D.K., Mooy D., Venema G. Lighter and Stiffer Materials for Use in Space Vehicles // In: Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys. ICAA-13. 2012. P. 593–598.
18. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 167-182.
19. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Пер. с англ. под ред. Фридляндера И.Н., Квасова Ф.И., Строганова Г.Б. // М.: Металлургия. 1979. 639 с.
20. Антипов В.В. Перспективы развития легких сплавов для изделий авиационно-космической техники // В сборнике: Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов. Сборник докладов научно-технической конференции. 2016. С. 1.
21. Каблов Е.Н. ВИАМ: Продолжение пути // М.: Наука в России. 2012. № 11. С. 16–21.
22. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 195-211.
23. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов // М.: Металлургия. 1981. 414 с.
24. Новиков И.И., Золотаревский В.С. и др. Металловедение. Учебник в 2-х томах // М.: МИСиС. 2009.
25. Добаткин В.И., Габидуллин Р.М., Колачев Б.А., Макаров Г.С. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах // М.: Металлургия. 1976. 264 с.
26. Fridlyander I.N., Senatorova O.G. Effect of Iron and Silicon on the Properties and Microstructure of Al-Zn-Mg-Cu System Aluminum Alloys // Key Engineering Materials. 1990. V. 44. P. 321-332.
27. Aluminum Standards and Data // The Aluminum Association. USA. 2006.

28. ISO 6361-2. 2009.
29. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhill R.J.H. Aluminium-lithium alloys: processing, properties, and applications // Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford. 2014. 652 p.
30. 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.
31. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. Алюминий-литиевые сплавы структура и свойства // Киев: Наук. Думка. 1992. 192 с.
32. Авиационные материалы. Справочник в 12-ти томах. Под общ. ред. Каблова Е.Н. // М.: ВИАМ. 2009. Т. 4. Ч. 1. Кн. 1. 262 с.
33. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186-194.
34. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 24-29.
35. Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение // М.: Наука. 2014. 296 с.
36. Фридляндер И.Н., Шамрай В.Ф., Ширяева Н.В. Явление повышения прочности и жесткости сплавов системы алюминий-магний с одновременным понижением плотности (эффект Фридляндера) // Диплом на открытие № 390. 18.10.1990.
37. Фридляндер И. И., Сандлер В. С., Никольская Т. И. Исследование старения сплавов системы алюминий-магний-литий // ФММ. 1971. № 32. вып. 4. С. 767-774.

38. Фридляндер И. И., Сандлер В. С. Структура и свойства сплава 1420 // Металловедение алюминиевых сплавов. М.: Наука. 1985. С. 40-48.
39. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Шамрай В.Ф., Клочков Г.Г. Высокопрочный конструкционный Al–Cu–Li–Mg сплав пониженной плотности, легированный серебром // МиТОМ. 2007. № 6 (624). С. 3-7.
40. Антипов В.В., Каблов Е.Н., Панченко П.В., Попов В.И., Федоренко Т.П., Фридляндер И.Н. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него. Патент 2349665 Рос. Федерация. Опубл. 20.10.2008.
41. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминий-литиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 183-195.
42. Антипов В.В. Новые крылатые металлы // Наука и жизнь. 2012. № 6. С. 22-23.
43. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминий-литиевые сплавы для самолетных конструкций // ТЛС. 2007. № 2. С. 35-38.
44. Фридляндер И.Н., Колобнев Н.И., Сандлер В.С. Алюминиевые деформируемые сплавы. Алюминий-литиевые сплавы. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II-3. Под ред. Фридляндера И.Н., Каблова Е.Н., Сенаторовой О.Г., Шалина Р.Е. // М.: Машиностроение. 2001. С. 156-185.
45. 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. С. 30-33.

46. Скорняков В.И., Антипов В.В. Инновационный характер сотрудничества ОАО «КУМЗ» и ФГУП «ВИАМ» // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 11-13.
47. Фридляндер И. Н., Шамрай В. Ф., Ширяева Н. В. Фазовый состав и механические свойства алюминия с магнием и литием // Изв. АН СССР. Металлы. 1965. № 2. С. 153-158.
48. Антипов В.В., Вахромов Р.О., Оглодков М.С., Романенко В.А., Пантелеев М.Д. Свариваемые алюминий-литиевые сплавы третьего поколения // В сборнике: Роль фундаментальных исследований при реализации "Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. Сборник докладов III Всероссийской научно-технической конференции. ФГУП «ВИАМ». 2016. С. 2.
49. Антипов В.В. Технологичный алюминий-литиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе // Металлургия. 2012. № 5. С. 36-39.
50. Fridlyander I.N., Antipov V.V., Fedorenko T.P. Product Properties of High Workability 1441 Al-Li Alloy // Proceedings of International Conference of Aluminium Alloys. ICAA-9. 2004. P. 1051-1054
51. Antipov V.V., Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Sidelnikov V.V., Lukina N.F., Mitrakov O.V, Lavro N.A High-Manufacturable Al-Li 1441 Alloy and Fible-Metall Laminates (FML) on its Basis // Summary of Conference Proceedings Aluminium Two Thousand. 2007. 22 p.
52. Лещинер Л.Н., Кишкина С.И., Старова Е.Н., Федоренко Т.П., Булгакова Е.Н. Свойства неплакированных и плакированных листов из сплава 1441 // Цветные металлы. 1994. № 4. С. 56-59.
53. Лещинер Л.Н., Латушкина Л.В., Федоренко Т.П. Сплав 1441 системы Al–Cu–Mg–Li // Тез. докл. Всесоюз. Науч. конф. Металловедение сплавов алюминия с литием. М.: ВИЛС. 1991. С. 76-77.

54. Gudladt H.-J, Lendvai J., Schneider J. Precipitation strengthening and its influence in the mechanical behavior of cyclically deformed Al-Li alloys // Acta Metall.1989. v.37. N 12. P.3327-3333
55. Na J., Xiang G., Zi-qiao Z. Microstructure evolution of aluminum-lithium alloy 2195 undergoing commercial product // In: Transactions of nonferrous metals society of China. 2010. P. 740–745.
56. Фридляндер И.Н., Каблов Е.Н., Грушко О.Е., Боровских С.Н., Иванова Л.А. Сплав на основе алюминия. Патент 2237098 Рос. Федерация. Опубл. 24.07.2003.
57. Клочкова Ю.Ю., Клочков Г.Г., Романенко В.А., Попов В.И. Структура и свойства листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы. 2015. № 4. С. 3-8.
58. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С., Клочкова Ю.Ю. Высокопрочные сплавы системы Al-Cu-Li с повышенной вязкостью разрушения для самолетных конструкций // Цветные металлы. 2013. № 9. С. 66-71.
59. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al-Cu-Li-Mg // Труды ВИАМ. 2014. № 7. Ст. 01 (viam-works.ru).
60. 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.
61. Шамрай В.Ф., Клочкова Ю.Ю., Лазарев Э.М., Гордеев А.С., Сиротинкин В.П. Исследование структурных состояний листов из алюминий-литиевого сплава В-1469 // Металлы. 2013. № 5. С. 77-84.
62. Шамрай В.Ф., Грушко О.Е., Тимофеев В.Н., Лазарев Э.М., Клочкова Ю.Ю., Гордеев А.С. Структурные состояния материала прессовок и листов сплава системы Al-Cu-Li, легированного серебром // Металлы. 2009. № 3. С. 53-59.

63. Smith A. Aluminium-lithium alloys in helicopter airframes // Aerospace materials. Chapter 4. 2001 (www.slideshare.net).
64. Алюминиевые сплавы. Плавка и литье алюминиевых сплавов. Справочное руководство. Т. III. Под ред. Добаткина В.И. // М.: Металлургия. 1984. 351 с.
65. 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. Опубл. 20.06.2006.
66. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Антипов В.В., Хохлатова Л.Б., Журавлева П.Л. Фазовые превращения в процессе длительных температурных нагревов для промышленных сплавов 1424, В-1469 и 1441 // Физика металлов и металловедение. 2011. № 3. С 253-261.
67. 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 // In: The 12-th International Conference of Aluminium Alloys: Proceedings of the Conference. Yokohama. 2010. P. 1984-1989.
68. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Антипов В.В., Зайцев Д.В., Клочкова Ю.Ю. Применение диаграмм фазовых превращений при старении для оптимизации режимов старения в Al-Li сплавах В-1469, 1441 // Металлы. 2009. № 6. С. 60-67.
69. Клочкова Ю.Ю. Формирование структуры и свойств холоднокатаных листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Диссертация канд. техн. наук: 05.16.01. М.: ВИАМ. 2014. 148 с.
70. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1. С. 8-12.
71. Alekseev A.A., Lukina E.A.,Khokhlatova L.B., Antipov V.V., Treninkov I.A., Phase Transformations in Alloy 1424 (Al-Li-Mg) and 1441

(Al-Li-Cu-Mg) // During Long Term Low-Temperature Exposur (LLTE). Proceedings of ICAA-11. 2008. P. 1001-1005.

72. Лукина Е.А. Фазовые превращения в Al-Li сплавах при старении и в процессе длительных низкотемпературных нагревов // Автореферат дис. к.т.н. М.: ВИАМ. 2011. 23 с.
73. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами // М.: Металлургия. 1975. 248 с.
74. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф. и др. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 226-230.
75. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В., Попов В.И., Ершов А.С. Высокопрочные, трещиностойкие, легкие алюмстеклопластики СИАЛ - перспективные материалы для авиационных конструкций // ТЛС. 2009. № 2. С. 29-31.
76. Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Нефедова Ю.Н. Коррозионная стойкость и механические свойства слоистого конструкционного материала на основе тонких листов алюминиевых сплавов // В сборнике: Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов. Сборник докладов научно-технической конференции. 2016. С. 7.
77. Гречников Ф.В., Антипов В.В., Ерисов Я.А., Гречникова А.Ф. Повышение технологичности алюмостеклопластиков путем формирования в листах из сплава В95 эффективной кристаллографической текстуры // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. № 6. С. 38-43.
78. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Шестов В.В. Конструкционные слоистые материалы СИАЛ // Клеи. Герметики, Технологии. 2012. № 6. С. 13-17.

79. 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.
80. A. Vlot. Impact loading on fibre metal laminates // Int. J. Impact Engng Vol. 18, No. 3. 1996. P. 291-307.
81. Постнов В.И., Сенаторова О.Г., Каримова С.А., Павловская Т.Г., Железина Г.Ф., Казаков И.А., Абрамов П.А., Постнова М.В., Котов О.Е. Особенности формования крупногабаритных листов металлополимерных КМ, их структура и свойства // Авиационные материалы и технологии. 2009. № 4 (13). С. 23-32.
82. J. Sinke. Manufacturing of GLARE parts and structures // Appl. Compos. Mater. № 10. 2003. С. 293–305.
83. Tamer Sinmazçelik, Egemen Avcu, Mustafa Özgür Bora, Onur Çoban. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods // Materials and Design 32. 2011. P. 3671-3685.
84. R. Marissen. Flight simulation behaviour of aramidreinforced aluminium laminates (ARALL) // Engineering Frocfure Mechanics Vol. 19. NO. 2. 1984. P. 261-277.
85. L. B. Vogelesang, J. W. Gunnink. ARALL: A Materials Challenge for the next Generation of Aircraft // MATERIALS & DESIGN Vol. 7 No. 6. 1986. P. 287-300.
86. J. Schijve. Crack stoppers and ARALL laminates // Engineering Fracture Mechanics Vol. 31. No. 2. 1990. P. 405-421.
87. J. L. Teply, E. J. Barbero, J. N. Reddy. Bending, vibration and stabllity of ARALL® laminates using a generalized laminate plate theory // Int. J. Solids Structures Vol. 27. No 5. 1991. P. 585-599.
88. A. P. Mouritz. Residual tensile strength of ballistically damaged aluminium-based laminates // Int. J. Impact Engng Vol. 13, No. 2. 1993. P. 319-328.

89. C. T. Sun, A. Dicken, H. F. Wut. Characterization of impact damagein ARALL laminates // Composites Science and Technology 49. 1993. P. 139-144.
90. Yan Hai, Ren Rongzhen,Tao Chunhu, Li Hongyun. Study on ARALL failure behaviour under tensile loading // Scripta Mataiaha, Vol. 35, No. 12. 1996. P. 1379-3184.
91. Laurens B.V. Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structures // Industrial & Engineering Chemistry. 1983. № 22 (3). P. 492-496.
92. Z.-H. Jin, R. C. Batra. Residual strength of centrally cracked metal/fiber composite laminates // Materials science and engineering. A216. 1996. P. 117-124.
93. Михайлин А.Ю. Ароматические полиамиды и их применение в технике // Полимерные материалы. № 4. 2001. С.6-8.
94. Постнов В.И., Сенаторова О.Г., Железина Г.Ф., Казаков И.А., Абрамов П.А., Герасимов В.А., Постнова М.В. Опыт применения МПКМ АЛОР Д16/41 в носовой части крыла самолета АН-124-100 // Авиационные материалы и технологии. 2009. № 4 (13). С. 8-17.
95. Wang W.X., Takao Y., Matsubara T. Galvanic corrosion-resistant carbon fiber metal laminates // Тезисы доклада на международной конференции 16TH international conference on composite materials. 2007. P. 1-10.
96. Lin CT, Kao PW, Yang FS. Fatigue behaviour of carbon fibre-reinforced aluminium laminates. Composites. 1991. № 22 (2). P. 135-41.
97. Almeida R.S., Damato C.A., Botelho E.C., Pardini L.C., Rezende M.C. Effect of surface treatment on fatigue behavior of metal/carbon fiber laminates // J Mater Sci. № 43. 2008. P. 3173–3179.
98. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А. Влияние исходных компонентов на механические характеристики слоистого металлополимерного композиционного материала «алюминий-углепластик» // Материаловедение. 2017. № 5. С. 38-42.

99. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Ильичев А.В., Соловьева Н.А. Исследование механических характеристик слоистого металлополимерного композиционного материала на основе листов алюминия и слоев углепластика // Вопросы материаловедения. 2018. № 4 (96). С. 86-96.
100. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Павловская Т.Г., Волков И.А. Проблема контактной коррозии при создании слоистых металлополимерных композиционных материалов на основе алюминия и углепластика // Вопросы материаловедения. 2016. № 1 (85). С. 127-133.
101. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Волков И.А., Соловьева Н.А. Ингибиторы коррозии в составе слоистого металлополимерного композиционного материала на основе алюминия и углепластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. № 4 (52). С. 06. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-6-6.
102. Каблов Е.Н., Железина Г.Ф., Войнов С.И., Каримова С.А., Павловская Т.Г. Композиционный слоистый материал и способ его получения. Патент на изобретение 2565186 Рос. Федерация. Опубл. 20.10.2015 г.
103. Каблов Е.Н., Железина Г.Ф.,Войнов С.И., Павловская Т.Г., Волков И.А. Композиционный слоистый материал с комплексной системой защиты. Патент на изобретение 2595684 Рос. Федерация. Опубл. 27.08.2016 г.
104. Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Сидельников В.В. Новый класс конструкционных слоистых алюмополимерных композитов типа СИАЛ // Автоматическая сварка. Украина. 1997. № 6. С. 17-21.
105. Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Сидельников В.В. и др. Структура и свойства конструкционных алюмостеклопластиков марки СИАЛ // Труды конф. «Слоистые композиционные материалы - 98». Волгоград. 1998. С.131-133.
106. Фридляндер И.Н, Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Сидельников В.В., Дементьева Л.А. Слоистые металлополимерные композиты // Цветные

металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Энциклопедия. М. Машиностроение. 2001. С.185-195.

107. Фридляндер И.Н., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г. и др. Клееные металлические и слоистые композиты. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы Т. II-3. Под ред. Фридляндера И.Н., Каблова Е.Н. // М.: Машиностроение. 2001. С. 814-832.
108. Слоистые композиционные материалы - 98 // Сборник трудов международной конференции. Волгоград. 1998. С. 30-32, 86-88, 170-171.
109. Аниховская Л.И., Дементьева Л.А., Каблов Е.Н., Каримова С.А., Лавро Н.А., Лямин А.Б., Панченко П.В., Сандлер В.С., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Фридляндер И.Н. // Слоистый композиционный материал и изделие, выполненное из него. Патент 2185964 Рос. Федерация. Опубл. 27.07.2002.
110. Каблов Е.Н.,Фридляндер И.Н., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г., Деменьтьва Л.А., Сидельников В.В., Лямин А.Б., Трунин Ю.П., Чубковец Л.А., Лавро Н.А., Постнов В.И. Слоистый композиционный материал и изделие из него. Патент 2238850 Рос. Федерация. Опубл. 12.03.2003.
111. Vlot A., Grunnink J.W. Fibre Metal Laminates an introduction //In: Kluwer Academic Publishers. 2001. P. 527.
112. Gunnink J.W. Hybrid Structures, The New Standard for Advanced Primary AircraftStructures // AeroMat 2007: 25 Years of Aerospace Evolution: Materials, Design, Manufacturing, Certification, Baltimore. MD. USA. June 25 – 28. 2007.
113. Sang Yoon Parka, Won Jong Choi, Chi Hoon Choi, Heung Soap Choi. Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate // Composite Structures 185. 2018. P. 684-698.
114. Borgonje B., Ypma M.S. Long term behaviour of GLARE // Appl. Compos. Mater. № 10. 2003. С. 243-255.

115. Bucci R.J. et al. Large Panel Validation of Advanced Metallic and Hybrid Structural Concepts for Next-Gen Transport Aircraft // AeroMat 2007. Baltimore. USA. June 2007.
116. Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Нефедова Ю.Н. Структура и свойства тонких листов Al-Li сплава 1441 и слоистый алюмостеклопластик на их основе // Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов. Сборник докладов научно-технической конференции. 2016. С. 7.
117. Vlot A. Glare history of development of a new aircraft material // In: Kluwer Academic Publishers. 2001. P. 222.
118. Beumler Th. Flying GLARE – A contribution to aircraft certification issues on strength properties in non-damaged and fatigue damaged GLARE structures // Delft University of Technology. PhD Thesis. 2004.
119. Qi C., Zhidong G., Zengshan L., Zhaojie J., Yue Z. Experimental investigation on impact performances of GLARE laminates // Chinese Journal of Aeronautics. 2015. V. 28. I. 6. P. 1784-1792.
120. Gunnink J.W., Vlot A., De Vries T.J., Van Der Hoeven W. GLARE technology development 1997-2000 // Applied Composite Materials. 2002. V. 9. I. 4. P. 201-219.
121. Fredell R.S., Gunnink J.W., Bussi R.G., Hinrichsen J. «Carefree» hybrid wing structures for aging usaf transports // First International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures. TU Delft. September 25-28. 2007.
122. Nikolaos H., Alexopoulos D., Dalakouras Charis J., Skarvelis Panagiotis, Kourkoulis Stavros K. Accelerated corrosion exposure in ultra-thin sheets of 2024 aircraft aluminium alloy for GLARE applications // Corrosion Science. 2012. P. 289-300.
123. Tolga Dursun, Costas Soutis. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // Materials and Design. 2014. P. 862-871.

124. Abdul Khadar Syed, Xiang Zhang, James E. Moffatt, Michael E. Fitzpatrick. Effect of temperature and thermal cycling on fatigue crack growth in aluminium reinforced with GLARE bonded crack retarders // International Journal of Fatigue 98. 2017. P. 53-61.
125. Gisario A., Barletta M. Laser forming of glass laminate aluminium reinforced epoxy (GLARE): On the role of mechanical, physical and chemical interactions in the multi-layers material // Optics and Lasers in Engineering 110. 2018. P. 364-376.
126. Giasin K., Ayvar-Soberanis S. An Investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA // Composite Structures 159. 2017. P. 745-760.
127. Lia H., Xu Yi., Hua X., Liu C., Tao J. Bending failure mechanism and flexural properties of GLARE laminates with different stacking sequences // Composite Structures 187. 2018. P. 354-363.
128. Beumler Th., Starikov R., Gennai A., Senatorova O.G. Controlling the Damage with Fiber Metal Laminates Structures // First International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures. TU Delft. The Netherlands. 2007. P. 914 – 925.
129. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Антипов В.В. Слоистые алюмополимерные материалы СИАЛ // Юбилейный научно-технический сборник «Авиационные материалы». М. ВИАМ-75лет. 2007. С.188-192.
130. Антипов В.В., Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Сенаторова О.Г. Опыт применения Al-Li сплава 1441 и слоистого материала на его основе в гидросамолетах // Цветные металлы. 2013. № 8. С. 46-50.
131. Antipov V.V, Senatorova O.G., Beumler Th., Ijpma M. Investigation of FML New Family on the Base of Al-Li Alloy with Lower Density // Proc. of ECAA-1. Bremen. Germany. 2011. P. 222-224.

132. Antipov V.V, Senatorova O.G., Beumler Th., Ijpma M. Investigation of FML New Family on the Base of Al-Li Alloy with Lower Density // Materials Science and Engineering Technology. 2012. V. 43. № 4. P. 350-355.
133. Bucci R.J. (Alcoa Technical Center). Advanced Metallic and Hybrid Structural Concepts // USAF Structural Integrity Program Conference. 2006. 45 p.
134. Roebroeks Geert H.J.J., Hooijmeijer Peter A., Kroon Erik J., Heinimann Markus B. The development of central // First International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures. 2009. 16 p.
135. Plokker M. , Daverschot D. , Beumler T. Hybrid structure solution for the A400M wing attachment frames // 25th ICAF Symposium – Rotterdam, 27-29 May 2009.
136. Laminate of metal sheets and polymer: pat. 0256370 US; publ. 20.10.2011.
137. Hans-Juergen Schmidt, Bianka Schmidt-Brandecker. Effect of fatigue and damage tolerance material properties on the efficiency of aircraft structures // ICAA13. 2012.
138. Marcus Heinimann, Bucci R.J., Kulak M. Advanced concepts and validation programs for Aerospace Structures // Conference Alcoa Technical Center. 2007. P. 1-27.
139. Ганс-Юрген Шмидт (H.-J. Shmidt) Материалы 2-ой конференции по свойствам материалов и компонентов под переменной амплитудной нагрузкой // AeroStruc. 2009. 20 с.
140. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмостеклопластики СИАЛ-1441 и сотрудничество с «Airbus» и «TU Delft» // Цветные металлы. 2013. № 9. С. 50-53.
141. Фридляндер И.Н., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Дементьева Л.И., Каримова С.А., Лямин А.Б. Трещиностойкие высокопрочные легкие слоистые композиты класса СИАЛ для ремонта обшивок планера самолета // Авиационные материалы и технологии. 2002. № 1. С. 35-41.

142. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Молостова И.И. Способ термической обработки полуфабрикатов из высокопрочного алюминиевого сплава и изделия, выполненные из этих полуфабрикатов. Патент на изобретение 2235800 Рос. Федерация. Опубл. 12.03.2003.
143. 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. Опубл. 14.07.2004.
144. Каблов Е.Н., Фридляндер И.Н., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г., Дементьева Л.А., Сидельников В.В., Лямин А.Б., Каримова С.А., Сандлер В.С., Лавро Н.А., Панченко П.В. Слоистый композиционный материал и изделие, выполненное из него. Патент на изобретение 2185964. Опубл. 19.01.2001.
145. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Митраков О.В., Попов Ю.О., Постнов В.И. Высокотехнологичный Al-Li сплав 1441 и слоистые материалы сиал на его основе // В книге: Актуальные вопросы авиационного материаловедения. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2007. С. 34.
146. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект & Технологии. 2016. № 2. С.41-46.
147. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8-18.
148. Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов // М.: Металлургия. 1981. 280 с.
149. Вахромов Р.О., Ткаченко Е.А., Лукина Е.А., Селиванов А.А. Влияние гомогенизационного отжига на структуру и свойства слитков из сплава 1933 системы Al-Zn-Mg-Cu // Труды ВИАМ. № 11. 2015. С. 3-12.

150. Серебренникова Н.Ю. Особенности формирования структуры и механических свойств слоистых гибридных материалов на основе алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков // Диссертация канд. техн. наук: 05.16.09. М.: ВИАМ. 2017. 140 с.
151. Антипов В.В., Лукина Е.А., Сенаторова О.Г., Серебренникова Н.Ю., Сбитнева С.В. Влияние дополнительных нагревов на структуру и механические свойства листов Al-Li сплава 1441, входящих в состав слоистых гибридных панелей // ТЛС. 2016. № 4. С. 37-42.
152. Moriniere F.D., Alderliesten R.C., Benedictus R. Modelling of impact damage and dynamics in fibre-metal laminates - A review // International Journal of Impact Engineering. 2014. № 67. P. 27-38.
153. Iaccarino P., Langella A., Caprino G. A simplified model to predict the tensile and shear stress-strain behaviour of fibreglass/aluminium laminates // Composites Science and Technology. 2007. № 9. P. 1784-1793.
154. Kamocka M., Zglinicki M., Mania R. J. Multi-method approach for FML mechanical properties prediction // Composites Part B: Engineering. 2016. № 91. P. 135–143.
155. Moussavi-Torshizi S., Dariushi S., Sadighi M., Safarpour P. A study on tensile properties of a novel fiber/metal laminates // Materials Science and Engineering A. 2010. № 527. P. 4920-4925.
156. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. Механика разрушения композитов. Справочник. Композиционные материалы. Под ред. Васильева В.В., Таронопольского Ю.М. // М.: Машиностроение. 1990. С. 158-188.
157. Robert M. Jones. Mechanics of Composite Materials // CRC Press. 1998. 337 p.
158. Васильев В. В., Добряков А. А., Дудченко А. А. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов // Учебное пособие для авиац. спец. вузов и др. Под ред. Васильева В. В. М.: МАИ. 1985. 218 с.

159. Антипов В.В., Добрянский В.Н., Короленко В.А., Лурье С.А., Серебренникова Н.Ю., Соляев Ю.О. Оценка эффективных механических характеристик слоистого алюмостеклопластика в условиях одноосного растяжения // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 221-229.
160. Каримова С.А., Кутырев А.Е., Павловская Т.Г., Захаров К.Е. Низкотемпературное уплотнение анодно-оксидных покрытий на деталях из алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 4. С. 9–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-9-17.
161. Павловская Т.Г., Волков И.А., Козлов И.А., Наприенко С.А. Экологически улучшенная технология обработки поверхности алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. № 7. Ст. 02. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2.
162. Кулюшина Н.В., Козлов И.А., Кутырев А.Е., Ваграмян Т.А. Адгезионные покрытия на основе триалкоксисиланов для алюминия и стали // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. № 8. Ст. 05. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-5-5.
163. Войтович В.А. Способы подготовки поверхности изделий из металлов и сплавов // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 9. С. 19-23.
164. Скопинцев В.Д. Оксидирование алюминия и его сплавов // М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2015. 120 с.
165. Ufferman B., Abke T., Barker M. et al. Mechanical properties of joints in 5052 aluminum made with adhesive bonding and mechanical fasteners // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2018. Vol. 83. P. 96–102.
166. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. № 11. С. 16-21.
167. Курс М.Г. Атмосферная коррозионная стойкость перспективных Al-Li сплавов при проведении натурно-ускоренных испытаний в условиях умеренно теплого климата // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 2. С.88-94.

168. Anderson Robert A., Grace William B.H. Fiber-metal laminate adhesive coating. The Boeing Co. Патент EP 6797376. Опубл. 28.09.2004.
169. 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. 2018. № 4 (64). С. 59-65. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
170. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмостеклопластиков на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. Специальный выпуск: Перспективные конструкционные материалы и технологии. С. 174-184.
171. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Бочарова Л.И., Аниховская Л.И., Лукина Н.Ф. Композиционные материалы клеевые на основе стеклянных и углеродных наполнителей // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. № 1. С. 24-27
172. Каблов Е.Н., Минаков В.Т., Аниховская Л.И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2002. № 1. С. 61-65.
173. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Свойства и назначение композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. № 8. Ст. 06. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 05.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-6-6.
174. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Бочарова Л.И., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Петрова А.П. Свойства композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 6. С. 19-24.
175. Lukina N.F., Dement’eva L.A., Serezhenkov A.A., Kotova E.V., Senatorova O.G., Sidel’nikov V.V., Kutsevich K.E. Adhesive prepregs and composite

materials on their basis // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 1022-1024.

176. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3 (42). С. 3-8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
177. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Выбор схемы расположения высокомодульных слоёв в многослойной гибридной пластине для её наибольшего сопротивления потере устойчивости // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S4. С. 109-117. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-109-117.
178. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. Расчет на прочность гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава и слоистого алюмостеклопластика // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 1 (40). С. 53-61. DOI 10.185.77/2071-9140-2016-0-1-53-61.
179. Антипов В.В., Котова Е.В., Серебренникова Н.Ю., Петрова А.П. Клеевые связующие и клеевые препреги для алюмополимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). С. 44-54.
180. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Шестов В.В. Использование клеевых препрегов в слоистых гибридных конструкциях на основе алюминий-литиевых сплавов и СИАЛа // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 3. С. 21-30. materialsnews.ru.
181. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи //Авиационные материалы и технологии.2012. № S. С. 328-335.

182. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и слоистые материалы на их основе //Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 19-21.
183. Кириенко Т.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Петрова А.П. Исследование реологических свойств клеевых связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. № 2. С. 6-8.
184. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Самохвалов С.В., Сидельников В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В., Нефедова Ю.Н. Способ получения слоистого металлостеклопластика. Патент на изобретение RUS 2618072. Публ. 05.11.2015.
185. Трифонова С.И., Генералов А.С., Далин М.А. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2016. № 19 (1). С. 31-35.
186. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Самохвалов С.В., Сенаторова О.Г., Шестов В.В., Сидельников В.В. Способ соединения слоистого алюмостеклопластика. Патент 2570469 Рос. Федерация. Опубл. 10.12.2015.
187. 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 на изобретение RUS 2641744 Рос.Федерация. Опубл. 02.03.2017.
188. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова. О.Г., Махсидов В.В., Шестов В.В., Иошин Д.В. Слоистый алюмостеклопластик и изделие, выполненное из него. Патент 2600765 Рос. Федерация. Опубл. 04.10.2016.
189. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Шестов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Попов Ю.О. Градиентный металлостеклопластик и изделие, выполненное из него. Патент 2655215. Рос. Федерация. Опубл. 15.09.2015.

190. Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Новый класс гибридных конструкционных материалов // Металлы Евразии. 2015. № 2. С. 54-55.
191. 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.
192. Тимошенко С. Сопротивление материалов // Рипол Классик. 2013. 321 с.
193. Lurie, S., Solyaev, Y. (2018). Revisiting bending theories of elastic gradient beams // International Journal of Engineering Science. № 126. P. 1-21.
194. 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.
195. Антипов В.В., Прокудин О.А., Лурье С.А., Серебренникова Н.Ю., Соляев Ю.О., Коновалов А.Н. Оценка межслоевой прочности алюмостеклопластика по результатам испытаний образцов на трехточечный изгиб // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 229-238.
196. Kishkina S.I. Mechanical testing of composite materials // Metal Matrix Composites. Chapman and Hall. 1992. P. 571-600.
197. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов // Учебное пособие. М.: Наука. 1986. 560 с.
198. Khan S.U., Alderliesten R.C., Benedictus R. Fatigue crack growth prediction of fibre reinforced metal laminates under variable amplitude loading // ICAS 26th International Congress of the aeronautical sciences. 2008.
199. Kotzakolios T., Vlachos D.E., Kostopoulos V. Blast response of metal composite laminate fuselage structures using finite element modeling // Composite Structures. 2011. № 93 P. 665-681.
200. Po-Yu Chang, Jenn-Ming Yang. Modeling of fatigue crack growth in notched fiber metal laminates // International Journal of Fatigue. 2008. № 30. P. 2165-2174.

201. 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.
202. 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. Т. 37. № 3. С. 195-199.
203. 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. С. 43-54.
204. Антипов В.В., Коновалов А.Н., Серебренникова Н.Ю., Сомов А.В., Нефедова Ю.Н. Влияние структуры на огнестойкость и огненепроницаемость алюмостеклопластиков класса СИАЛ и возможности применения данных материалов в авиастроении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2019. № 1. С. 40-46. DOI: 18577/2307-6046-2019-0-1-40-46.
205. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование пожаростойкости слоистых гибридных алюмостеклопластиков класса СИАЛ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 36-41.
206. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование пожаростойкости слоистых гибридных алюмостеклопластиков класса СИАЛ // Труды ВИАМ. 2014. С. 89-99.
207. Roebroeks G.H.J.J. GLARE: a structural material for fire resistant fuselages // In: AGARD Conference Proceedings. October 1996. P. 26-1; 26-13.
208. Hoijimeijer P.A. Burn-through and lightning strike in «Fibre-Metal Laminates» // Inn: Kluner Academic Publishers. 2001. P. 399-408.

209. Hagenbeek M. Characterisation of Fibre Metal Laminates under Thermo-mechanical Loadings // Netherlands. 2005. P. 17-22.
210. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Сомов А.В., Сидельников В.В., Нефедова Ю.Н. Огнестойкий слоистый металлостеклопластик и изделие, выполненное из него. Патент 2676637 Рос. Федерация. Опубл. 09.01.2019.
211. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Котова Е.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Клеевые препреги и композиционные и слоистые алюмополимерные материалы на их основе // Российский химический журнал. 2010. № 1. Т. LIV. С. 53-56.
212. Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Конструкционные слоистые алюмостеклопластики 1441-СИАЛ // МиТОМ. 2013. № 9. С. 28-32.
213. 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.
214. Антипов В.В., Старцев О.В., Сенаторова О.Г. Закономерности влагопереноса в СИАЛах // Коррозия: материалы, защита. 2012. № 3. С. 13-18.
215. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч.1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 12. С. 6-18
216. 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. С. 56-64.
217. В.И. Постнов, М.В. Постнова, И.А. Казаков, П.А. Абрамов. Особенности контурной обработки резанием листовых заготовок МПКМ в серийном производстве // Авиационные материалы и технологии. 2009. № 4. С.3-8.

218. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю., Абдуллин М.Р., Лимонин М.В. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. 2016. № 10. С. 5-19.
219. Ляховенко И.А., Хватан А.М. Расчетные допускаемые напряжения и критерии прочности силовых элементов планера самолета // Труды ЦАГИ. 1996. № 2623.
220. Антипов В.В., Орешко Е.И., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю. Гибридные материалы для применения в условиях Севера // Механика композитных материалов. 2016. № 5. С. 1-18
221. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В., Сидельников В.В. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов // Авиационные материалы. 85 лет. Юбилейный научно-технический сборник. Под ред. Каблова Е.Н. 2017. № S. С. 212-224.
222. Podzhivotov N.Yu., Kablov E.N., Antipov V.V., Erasov V.S., Serebrennikova N.Yu., Abdullin M.P., Limonin M.V. Laminated metal-polimeric materials in structural elements of aircraft // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. № 2. P. 211-221.
223. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмостеклопластики на их основе // Цветные металлы. 2016. № 8. С. 86-91.
224. Проектирование, конструкции и системы самолетов и вертолетов // Самолеты и вертолеты. Том IV-21. Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. М.: Машиностороение. 2004. С. 226-252.
225. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Гирш Р.И. Прочностные и технологические характеристики слоистых гибридных материалов на основе Al-Li сплавов для применения в крупногабаритных элементах планера самолета // В сборнике: Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья - основа инновационного развития

экономики России. Сборник докладов II Международной научно-технической конференции (посвящается 85-летию со дня основания ФГУП «ВИАМ»- ведущего материаловедческого центра страны). 2017. С. 24.

226. Антипов В.В., Сидельников В.В., Самохвалов С.В., Шестов В.В., Нефедова Ю.Н., Лялин А.А. Возможности применения слоистого алюмостеклопластика в обшивке фюзеляжа самолета // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1. С. 77-82.
227. Дуюнова В.А., Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Яковлев А.Л., Леонов А.А. Перспективные разработки в области легких материалов для современной авиакосмической техники // ТЛС. 2018. № 4. С. 28-43.
228. Зайцев М.Д., Родченко Т.С., Стойда Ю.М., Антипов В.В. Исследование долговечности натурного образца панели фюзеляжа из слоистого алюмостеклопластика // Труды ЦАГИ. 2019.
229. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186-194.

Благодарность

Автор выражает благодарность генеральному директору ФГУП «ВИАМ», академику Российской Академии Наук, профессору Каблову Е.Н. за помощь и поддержку при выполнении работ по теме диссертации.

Автор выражает признательность за содействие в исследованиях, оказанное при выполнении работы:

д.т.н., профессору Петровой А.П. и к.т.н. Лукиной Н.Ф. - в части выбора клеевых связующих для равномерной пропитки стеклонаполнителя при изготовлении препрегов;

к.т.н. Лукиной Е.А. и ведущему инженеру Зайцеву Д.В. - в части исследований микроструктур полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов;

д.т.н. Барботько С.Л. - в части исследований стойкости слоистых материалов к воздействию открытого пламени;

ведущему инженеру Попову Ю.О. и ведущему инженеру-технологу Колокольцевой Т.В. - в части выбора технологических режимов получения препрегов с оптимальным наносом связующего;

к.т.н. Соляеву Ю.О. - в части разработки принципов математических зависимостей для расчетов металлополимерных композиционных материалов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акты о внедрении и опробовании результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
И.о. Технического директора
ПАО «ВАСО»
Абрамов И.В.
«20» 02 2020 г.

АКТ № 20 от 20.02.20г

опробования технологий изготовления обшивок панелей крыла из сплавов В95оч, 1441 и гибридного материала методом автоклавного формообразования

Настоящим актом подтверждается, что в производственных условиях самолетостроительного предприятия ПАО «ВАСО» проведено положительное опробование разработанных технологий изготовления обшивок панелей крыла из сплавов В95оч, 1441 и гибридного материала методом автоклавного формообразования. Изготовлены 6 фрагментов: 2 фрагмента верхней обшивки панели крыла из листов сплава В95оч габаритами 1500х2000 мм, 4 фрагмента нижней обшивки панели крыла из плит сплава 1441 и гибридного материала габаритами 600х2000 мм.

Применение технологий изготовления обшивок методом автоклавного формообразования взамен традиционных технологий позволило изготовить фрагменты обшивок панелей крыла из листов В95очТ2 и плит 1441Т1 за один технологический цикл при совмещении процессов формообразования и термической обработки (старения), для гибридного слоистого материала - совместить процессы отверждения клеевого связующего в препрегах и формообразования поверхности обшивки крыла двойной кривизны. В результате показано снижение трудоемкости производства и цикла изготовления за счет сокращения трудоемкости операций механической обработки, межцеховых перемещений и совмещения процессов формообразования и термической обработки.

Целесообразность и эффективность применения новых технологий обусловлена повышением КИМ ориентировочно до 75 % по сравнению с КИМ приблизительно равным 45 % при традиционных способах изготовления крыльевых обшивок.

Результаты положительного опробования на ПАО «ВАСО» разработанных технологий изготовления фрагментов обшивок методом автоклавного формообразования позволяют рассмотреть вопрос об использовании данных технологий в подготовке к серийному производству изделий.

Заместитель технического директора — Соловьев В.А.

Главный технолог — Кузнецов М.В.

Главный специалист по НМ и ПКМ — Огурцов П.С.

СОГЛАСОВАНО
Советник генерального
директора ФГУП «ВИАМ»
_____ Р.И.Гирин
«15» ноября 2019г

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель секции №7
«Авиационные материалы и технологии»
НТС АО «Вертолеты России»
_____ А.К.Слизов
«15» ноября 2019 г.

Акт № 053А-191115

от 15.11.2019 г.

технологического опробования изготовлении створки капота двигателя вертолета Ка-226Т из огнестойкого слоистого алюмостеклопластика СИАЛ

В рамках работ по Государственному контракту № 17411.1770290019.18.008 от 22.02.2017 г. «Поколение 2017-2019» по разработанной ФГУП «ВИАМ» технологии изготовлен по чертежам АО «КАМОВ» прототип створки капота двигателя вертолета Ка-226Т из огнестойкого слоистого материала СИАЛ пониженной плотности (d=2,38 г/см^3) взамен используемого в конструкции титанового сплава ОТ4-1 (d=4,50 г/см^3).

В результате отработки технологических операций с применением моделирования оснастки и выбора режимов автоклавного формования в условиях ПАО «ВАСО» (г. Воронеж) изготовлены обшивка створки капота и силовые элементы из СИАЛа с необходимыми габаритными размерами и точностью контуров поверхностей, соответствующие требованиям конструкторской документации. Сборочные работы по установке жесткостных элементов из СИАЛа проводились по ранее отработанным технологиям.

Испытания, проведенные во ФГУП «ВИАМ», на образцах из слоистого материала СИАЛа, вырезанных из изготовленной створки капота двигателя вертолета, показали огненепроницаемость при 1100 °С в течение 15 мин и более, что соответствует требованиям авиационных правил, предъявляемых к материалам для использования в пожароопасных зонах авиационных конструкций.

Результаты технологического опробования подтверждают возможности использования алюмостеклопластиков СИАЛ в конструкции деталей вертолетов с преимуществом по прочностным и весовым характеристикам.

Для окончательного решения по использованию в конструкции планер вертолетов слоистого материала СИАЛ необходимо проведение дополнительных работ по сравнительной оценке ресурсных характеристик и огнестойкости деталей.

Начальник отдела специальных процессов
службы главного технолога.
Заместитель главного технолога _____ 15.11.19 А.М.Кузнецов

УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор ПАО «Ил»

_____ П.Д. Таликов

«_4_» ____03____ 2020 г.

Акт № 11424-001/26от 04.03.2020 г.

опробования технологий формообразования деталей из листов и профилей алюминий-литиевого сплава 1441, обшивок панелей крыла В95оч, 1441 и гибридного материала методом автоклавного формообразования

По результатам совместных работ с ФГУП «ВИАМ» изготовлены в соответствии с требованиями КД детали из листов и прессованных профилей алюминий-литиевого сплава 1441 пониженной плотности применительно к конструкции самолета Ил-112В и Ил-114-300 для замены деталей из алюминиевого сплава 1163. Работы выполнены по разработанным технологиям при научно-техническом сопровождении специалистов ФГУП «ВИАМ» на оборудовании и оснастке ПАО «ВАСО».

Проведено опробование технологий автоклавного формообразования и изготовлены конструктивно-подобные образцы фрагментов обшивок панелей крыла самолёта Ил-114-300 из сплавов 1441, В95оч и гибридного материала на базе листов из сплава 1441 и стеклопластиков. Результаты опробования подтвердили соответствие геометрических параметров изготовленных фрагментов параметрам 3D-моделей.

Результаты положительного опробования изготовления деталей из полуфабрикатов алюминий-литиевого сплава 1441 пониженной плотности, обеспечивающих снижение веса деталей до 10 %, и опробование технологий автоклавного формообразования для изготовления конструктивно-подобных образцов фрагментов обшивок панелей крыла из сплавов 1441, В95оч и слоистого гибридного материала на базе листов из сплава 1441 и стеклопластиков показали возможность использования алюминий-литиевых сплавов и слоистых гибридных материалов для изготовления деталей самолетных конструкций.

Заместитель главного конструктора
по технологичности — Куликов В.В.

04.03.20

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
по проектированию, НИР и ОКР
ПАО «Туполев»

_____
В.И.Солозобов

«16» июля 2020 г.

Справка о результатах совместных работ по вопросу возможности применения слоистых алюмостеклопластиков и прессованных полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов в авиационных конструкциях.

В результате совместных работ ПАО «Туполев», ФГУП «ЦАГИ» и ФГУП «ВИАМ» в рамках государственного контракта № 14411.17Б9999.18.005 от 14.02.2014 г. (шифр «Интеллект») при сравнительных испытаниях фрагментов прототипа гибридной панели центроплана самолета Ту-204 с использованием обшивки из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ и силового набора из прессованных профилей алюминий-литиевого сплава В-1469Т1 и панели с обшивкой из фрезерованного листа и прессованных профилей из алюминиевого сплава В95очТ2 для оценки весовых и ресурсных характеристик получен общий выигрыш веса конструкции согласно проведенному нами сравнительному весовому анализу в пересчете на 1 кв.метр составил 11,3 % при увеличении несущей способности при сжатии на ~ 20 % по результатам испытаний во ФГУП «ЦАГИ».

Полученные данные позволяют при проектировании и модернизации разрабатываемых авиационных конструкций рассматривать применение слоистых алюмостеклопластиков и прессованных полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов.

Начальник ПКЦ «Прочность» Д.А.Разбегаев

Протоколы испытаний во ФГУП «ЦАГИ»
(КПО панели отсека фюзеляжа самолета с обшивкой из алюмостеклопластика)

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1 ЦАГИ, испытательный центр "ПРОЧНОСТЬ" Лаборатория 18-03 Телефон 556-40-13, факс 556-45-10	Аккредитация		
	Номер	Дата выдачи	Организация
	ИЛ-045	1.11.06	Госстандарт России

П Р О Т О К О Л №25 от "20" октября 2012 г. Стр. 1 Всего 3

У Т В Е Р Ж Д А Ю
Заместитель Генерального директора
ФГУП «ЦАГИ» - начальник комплекса
прочности ЛА
_____М.Ч. Зиченков
« » _____ 2012 г.

П Р О Т О К О Л № 25
от "20" октября 2012 г

Испытания конструктивного элемента, имитирующего фрагмент обшивочной панели из СИАЛ-1441 со стрингерами

Основание для испытаний:

Дополнительное соглашение №1 от 26.09.12 г. к Договору № 4028/8505-12-12 от 26.07.2012 г.

Образцы для испытаний: Фрагмент обшивочной панели фюзеляжа с приклепанными 7-стрингерами (далее панель №1) в количестве 1 штуки. Панель размером 820х2400 мм (Рисунок 1).

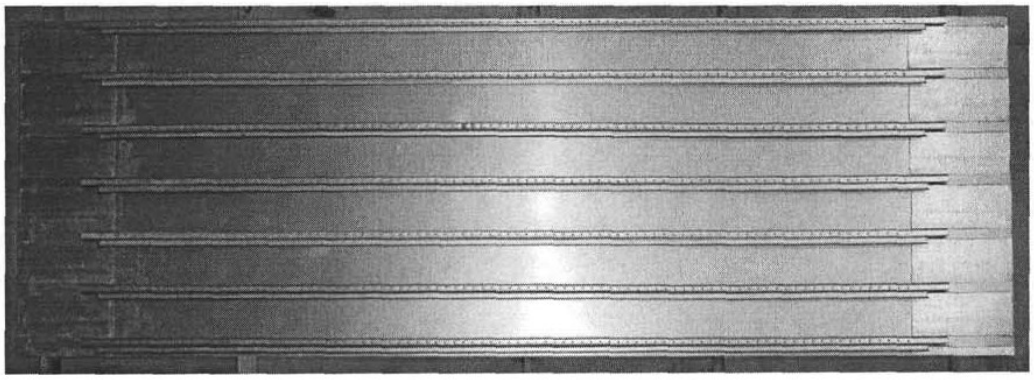
Материал образцов:

Обшивка панели №1 изготовлена из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ-3-1Р пятислойной структуры общей толщиной ~ 1,5 мм. Обшивка состоит из 3-х тонких (по ~ 0,32 мм) листов Al-Li сплава 1441Т11 и двух прослоек стеклопластика (по- 0,27 мм). Каждая прослойка стеклопластика состоит из 2-х перекрестных (50/50) монослоев из клеевого препрега с армирующими стекловолокнами при объемной доле ~ 60% (стекловолокно). Z - образные стрингеры изготовлены из Листа 1,2 Д16чАТ. Клепка прессовая

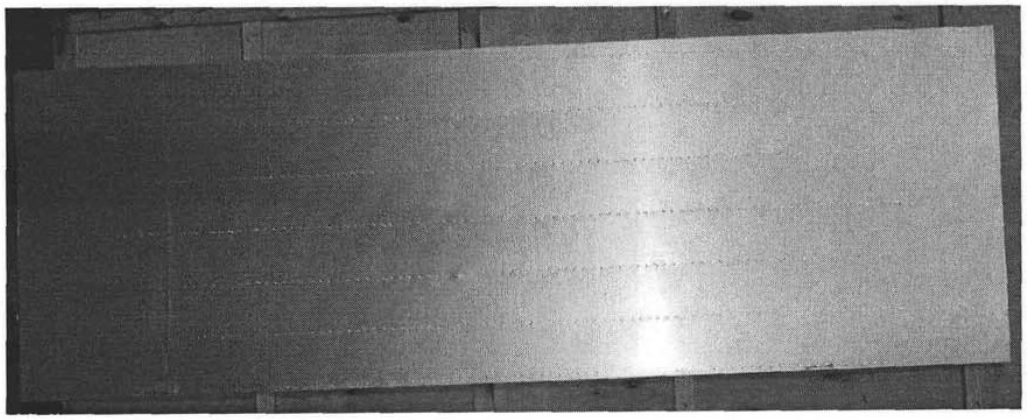
заклепками с потайной головкой с шагом 22 мм. Заклепки 3.5-7АнОкс – ОСТ34087, материал заклепок В65Т.

Программа испытаний:

Испытания проведены по методике, изложенной в **МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ** «Методика проведения усталостных испытаний конструктивного элемента, имитирующего фрагмент обшивочной панели из СИАЛ-1441со стрингерами»



а)



б)

Рисунок 1 – а) Вид на фрагмент панели со стороны ребер (стрингеров); б) Вид на фрагмент панели со стороны обшивки;

Методы испытаний:

Метод испытаний панелей – циклическое растяжение.

Испытательное оборудование:

Наименование видов испытаний и (или) определяемых характеристик (параметров)	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) испытательного оборудования	Характеристика оборудования
Испытание на усталость (циклическое растяжение панели)	Универсальная испытательная электрогидравлическая машина фирмы «MTS»	Реализуемый диапазон нагрузок, ±250 тс, погрешность измерения силы не более 1%.

Результаты испытаний:

1. Результаты испытаний на усталость панели №1 (Таблица 1). Панель снята с испытательной машины при наработке 5000 циклов для инструментального дефектоскопического контроля.

Таблица 1 - Панель №1 (обшивка панели из слоистого алюмостеклопластика СИАЛ-1441)

Образец	№ трещины	N, циклы	Характер повреждения	Примечание
Панель №1	нет	5000	Трещины не обнаружены	Продолжить испытания после проведения дефектоскопического контроля

Начальник НИО-18 НИК прочности ЛА ФГУП «ЦАГИ»

_____ В.В. Коновалов

Ответственный исполнитель

_____ М.Д. Зайцев

У Т В Е Р Ж Д А Ю
Заместитель Генерального директора
ФГУП «ЦАГИ» - начальник комплекса
прочности ЛА
_____М.Ч. Зиченков
«___» _____ 2012 г.

П Р О Т О К О Л № 26

от "20" октября 2012 г

Испытания конструктивного элемента, имитирующего фрагмент обшивочной панели из листа 1163 АТ со стрингерами

Основание для испытаний:

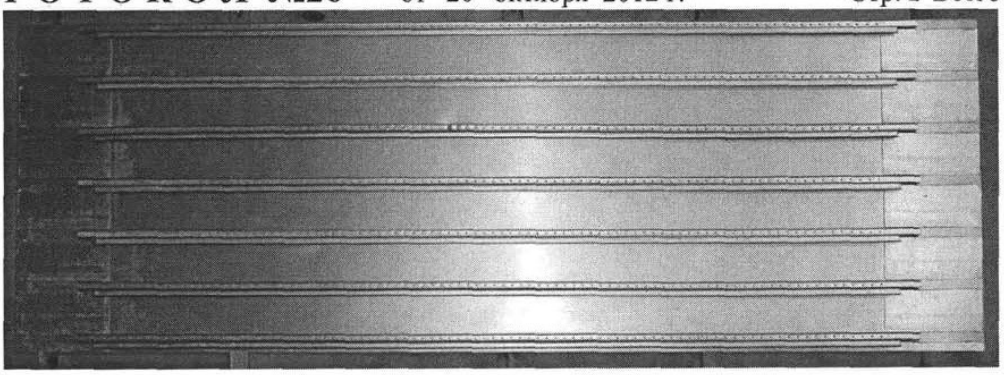
Образцы для испытаний: Фрагмент обшивочной панели фюзеляжа с приклепанными 7-стрингерами (далее панель №2) в количестве 1 штуки. Панель размером 820х2400 мм (Рисунок 1).

Материал образцов:

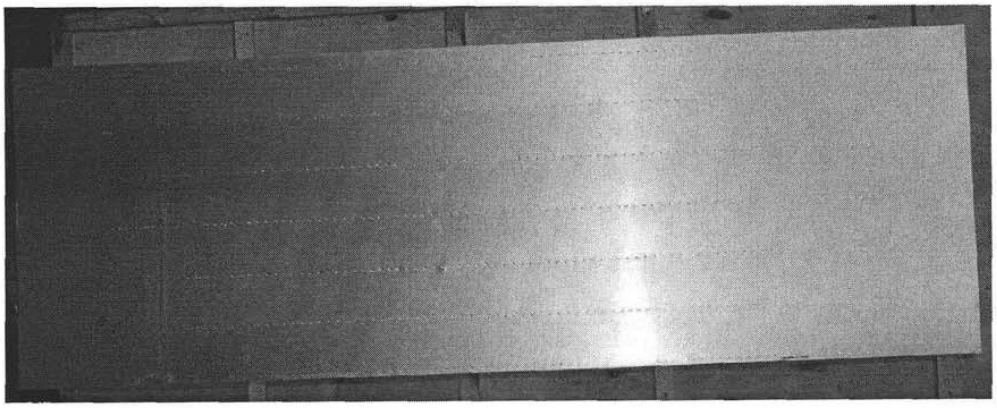
Обшивка панели №2 изготовлена из листа сплава 1163 АТ толщиной ~ 1,5 мм. Z - образные стрингеры изготовлены из Листа 1,2 Д16чАТ. Клепка прессовая заклепками с потайной головкой с шагом 22 мм. Заклепки 3.5-7АнОкс – ОСТ34087, материал заклепок В65Т.

Программа испытаний:

Испытания проведены по методике, изложенной в **МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ** «Методика проведения усталостных испытаний конструктивного элемента, имитирующего фрагмент обшивочной панели из СИАЛ-1441 со стрингерами»



а)



б)

Рисунок 1 – а) Вид на фрагмент панели со стороны ребер (стрингеров); б) Вид на фрагмент панели со стороны обшивки;

Методы испытаний:

Метод испытаний панелей – циклическое растяжение.

Испытательное оборудование:

Наименование видов испытаний и (или) определяемых характеристик	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) испытательного оборудования	Характеристика оборудования
Испытание на усталость (циклическое растяжение панели)	Универсальная испытательная электрогидравлическая машина фирмы «MTS»	Реализуемый диапазон нагрузок, ±250 тс, погрешность измерения силы не более 1%.

Результаты испытаний:

1. Результаты испытаниий на усталость панели №2 (Таблица 1). Панель установлена в захваты испытательной машины и проходит испытания. Наработка панели на момент оформления протокола указана в таблице 1.

Таблица 1 - Панель №2 (обшивка из листов сплава 1163 АТ)

Образец	№ трещины	N, циклы	Характер повреждения	Примечание
Панель №2	нет	5000	Трещины не обнаружены	-

Начальник НИО-18 НИК прочности ЛА ФГУП «ЦАГИ»

_____ В.В. Коновалов

Ответственный исполнитель

_____ М.Д. Зайцев

Протоколы испытаний во ФГУП «ЦАГИ» (КПО фрагмента гибридной панели крыла с обшивкой из алюмостеклопластика)

Протоколы испытаний

ФГУП «ЦАГИ»
Испытательный центр «Прочность»
Лаборатория 03-03

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1.
Тел. 556-45-09

Протокол испытаний № 3-1/03-03 от 20.04.2015

Заказчик	ФГУП "ВИАМ"
Адрес	ул. Радио, д.17, Москва, 105005
Объект испытаний	Четырехстрингерная гибридная панель крыла
Метод испытаний	Испытания однопролетных панелей при опирании в торец
Тип испытаний	Сжатие
Испытательная машина	Испытательная машина Riehle-300. Свидетельство о поверке № П.3.28-11-15 от 27.02.2015
Условия окружающей среды:	температура 20,4^{0}С, влажность 39,6 %

Нагружение до 30000 кгс.

Результаты испытаний:

Панель	P	$P_{м.п.у.}$	$\sigma_{м.п.у.}$	Примечание
	кгс	кгс	кг/мм^2	
НИР-001-005.001	30000	-	-	Потери устойчивости и признаков начала разрушения не обнаружено

Испытания проводил специалист _____ А.В. Захаров

Утверждаю:

Руководитель лаборатории 03-03 _____ С.М. Наумов

ФГУП «ЦАГИ»
Испытательный центр «Прочность»
Лаборатория 03-03

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1.
Тел. 556-45-09

Протокол испытаний № 3-2/03-03 от 20.04.2015

Заказчик	ФГУП "ВИАМ"
Адрес	ул. Радио, д.17, Москва, 105005
Объект испытаний	Четырехстрингерная гибридная панель крыла
Метод испытаний	Испытания однопролетных панелей при опирании в торец
Тип испытаний	Сжатие
Испытательная машина	Испытательная машина Riehle-300. Свидетельство о поверке № П.3.28-11-15 от 27.02.2015
Условия окружающей среды:	температура 20,4^{0}С, влажность 39,6 %

Нагружение до разрушения.

Результаты испытаний:

Панель	$F_{факт}$	P_{max}	σ_{max}	$P_{м.п.у.\ общ}$	$\sigma_{м.п.у.\ общ}$
	мм^2	кгс	кг/мм^2	кгс	кг/мм^2
НИР-001-005.001	4240	185994	43,87	181450	42,80

Разрушение произошло в результате потери несущей способности панели.

Испытания проводил специалист _____ А.В. Захаров

Утверждаю:

Руководитель лаборатории 03-03 _____ С.М. Наумов

ФГУП «ЦАГИ»
Испытательный центр «Прочность»
Лаборатория 03-03

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1.
Тел. 556-45-09

Протокол испытаний № 3-3/03-03 от 22.04.2015

Заказчик	ФГУП "ВИАМ"
Адрес	ул. Радио, д.17, Москва, 105005
Объект испытаний	Четырехстрингерная гибридная панель крыла
Метод испытаний	Испытания однопролетных панелей при опирании в торец
Тип испытаний	Сжатие
Испытательная машина	Испытательная машина Riehle-300. Свидетельство о поверке № П.3.28-11-15 от 27.02.2015
Условия окружающей среды:	температура 23,0^{0}С, влажность 43,6 %

Нагружение до 30000 кгс.

Результаты испытаний:

Панель	P	$P_{м.п.у.}$	$\sigma_{м.п.у.}$	Примечание
	кгс	кгс	кг/мм^2	
НИР-001-005.002	30000	-	-	Потери устойчивости и признаков начала разрушения не обнаружено

Испытания проводил инженер 2 к _____ Е.В. Левочкина

Утверждаю:

Руководитель лаборатории 03-03 _____ С.М. Наумов

ФГУП «ЦАГИ»
Испытательный центр «Прочность»
Лаборатория 03-03

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1.
Тел. 556-45-09

Протокол испытаний № 3-4/03-03 от 22.04.2015

Заказчик	ФГУП "ВИАМ"
Адрес	ул. Радио, д.17, Москва, 105005
Объект испытаний	Четырехстрингерная гибридная панель крыла
Метод испытаний	Испытания однопролетных панелей при опирании в торец
Тип испытаний	Сжатие
Испытательная машина	Испытательная машина Riehle-300. Свидетельство о поверке № П.3.28-11-15 от 27.02.2015
Условия окружающей среды:	температура 23,0^{0}С, влажность 43,6 %

Нагружение до 100000 кгс.

Результаты испытаний:

Панель	P	$P_{м.п.у.}$	$\sigma_{м.п.у.}$	Примечание
	кгс	кгс	кг/мм^2	
НИР-001-005.002	100000	-	-	Потери устойчивости и признаков начала разрушения не обнаружено

Испытания проводил инженер 2 к _____ Е.В. Левочкина

Утверждаю:

Руководитель лаборатории 03-03 _____ С.М. Наумов

ФГУП «ЦАГИ»
Испытательный центр «Прочность»
Лаборатория 03-03

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1.
Тел. 556-45-09

Протокол испытаний № 3-5/03-03 от 22.04.2015

Заказчик	ФГУП "ВИАМ"
Адрес	ул. Радио, д.17, Москва, 105005
Объект испытаний	Четырехстрингерная гибридная панель крыла
Метод испытаний	Испытания однопролетных панелей при опирании в торец
Тип испытаний	Сжатие
Испытательная машина	Испытательная машина Riehle-300. Свидетельство о поверке № П.3.28-11-15 от 27.02.2015
Условия окружающей среды:	температура 23,0^{0}С, влажность 43,6 %

Нагружение до 150000 кгс.

Результаты испытаний:

Панель	P	$P_{м.п.у.}$	$\sigma_{м.п.у.}$	Примечание
	кгс	кгс	кг/мм^2	
НИР-001-005.002	150000	-	-	Потери устойчивости и признаков начала разрушения не обнаружено

Испытания проводил инженер 2 к _____ Е.В. Левочкина

Утверждаю:

Руководитель лаборатории 03-03 _____ С.М. Наумов

ФГУП «ЦАГИ»
Испытательный центр «Прочность»
Лаборатория 03-03

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1.
Тел. 556-45-09

Протокол испытаний № 3-6/03-03 от 22.04.2015

Заказчик	ФГУП "ВИАМ"
Адрес	ул. Радио, д.17, Москва, 105005
Объект испытаний	Четырехстрингерная гибридная панель крыла
Метод испытаний	Испытания однопролетных панелей при опирании в торец
Тип испытаний	Сжатие
Испытательная машина	Испытательная машина Riehle-300. Свидетельство о поверке № П.3.28-11-15 от 27.02.2015
Условия окружающей среды:	температура 23,0^{0}С, влажность 43,6 %

Нагружение до разрушения.

Результаты испытаний:

Панель	$F_{факт}$	P_{max}	σ_{max}	$P_{м.п.у.\ общ}$	$\sigma_{м.п.у.\ общ}$
	мм^2	кгс	кг/мм^2	кгс	кг/мм^2
НИР-001-005.002	4292	187646	43,72	187646	43,72

Разрушение произошло в результате потери несущей способности панели.

Испытания проводил нач. установки _____ Я.С. Боровская

Утверждаю:

Руководитель лаборатории 03-03 _____ С.М. Наумов