

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора, начальника управления научной деятельностью ФАУ «ЦАГИ» Ковалева Игоря Евгеньевича на диссертацию Печенюка Валерия Сергеевича «Методика проектирования элементов конструкции крыла пассажирского самолета из металлополимерных композиционных материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13.–«Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

### Актуальность темы исследования

Основными факторами, определяющими конкурентоспособность пассажирского самолета, являются весовое и аэродинамическое совершенство конструкции агрегатов планера, особенно конструкции крыла самолета. Реализация весового совершенства, то есть получение конструкции планера минимальной массы, развивалась по двум основным направлениям: создание алюминий-литиевых сплавов с улучшенными физико-механическими свойствами и широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) с высокими удельной прочностью и модульными характеристиками, что также позволило применить оптимальные проектные параметры крыла (удлинение, стреловидность и относительную толщину) для повышения летно-технических данных самолета.

В последние годы для дополнительного снижения массы и повышения ресурсных и эксплуатационных характеристик конструкции агрегатов планера в России и за рубежом ведутся работы по созданию и применению в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных композиционных материалов (МПКМ). Эти материалы являются гибридными слоистыми материалами, состоящими из чередующихся тонких листов из алюминиевых и титановых сплавов и межлистовых прослоек в виде препрега полимерного композиционного материала. МПКМ сочетают в себе положительные свойства металлических листов и полимерных композиционных материалов с пониженной плотностью, высокопрочными и высокомодульными волокнами армирования. В настоящее время эти материалы использует компания «Airbus» для обшивок и соединительных лент отсеков фюзеляжа самолета А-380.

В результате предварительного обзора литературных источников, проведенного в диссертации, выявлены преимущества МПКМ, которые подтверждают их важное практическое значение для развития авиационных

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«02» 05 2023

конструкций. В связи с этим требуется разработка усовершенствованной методики проектирования элементов конструкции планера самолета из металлополимерных композиционных материалов, что является **целью диссертации** и определяет ее **актуальность**. Актуальность работы подтверждается также тем, что она соответствует реализации комплексной проблемы «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» на период до 2030 года для повышения эксплуатационных характеристик и эффективности конструкций пассажирских самолетов.

### **Анализ диссертации по главам**

Во **введении** отражена актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна, методы исследования, теоретическая и практическая значимости работы.

В **первой главе** («Анализ проблемы, обзор литературы, цель и постановка задач исследования») приводятся история создания МПКМ, описание его структуры, свойств и характеристик. Выполнен анализ источников литературы, опубликованных в ведущих научных изданиях по данной теме. Сделан вывод, что по комплексу свойств наиболее перспективными среди МПКМ являются слоистые алюмокомпозиты СИАЛ, позволяющие обеспечить высокую весовую эффективность, повышенные характеристики трещиностойкости и безопасности при эксплуатации, в сочетании с более низкой стоимостью и повышенной технологичностью при изготовлении. Проводится детальный обзор научного задела по современному состоянию проблемы проектирования и применения конструкций из МПКМ. В итоге сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** («Исследование свойств и напряженно-деформированного состояния МПКМ») проведены исследования характеристик прочности и модуля упругости произвольных пакетов МПКМ по паспортным характеристикам стандартных пакетов МПКМ, отвечающие необходимым конструктивно-технологическим требованиям при применении их в изделиях авиационной техники. Выведены модифицированные формулы и получены оригинальные графики зависимостей для модулей упругости и характеристик прочности.

Рассмотренные исследования охватывают область, необходимую конструкторам при проектировании конструкций, выполненных с применением МПКМ, что является очень значимым фактом для современных образцов авиационной техники.

**В третьей главе** («Исследование свойств и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из МПКМ») рассмотрена методика силового анализа фрагмента сборной панели, выполненной из металла и МПКМ по модели составной конструкции (см. рисунок 3.1 в диссертации), где многослойный пакет МПКМ представляется пакетом из двух элементов: металла и ПКМ. Исследовано взаимодействие между стрингером из металла разных марок и обшивкой различных МПКМ. Получены формулы и приведены графические зависимости разрушающих погонных усилий панели для различных материалов стрингера и обшивки из МПКМ, использование которых позволяет определить предпочтительное сочетание элементов сборной панели при проектировочных расчетах конструкции.

В этой же главе определены предельные размеры стрингеров из МПКМ различного сечения по местной потере устойчивости, при этом коэффициенты закрепления элементов принимаются как для слоистых материалов.

**Четвертая глава** («Методика проектирования стрингерной панели крыла самолета из МПКМ») разработана усовершенствованная методика проектирования стрингерной панели, имеющей обшивку из многослойного пакета МПКМ, подкрепленную металлическими стрингерами и предположительно выполненными также из МПКМ. Сформулирована математическая постановка задачи, в качестве целевой функции определена минимальная масса конструкции при рациональных параметрах элементов и при ограничениях по прочности. Вначале представлена блок-схема алгоритма определения проектных параметров многослойной обшивки МПКМ, подробно описана процедура формирования матриц жесткости пакета. Затем также подробно рассмотрены составляющие блок-схемы методики проектирования панели в целом. Необходимо отметить, что при этом используются результаты, полученные в предыдущих разделах диссертации. Введены формулы для определения требуемой приведенной толщины панели под заданную нагрузку.

В качестве примера рассмотрен процесс проектирования гибридной стрингерной панели в двух конструктивно-проектировочных вариантах: обшивка из МПКМ, подкрепленная металлическими стрингерами и стрингерами также из МПКМ. Пример очень важен как с процедурной, так и с практической точки зрения. Также важно, что результаты аналитического расчета проанализированы при использовании конечно-элементной модели расчета.

Проведен сравнительный анализ весовой эффективности гибридной конструкции с обшивкой из слоистого материала с использованием листов и профилей из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469, панели из листов и

прессованных профилей из алюминиевого сплава В95очТ2 и конструкции с обшивкой из алюмопластика класса СИАЛ и прессованных профилей из алюминий-литиевых сплавов В-1469.

В пятой главе («Технологические аспекты и рекомендации по проектированию стрингерных панелей из МПКМ») приведены общие принципы изготовления и сборки конструкций из МПКМ, о которых следует иметь понимание при проектировании конструкций, выполненных с применением МПКМ. Приведены рекомендации по формированию произвольных пакетов МПКМ и выбору направления укладки слоев ПКМ в зависимости от действующей преимущественной нагрузки.

**Заключение** содержит выводы по результатам исследования, которые соответствуют цели и задачам диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Содержит 148 страниц, в том числе 4 приложения, 48 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 93 источника.

Положительной чертой рассматриваемой работы является применение современных методик исследования.

### **Научная новизна исследований**

Научная новизна исследования, представленного в диссертации Печенюка В.С., заключается в следующем:

1) Разработана методика рационального проектирования стрингерных панелей крыла пассажирского самолета из МПКМ, обеспечивающая наименьшую массу при ограничениях по прочности, жесткости и устойчивости.

2) Сформированы для проектировочных расчетов модифицированные формулы определения допускаемых напряжений и механических характеристик произвольных пакетов МПКМ.

**Достоверность результатов диссертации** подтверждается сравнением со стандартными паспортными данными конструктивно-подобных образцов, обсуждением результатов работы на всероссийских и международных научно-технических конференциях, наличием публикаций в научных изданиях ВАК.

Основные положения, структура, выводы и результаты, изложенные в автореферате, соответствуют материалам диссертационной работы.

### **Теоретическая значимость**

Полученные в диссертации результаты являются развитием методов проектирования конструкций из металла и полимерного композиционного материала. Они могут применяться для пассажирских самолетов.

### **Практическая значимость**

Полученные результаты могут применяться для определения параметров и характеристик различных элементов конструкции стрингерной панели крыла самолета, выполненных из МПКМ, что позволяет сократить сроки проектирования подобных структур.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты работы Печенюка В.С. могут быть рекомендованы для изучения и внедрения в научных и образовательных организациях, а также на предприятиях, специализирующихся на разработке и проектировании образцов авиационной техники (ОКБ).

### **Вопросы и замечания**

Наряду с положительной оценкой диссертационной работы, считаю необходимым указать замечания.

1. Из текста диссертации не ясно, для каких классов пассажирских самолетов возможно использование стрингерных панелей с элементами из МПКМ.
2. Считаю, что для целостности исследований их следовало бы дополнить изучением взаимного влияния стрингеров и обшивки из МПКМ на рациональные параметры панели и на величину действующей нагрузки.

Указанные вопросы и замечания не снижают значимости научно-практических результатов исследования.

### **Заключение**

Работа выполнена и оформлена на высоком научно-техническом уровне и не содержит недобросовестных заимствований. Представленные результаты являются оригинальными и обоснованными.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача разработки методики проектирования элементов конструкции крыла пассажирского самолета, выполненных из металлополимерных композиционных материалов.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК (2 публикации), всего по теме диссертации опубликовано 9 работ. Полученные результаты апробированы на научно-практических конференциях. Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Методика проектирования элементов конструкции крыла пассажирского самолета из металлополимерных композиционных материалов» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Печенюк Валерий Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. –«Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Официальный оппонент,  
Начальник управления научной  
деятельностью, проф., д.т.н.



Ковалев И.Е.

Подпись Ковалева Игоря Евгеньевича заверяю

Ученый секретарь Ученого совета ФАУ «ЦАГИ»,  
доцент, доктор технических наук



Таковицкий С.А.

Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Адрес: 140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

Тел./Факс: +7 (499) 556-40-03

E-mail: Kovalev@tsagi.ru

*С отзывом ознакомлен. Хелев 2.05.23*