

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского» -
начальник комплекса прочности ЛА
М.Ч.Зиченков



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Русланцева Андрея Николаевича
«Разработка моделей деформирования полимерных волокнистых слоев с
различной укладкой», представленной к защите на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика
деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Русланцева А.Н. посвящена вопросам повышения точности расчета сопротивления волокнистых полимерных композиционных материалов деформированию и разрушению с учетом структурных факторов, физической нелинейности, а также реологических свойств.

Методы расчета и испытаний деталей и конструкций из изотропных материалов, например, металлов, постоянно совершенствуются и достигли высокого уровня точности, но прямой перенос этих методов на композиционные материалы, которые сейчас широко применяются в авиастроении при изготовлении силовых конструкций, не дает требуемой точности и надежности, что приводит к закладыванию высоких коэффициентов запаса прочности и сводит на нет весовое совершенство изделий. Разработка математических моделей и результаты аналитических расчетов деформирования волокнистых композиционных материалов, позволяющие точнее учитывать анизотропию, реологические свойства и физическую нелинейность являются актуальной задачей.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы из 179 наименований. Основной текст изложен на 176 страницах, включает 90 рисунков и 17 таблиц. По теме диссертации опубликовано 20 научных статей, из них 3 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

В первой главе проведен обзор литературы по теме диссертации, рассматриваются математические модели, методы и способы расчета деформирования волокнистых композиционных материалов. Приведены их описания, сравнительный анализ, сильные и слабые стороны, области применения и возможность использования для практических инженерных расчетов. Рассматриваются требования к критериям разрушения, так как механизм

разрушения композитных материалов кардинально отличается от механизма разрушения металлов. Сравниваются различные критерии разрушения композиционных материалов, учитывающие разрыв волокон, растрескивание матрицы, расслоение, рассматривается вопрос применимости их на практике. Отдельно рассматриваются вопросы ползучести и релаксации композиционных материалов при нагрузке, переменной во времени и не совпадающей с направлением армирования. Показано, что одним из наиболее общих методов описания деформирования материалов является наследственная теория.

Во второй главе изложена методика и результаты проведения испытаний различных композиционных материалов для определения модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела прочности и предельной деформации при растяжении. Варьировались углы армирования, порядок и последовательность нагружения образцов, испытывавшихся как при квазистатическом нагружении вплоть до разрушения, так и при нагружении, позволившем определять временные характеристики. По результатам испытаний построены нелинейные диаграммы деформирования углеродных композиционных материалов КМУ-4Л, БМИ-3/3692. Выявлено, что при возникновении сдвиговых напряжений в плоскости слоя диаграммы деформирования принимают существенно нелинейный вид, который может быть связан как с нелинейностью, возникающей при сдвиге, так и с временными эффектами.

В третьей главе разработана математическая модель деформирования композиционных материалов, позволяющая делать это как для одного слоя, так и для пакета, учитывающая наличие начального линейного участка и нелинейной части диаграммы деформирования. Получены математически строгие выражения для матриц жесткости и податливости, позволяющие проводить расчет деформирования композиционных материалов с неограниченным количеством слоев, произвольной укладкой и любым путем нагружения композиционных материалов различного состава. Для проверки предложенной модели был выполнен расчет деформирования углепластиков КМУ-4Л, БМИ-3/3692, стеклопластика, углерод-углеродного композиционного материала, углепластика с термопластичным связующим. Во всех случаях соответствие расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное. С использованием предложенной методики выполнен расчет деформирования лонжерона многоразового космического аппарата туристического класса. Показано, что для корректного расчета элемента конструкции необходим учет нелинейного деформирования.

В четвертой главе рассматриваются вопросы деформирования композиционных материалов при переменных во времени нагрузках. Проведен обзор и анализ литературы по вопросам ползучести и наследственной механики. Разработана математическая модель деформирования полимерных композиционных материалов при переменных во времени нагрузках. Определены параметры модели для углепластиков КМУ-4Л и БМИ-3/3692. По представленным экспериментальным данным определены параметры ядер

ползучести и релаксации для углепластика на основе термопластичного связующего, построены кривые ползучести при различном направлении армирования материала. В сравнении с линейной моделью средняя квадратичная и средняя относительная ошибки снижены более чем в два раза. На основе разработанной модели проведен расчет деформирования зеркала космического аппарата «Спектр-М». Показано, что при выбранной конструкции и технологии изготовления, кривизна зеркала будет меняться с течением времени при хранении, что приведет к потере функциональной способности аппарата.

В пятой главе рассматривается деформирование криволинейной слоистой балки. Стандартные испытания не могут полностью показать работу многослойной детали из композитного материала. В стандарте ASTM D6415, описывающем испытания деталей, приближенным к типовым элементам конструкций, определены виды разрушений композитных балок, рассмотрены модели расчета криволинейных балок, но они не учитывают анизотропию композитных материалов. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния криволинейной композитной балки на изгиб при цилиндрической анизотропии свойств и переменном по толщине модуле упругости. Приведены рекомендации для уменьшения действующих напряжений. По предложенной методике произведено определение усилий для корректировки главного зеркала космического аппарата «Спектр-М», и расчет лонжерона крыла самолета МС-21.

Разработанные методика расчета, описывающая нелинейность диаграмм деформирования композиционных материалов и методика расчета и прогнозирования их ползучести и релаксации, а также полученные с их помощью результаты обладают научной новизной. Они позволяют повысить точность расчета деформирования и разрушения полимерных слоев с различной укладкой, разделить влияние структурных факторов и реологических характеристик слоя.

Практическая ценность полученных результатов определяется возможностью их использования для более детального исследования процессов деформирования и разрушения композиционных материалов, что показано на примерах расчета главного зеркала космического аппарата «Спектр-М» и расчета лонжерона крыла самолета МС-21.

Верификация методик на результатах проведенных экспериментов, публикации в периодических изданиях, в том числе рекомендованных ВАК, а также обсуждение полученных в работе результатов на всероссийских и международных конференциях и семинарах подтверждают достоверность и обоснованность результатов.

К работе имеются определенные замечания:

1. Глава 1, в частности параграф 1.1, в котором дается описание применения КМ в авиации и космической технике, написаны слишком обобщенно. Автору следовало бы более четко сформулировать те проблемы использования КМ на решение которых направлено исследование, описываемое в диссертационной работе.

2. Для расчетов МКЭ, результаты которых описаны в параграфе 5.5, не представлены внешний вид КЭ-сетки и не проиллюстрировано моделирование граничных условий, что не позволяет сделать заключение о качестве моделирования.

3. Содержатся синтаксические и стилистические ошибки: страница 15, строка 15; страница 42, строки 23 и 24; страница 88, строка 11; страница 121, строка 6.

Тем не менее, указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.


В целом диссертация Русланцева А.Н. «Разработка моделей деформирования полимерных волокнистых слоев с различной укладкой» представляет собой законченное научное исследование и является успешно выполненной квалификационной работой, которая по ее актуальности, научному уровню и практической значимости соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Русланцев А.Н., заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. Автореферат диссертации достаточно полно отражает основное ее содержание.

Отзыв обсужден и одобрен на НТС НИО-3 комплекса прочности ЛА, протокол № 7 от «24» сентября 2018 года.

Заместитель начальника НИО-3,
канд. техн. наук

 В.И. Голован

Начальник лаборатории №8 НИО-3,
канд. техн. наук

 А.Н. Шаныгин