

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Антипова Владислава Валерьевича
**«НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СЛОИСТЫХ
АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С ВАРЬИРУЕМЫМИ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ЛИСТОВ ИЗ
АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ»**

на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
05.16.09 Материаловедение (машиностроение)

Актуальность темы

Технический прогресс в области создания современных летательных аппаратов постоянно требует новые конструкционные материалы все с более высокими физико-механическими и служебными свойствами. Одними из таких являются металлополимерные композиционные материалы.

Поиск новых подходов к разработке структур металлополимерных композиционных материалов и режимов их изготовления, методов проектирования конструкций из них для замены традиционно применяемых алюминиевых деформируемых сплавов определяет актуальность и своевременность постановки данной работы.

На текущий момент использование известных алюминиевых материалов не позволяет существенно снизить весовые характеристики самолета. В последние годы в России и за рубежом ведутся работы по разработке и исследованию слоистых металлополимерных композиционных материалов, которые должны обладать сочетанием высокой прочности и пониженной плотности, а также другими требуемыми эксплуатационными характеристиками для применения в авиастроении. За рубежом уделяется большое внимание созданию и применению слоистых материалов GLARE, что сопровождается большим объемом исследований и испытаний.

Диссертационная работа Антипова В.В., выполненная в соответствии со «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» по направлениям 6.2 «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» и 8 «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения», решает задачи по разработке научно-технологических основ получения и изготовления слоистых алюмокомпозитов нового поколения на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности, обладающих улучшенными физико-механическими свойствами (пониженной плотностью, высокими прочностью и сопротивлением росту трещины усталости).

В связи с вышесказанным данная работа является актуальной и представляет значительный интерес для предприятий Российской промышленности, специализирующихся на изготовлении материалов, обеспечивающих создание современных образцов авиационной техники.

Структура и основное содержание работы.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка используемых сокращений и обозначений, перечня разработанной нормативной документации, списка

литературы, который содержит 229 литературных источников, и приложений. Работа включает 327 страниц машинописного текста, 129 рисунков и 62 таблицы. Результаты работы прошли авторитетную апробацию на 18 научных конференциях и в достаточной мере освещены в 51 опубликованной работе, в том числе 46 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 10 статей в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. А также получено 9 патентов РФ на изобретения.

Во **введении** обосновывается актуальность тематики диссертационной работы, поставлена цель, дана оценка научной новизны и практической значимости работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора, методы исследования, апробация результатов работы.

В *литературном обзоре главы 1* автором проведен широкий обзор отечественной и зарубежной литературы по традиционным алюминиевым сплавам, конструкционным алюминий-литиевым сплавам, металлополимерным слоистым материалам на основе алюминиевых листов для изготовления элементов и деталей авиационных конструкций, описаны тенденции развития данного направления при разработке современных материалов. Рассмотрены слоистые материалы с использованием металлических и полимерных составляющих, такие как разработанные в России, алюмостеклопластики типа СИАЛ, алюмоорганопластики типа АЛОР, алюмоуглепластики типа АЛКАР и зарубежные слоистые материалы типа GLARE, ARALL, CARALL, обладающие комплексом свойств: высокой трещиностойкостью, повышенной прочностью и пониженной плотностью. Показаны преимущества и недостатки катаных полуфабрикатов из традиционных алюминиевых и высокомодульных алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности, слоистых композиционных материалов.

Дальнейшее развитие новых металлополимерных композиционных материалов и внедрение в конструкцию планера современных самолетов слоистых алюмостеклопластиков нового поколения на основе алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности и стеклопластиков, армированных стекловолокном, позволит дополнительно снизить массу изделия.

Литературный обзор является полным и отражает состояние вопроса по теме диссертации.

Глава 2 «Объекты и методы исследований» содержит данные по материалам, оборудованию и используемым при проведении исследований методам, также описана методика статической обработки данных. Исследования проведены с использованием современного сертифицированного оборудования в соответствии с действующими стандартами и методиками Российской Федерации.

В **главе 3 «Исследование влияния технологических параметров процессов изготовления на физико-механические свойства металлической составляющей алюмостеклопластиков»** представлена 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. Исследовано влияние технологических параметров термообработки, слитков, холодной прокатки, различных режимов старения на структуру, механические и

коррозионные свойства листов из сплава 1441. На основе полученных результатов разработана технология гомогенизации и деформации плоских слитков из алюминий-литиевого сплава 1441, которая позволила впервые в мире произвести методом холодной рулонной прокатки листы толщиной 0,25 мм из сплава 1441. Подобраны режимы трехступенчатого старения, обеспечивающие получение стабильного комплекса механических и коррозионных свойств тонких листов.

В главе 4 «Разработка слоистых структур алюмостеклопластиков на базе алюминий-литиевых сплавов и клеевых препрегов, армированных стекловолокном» представлена разработка алюмостеклопластиков с различными схемами армирования на базе алюминий-литиевых сплавов и клеевых препрегов, армированных волокном в виде стеклоровинга. В работе при подборе структурных составляющих материала (алюминий-литиевых листов и стеклопластиков) использованы методы математического моделирования, что позволило сократить количество изготовленных экспериментальных структур. Разработана аналитическая математическая модель для прогнозирования свойств слоистых материалов.

Антиповым В.В. приведены состав и структуры гибридных слоистых материалов с применением листов из алюминий-литиевых сплавов 1441, В-1469 и стеклопластиков на базе клеевых препрегов марок КМКС-2м.120, представлены результаты расчетов механических характеристик данных материалов с помощью разработанной математической модели. Проведен анализ полученных экспериментальных данных свойств слоистых материалов и результатов расчетов механических характеристик с помощью математической модели - совпадение результатов расчетов и экспериментов определено в пределах $85 \div 90$ % точности.

Показано, что при подготовке поверхности алюминий-литиевых листов методом анодного оксидирования в комбинированном электролите, который исключает использование в растворах токсичных соединений Cr^{6+} , и применения клеевого связующего ВСК-14-2мР в клеевом препреге с ровингом обеспечивается повышение адгезионных и прочностных свойств соединений слоев в алюмостеклопластиках.

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.

Разработаны технологические режимы изготовления слоистых материалов автоклавным методом и метод сращивания для производства заготовок и элементов конструкции из алюмостеклопластиков размерами, превышающих ширину листовых полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов.

Автором показана возможность конструирования слоистых материалов с варьируемыми физико-механическими свойствами, учитывая требования, предъявляемые к конструкциям современных летательных аппаратов.

В главе 5 «Исследование структуры и свойств алюмостеклопластиков» автором представлена логично построенная экспериментальная работа на стандартных образцах, приведены результаты исследования механических, физических и коррозионных характеристик, трещиностойкости, молниестойкости, огнестойкости и огнестойкости слоистых материалов, получены зависимости прочностных и усталостных свойств от структуры алюмостеклопластиков.

Приведены результаты испытаний механических характеристик при растяжении, сжатии и межслоевом сдвиге образцов из алюмостеклопластиков, оценена стойкость СИАЛ к ударным нагрузкам. Изучено изменение трещиностойкости (dN/dl) слоистых материалов от структуры и состава алюмостеклопластиков, исследован характер разрушения образцов СИАЛ. Установлена зависимость СРТУ в слоистых материалах. Дано научное объяснение существенного замедления скорости роста трещины усталости в алюмостеклопластиках по сравнению с СРТУ в монолитных алюминиевых листах.

Автором дан достаточно полный анализ поведения разработанных слоистых материалов при статических и повторно-статических испытаниях. Проведен большой объем металлографических исследований, включая фрактографический анализ листов из алюминий-литиевых сплавов и алюмостеклопластиков после испытаний. Показано, что характеристики трещиностойкости, уровень малоциклового усталости, прочностные свойства алюмостеклопластиков напрямую зависят от схемы укладки монослоев клеевого препрега в слое стеклопластика и их армирования.

Показано, что 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.

Автором приводятся достаточные данные результатов испытаний материалов СИАЛ на огнестойкость, огнестойкость и молниестойкость. По результатам испытаний по молниестойкости СИАЛ, показано, что алюмостеклопластики толщиной $1,0 \div 1,3$ мм имеют повышенную стойкость к удару молнии и слоистые материалы типа СИАЛ эквивалентны по молниестойкости металлическим панелям толщиной 2,5 мм. При ударе молнией зоны поражений в алюмостеклопластиках ограничиваются повреждением только наружного металлического слоя.

Установлено, что алюмостеклопластики обладают более высокой стойкостью при воздействии пламени с температурой 1100°C в течение $15 \div 30$ минут по сравнению с листами из монолитных алюминиевых сплавов и обеспечивают температуру на тыльной стороне СИАЛ $160 \div 220^\circ\text{C}$, что позволяет использовать данный материал в пожароопасных зонах конструкций: противопожарных перегородках, в зонах обшивок фюзеляжа, пола и багажно-грузового отсека.

Глава 6 «Исследование влияния технологических процессов при изготовлении и формообразовании конструктивных элементов на структуру и свойства алюмостеклопластиков» посвящена исследованию влияния технологических процессов при изготовлении деталей с применением операций резки, формообразования, клепки, механообработки на состояние слоев и свойства алюмостеклопластиков, разработаны технологические рекомендации на изготовление конструктивно-подобных образцов и оснастки по предварительно спроектированным электронным 3D-моделям. Изготовлены на ПАО «ВАСО» элементы конструкции с обшивкой из алюмостеклопластиков применительно к изделиям ПАО «Туполев» и АО «Камов».

В главе 7 «Опробование алюмостеклопластиков в деталях и конструктивно-подобных образцах» представлены преимущества при применении алюмостеклопластиков в деталях и конструктивно-подобных образцах взамен традиционных материалов

- панель отсека фюзеляжа самолета с использованием обшивки из слоистого материала СИАЛ-3-1Р, что обеспечило преимущество по снижению массы на 15 % и повышение долговечности панелей по сравнению с панелями с обшивкой из листов 1163АТВ;

- фрагмент гибридной панели крыла самолета Ту-204 с обшивкой из алюмостеклопластика с использованием в структуре алюминий-литиевого сплава 1441, что показало преимущества перед монолитными панелями из алюминиевого сплава В95очТ2: на 11,3 % по весовой эффективности конструкции, более чем в 10 раз - по сопротивлению росту трещины усталости, на 20 % - по несущей способности элементов конструкции при сжатии;

- прототип створки капота двигателя вертолета Ка-226Т из огнестойкого слоистого материала СИАЛ-2-1Р, что обеспечило снижение массы створки капота до 20 % и увеличение времени прогорания обшивки капота (более 15 мин) при воздействии пламени с температурой 1100 °С.

Проведено сравнение прочностных и весовых характеристик конструкций с обшивками из алюмостеклопластиков с использованием листов из алюминий-литиевых сплавов 1441, В-1469 и обшивок из монолитных листов алюминиевых сплавов. Показана эффективность применения слоистых алюмостеклопластиков в элементах конструкции планера самолета. Таким образом, автор показал, что основная цель, поставленная им, достигнута.

Потенциальными потребителями являются предприятия авиационной отрасли ПАО «Туполев», ПАО «Ил» АО «Вертолеты России», ПАО «ВАСО», ПАО «Корпорация Иркут», ПАО "Компания "Сухой" и др.

В завершении приведены основные выводы по работе, нормативные ссылки и представлен список цитированной литературы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 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 $8 \div 10$ % плотностью, повышенными на $9 \div 11$ % модулем упругости, на $12 \div 16$ % удельной прочностью и рабочей температурой до 120 °С по сравнению с алюмостеклопластиковыми на основе листов из дуралюминов.
- 2) Установлены особенности формирования структурно-фазового состояния в слитках и листах из алюминий-литиевого сплава 1441 в зависимости от режимов термической обработки, определены оптимальные технологические параметры, обеспечивающие получение методом холодной рулонной прокатки тонких листов толщиной 0,25 мм с требуемым для применения в СИАЛ уровнем механических и коррозионных свойств.
- 3) Показано, что при плотности распределения сферических композиционных частиц дисперсоидов (β' -фаза с оболочкой из δ' -фазы) не более $6,0 \cdot 10^{10}$ 1/мм³ при

минимальном (менее 1 %) содержании первичных эвтектических фаз в слитке, достигаемых после двухступенчатой гомогенизации в интервале температур $400 \div 530$ °С, обеспечивается максимальная пластичность и низкое сопротивление деформации слитков из сплава 1441 с массовыми соотношениями основных легирующих элементов: $\text{Cu/Li} \approx 1$ ($0,8 \div 1,1$); $\text{Mg/Li} \approx 0,5$ ($0,35 \div 0,6$).

- 4) Обнаружено различие состава дисперсоида в литой и деформированной структуре сплава 1441: в гомогенизированных слитках в состав β' -фазы входят Al и Zr, а в деформированных листах - Al, Zr и Ti, причем соотношение атомов Zr:Ti в частицах может составлять от 1:1 до 3:1.
- 5) Установлено, что обеднение твердого раствора сплава 1441 магнием (от 0,8 до 0,22 % (по массе)) и медью (от 1,5 до 0,01 % (по массе)) за счет выделения в процессе медленного охлаждения с температуры смягчающего отжига $420 \div 440$ °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 $100 \div 300$ 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 примерно $85 \div 90$ %.
- 8) Установлено, что огнестойкость слоистых алюмо-стеклопластиков 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 мин.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- 1) Разработаны и внедрены на самолетостроительном предприятии ПАО «ВАСО» технологии автоклавного формования алюмостеклопластиков СИАЛ нового поколения, а также гибридных конструкций с использованием СИАЛ на основе полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469.
- 2) Разработаны и внедрены на ОАО «КУМЗ» режим двухступенчатой гомогенизации слитков алюминий-литиевого сплава 1441, повышающий пластичность материала при

изготовлении методом рулонной прокатки листов толщиной 0,25 мм, и режим упрочняющей термической обработки (трехступенчатый режим старения) для применения тонких листов в структуре 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 $8 \div 14$ % адгезионных характеристик соединений листов и стеклопластиков.
- 4) Внедрено клеевое связующее с повышенными деформационными, теплопрочностными характеристиками и пониженной динамической вязкостью, которое обеспечивает равномерную пропитку стеклонеполнителя 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 $10 \div 15$ раз времени прогорания конструкции при пожаре, по сравнению с листами из алюминиевых сплавов, поскольку огнестойкость СИАЛ при 1100°C 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 $9 \div 15$ %, 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 В95счТ2, 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.

По результатам проведенных исследований автором получено девять патентов на изобретения.

Также следует отнести к практической ценности работы полный экспериментально определенный комплекс механических свойств исследуемых материалов (в объеме паспортизации, оценки коррозионной стойкости и промышленного опробования изготовления деталей и конструктивно-подобных образцов). Особенно хотелось бы отметить, что автор провел полный комплекс металлографических исследований, включая исследования тонкой структуры листов после различных типов обработки и фрактографический анализ образцов СИАЛ после испытаний.

Замечания по диссертационной работе сводятся к следующему:

- 1) Из содержания главы 3 неясно, по какому принципу были выбраны режимы старения листов из сплава 1441, представленные в таблице 3.9.
- 2) В работе недостаточно раскрыты процессы литья слитков и прокатки листов из сплава 1441, представлены изменения лишь некоторых технологических параметров при гомогенизации слитков и старении листов.
- 3) В работе не рассмотрена проблема анизотропии свойств листовых полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов, которым, как известно характерна анизотропия свойств, которая может влиять на формирование анизотропии в композиционном слоистом материале в зависимости от схемы укладки слоев.
- 4) В работе представлено описание процесса изготовления слоистых материалов в автоклаве, совмещенного с формообразованием, но не рассмотрена возможность совмещения процесса старения алюминий-литиевых листов с автоклавным формованием алюмостеклопластиков, с учетом того, что данные процессы проходят при близких температурах.

Сделанные замечания не затрагивают важнейших результатов и выводов по работе и не снижают её ценности и общей положительной оценки.

Заключение

Диссертация Антипова В.В. выполнена на высоком уровне и является законченным научным трудом в области создания новых слоистых материалов на основе алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков, актуальность которой обоснована возрастающими требованиями к современным материалам, применяемым в авиационных конструкциях.

Полученные результаты диссертационного исследования можно классифицировать как новые, они имеют существенное научное и практическое значение, обладают внутренним единством, обоснованы на современном научном уровне, описывают цельный этап исследований. Значительный объем испытаний и исследований с применением современных методик и использованием сертифицированного оборудования подтверждает достоверность основных научных результатов и выводов по работе. Особенно ценно, что результаты получены не только в лабораторных условиях, но и при натурных испытаниях.

Название и содержание диссертационной работы соответствуют требованиям формулы специальности 05.16.09 Материаловедение (машиностроение).

Диссертация характеризуется аккуратностью оформления текста, хорошим качеством представления результатов исследований в виде графиков, таблиц, рисунков с применением цветной печати, что создает благоприятное отношение к работе в целом. В автореферате полно отражены содержание, основные результаты и выводы диссертации.

Считаю, что автором диссертации Антиповым В.В. решена научная проблема по созданию нового класса слоистых материалов с высоким комплексом свойств.

Диссертация на тему «Научно-технологические основы разработки слоистых алюмостеклопластиков нового поколения с варьируемыми физико-механическими свойствами на основе листов из алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности» соответствует критериям **п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 г. № 842.** Работа имеет важное народно-хозяйственное значение для развития

авиационной отрасли, а ее автор Антипов Владислав Валерьевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.09 Материаловедение (машиностроение).

Официальный оппонент
ведущий научный сотрудник
лаборатории пучковых воздействий
ИЭФ УрО РАН, д.т.н.


Можаровский Сергей Михайлович

Подпись Можаровского Сергея Мих
заверяю, ученый секретарь институ
кандидат физ.-мат. наук


Е.Е. Кокорина

СВЕДЕНИЯ

ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертации Антипова Владислава Валерьевича «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)

Фамилия, имя, отчество	Можаровский Сергей Михайлович
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень (с указанием шифра специальности по которой защищена)	доктор технических наук, 01.04.2007
Основное место работы	
Должность	Ведущий научный сотрудник
Наименование подразделения	Лаборатория пучковых воздействий
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук
Почтовый индекс, адрес, веб сайт, телефон, адрес электронной почты организации	6200016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, http://www.iep.uran.ru/ +7 (343) 267-87-96 admin@iep.uran.ru