

Влияние некоторых конструктивно-технологических аспектов проектирования изделий из слоистого композита на их несущую способность

© Е.С. Терехова

ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», Новосибирск, 630051, Российская Федерация

Задача проектирования тонкостенной панели из слоистого полимерного композиционного материала минимального веса при условии обеспечения прочности и устойчивости отличается повышенной сложностью вследствие сильной зависимости устойчивости от изгибной жесткости, которая определяется не только процентным соотношением слоев в укладке, но и их расположением по толщине. Для решения этой задачи был разработан алгоритм выбора рациональных параметров (АВРП) тонкостенных несущих панелей из слоистого композита при условии минимума веса, прочности и устойчивости. С целью повышения его эффективности были получены аналитические решения задач определения критической нагрузки в случае потери устойчивости при комбинированном нагружении как неподкрепленной, так и дискретно подкрепленной стрингерами композитной панели. Представлена верификация аналитических решений с использованием метода конечных элементов. Проведена валидация расчетных моделей образцов стрингерных панелей, разработанных с помощью АВРП, и исследовано влияние технологических факторов на их несущую способность. Для валидации АВРП разработаны образцы. Приведены результаты испытаний образцов стрингерных панелей на устойчивость. Отмечено хорошее совпадение критических нагрузок, реализованных в экспериментах и с помощью конечно-элементного анализа. Рассмотрено влияние технологических факторов на несущую способность изготовленных автоклавным и вакуумным формованием образцов композитных панелей с разным количеством слоев. Отмечено отличие средних ожидаемых паспортных толщин образцов от толщин изготовленных.

Ключевые слова: слоистые композиты, устойчивость композитных панелей, стрингерная панель, рациональное проектирование, усадка

Введение. В самолетостроении проблема снижения веса элементов конструкции исключительно актуальна. Один из путей ее решения — использование слоистых композиционных материалов, обладающих высокими прочностными характеристиками. Однако при проектировании тонкостенных несущих панелей несущая способность определяется в большей степени устойчивостью, чем прочностью, поэтому ее обеспечение приводит к большим запасам по прочности.

Задача получения тонкостенной композитной панели с минимальным весом при обеспечении требуемых прочности и устойчивости осложняется тем, что устойчивость зависит не только от процентного соотношения слоев в укладке, но и от их положения по толщине.

Изменение положения одного слоя в укладке не повлияет на прочность, но может изменить критическую силу в несколько раз.

Проблемы оптимизации композитных панелей с учетом ограничения на устойчивость рассмотрены в работах О.В. Митрофанова [1], А.А. Дудченко [2], К.А. Балунова [3].

Выбор рациональной укладки при ограничениях по прочности и устойчивости был рассмотрен в [4], выбор оптимальной укладки представлен наиболее подробно в работе [5], в которой для записи ограничения по устойчивости используется аппроксимация критической поверхности, но это не всегда дает верный результат. Задача оптимизации решается организованным перебором на сетке с уточнением решения методом сопряженных направлений [5].

В работе В.А. Киреева, И.А. Комарова [6] исследуется задача выбора оптимальной укладки слоев в подкрепленной панели, которая приводится к гладкой, имеющей эквивалентную жесткость, послойным наращиванием материала.

Все эти алгоритмы имеют свои особенности: одни алгоритмы дают только процентное содержание слоев и необходимую толщину, в то время как изменение положения слоя в укладке может привести к изменению изгибных жесткостных характеристик в несколько раз, что решающим образом влияет на несущую способность по устойчивости. В аналитических решениях для подкрепленных панелей зачастую используется эффективная жесткость, что некорректно отражает работу стрингеров, так как не учитывает их работу при изгибе из плоскости при совместном деформировании с панелью. В задачах рационального проектирования это обстоятельство фактически исключает возможность корректного определения оптимальной высоты стрингерного набора.

В данной статье представлен алгоритм выбора рациональных параметров (АВРП) неподкрепленной и стрингерной композитных панелей минимального веса, нагруженных продольным, поперечным и сдвиговым потоками при ограничениях по прочности и устойчивости [7, 8]. Для ускорения работы алгоритма получены аналитические решения задач устойчивости неподкрепленной и стрингерной композитных панелей при граничных условиях опирания и защемления, которые позволяют учесть дискретность расположения стрингеров для подкрепленных панелей и изгибно-крутильную потерю устойчивости стрингера совместно с упругим основанием (такая потеря устойчивости реализуется при избыточном увеличении высоты стрингерного набора). В отличие от алгоритмов, предлагающих только определение необходимого процентного соотношения слоев, созданные алгоритмы дают возможность получить полную последовательность слоев в пакете.

В разработанном АВРП сначала формируется базис возможных направлений слоев в укладке. На первом шаге принимается пакет из произвольного количества слоев с произвольной укладкой. В двойном цикле по слоям и направлениям базиса каждый слой заменяется направлением из базиса с вычислением толщины с помощью критерия прочности. Затем укладка и толщина панели, полученные на первом шаге, задаются в качестве начальных для определения фактора потери устойчивости λ . Если $\lambda < 1$, то комбинация действующих нагрузок превышает критический уровень, толщина панели увеличивается до нового значения, соответствующего равенству $\lambda = 1$. В двойном цикле по направлениям базиса и по слоям укладки каждый слой последовательно обменивается своим направлением со всеми остальными слоями с одновременным определением толщины и проверкой по прочности. Из всех опробованных сочетаний направлений выбирается сочетание, соответствующее наименьшей толщине и удовлетворяющее ограничению по прочности. Циклический процесс продолжается до установления подходящего значения толщины. Далее корректируется количество слоев укладки с учетом реальной толщины монослоя и полученной общей толщины. При округлении общая толщина неизбежно незначительно увеличивается, что приводит к небольшому превышению ограничений по прочности и устойчивости. Появляется возможность зафиксировать количество слоев, а затем в цикле по направлениям базиса и по слоям укладки выбрать набор слоев, обеспечивающий наименьшую интенсивность деформации (наибольшую жесткость) при соблюдении ограничения на устойчивость.

При необходимости выполняется корректировка укладки на сбалансированность, что позволяет избавиться от коробления, т. е. в цикле по слоям с направлением $\pm 45^\circ$ последние из них подбираются так, чтобы в половине симметричного пакета (от края до плоскости симметрии) было четное количество слоев с этим направлением одного знака [7].

Более подробно шаги АВРП и аналитические выражения для определения прочности и устойчивости панелей описаны в [7], где также проведено сравнение собственных форм и факторов потери устойчивости с результатами конечно-элементного анализа. На примерах продемонстрированы результаты работы алгоритма и выполнено сравнение с данными из российских и зарубежных источников, а также установлено хорошее соответствие по совпадающим позициям. Получен сертификат о государственной регистрации программы для ЭВМ [8].

Для валидации расчетов были изготовлены образцы стрингерных панелей из полимерного композиционного материала, имеющего такую существенную особенность технологических и эксплуатационных характеристик, как усадка в процессе отверждения [9]. Авторы [10]

отмечают, что в процессе полимеризации связующего в подавляющем большинстве случаев происходит объемная усадка, которая наряду с различиями коэффициентов термического расширения полимерной матрицы и армирующего материала приводит к формированию остаточных напряжений в структуре материала. Эти напряжения могут вызывать коробление изделия, снижение прочности в результате образования пустот, растрескивания матрицы, ухудшение адгезии волокна к матрице и т. д. По данным [11, 12], усадка готового изделия может составлять 1,5...10 %. Коробление — крайне нежелательный браковочный признак, поэтому требуется исследовать причины его возникновения, проводить поиск вариантов устранения, а также прогнозировать его появление на этапах конструирования изделия и технологической подготовки его производства [13]. Методом конечных элементов (МКЭ) в [14] решены совместно тепловая, деформационная и химическая задачи для моделирования процесса отверждения. Установлено, что при повышении температуры до начала химической усадки происходит увеличение объема образца, что обусловлено тепловым расширением термореактивной матрицы. Далее при отсутствии теплового расширения (изотермические условия) наблюдается усадка образца, и его дальнейшее отверждение приводит преимущественно к возникновению внутренних структурных напряжений.

Авторы [15] полагают, что один из основных геометрических параметров детали — ее толщина, поэтому толщина композита варьируется в значительных пределах и определяется множеством факторов, таких как назначение изделия, давление формования, схема армирования, технология изготовления и т. д. Отмечено, что при переходе от контактного формования к безавтоклавным методам получения композитных деталей (вакуумная инфузия, вакуумное формование) происходит наиболее резкое уменьшение толщины. Показано, что для деталей, полученных вакуумной инфузией, с увеличением количества слоев до определенного значения толщина существенно (на ~8...18 %) уменьшается, а его дальнейшее возрастание не приводит к существенному изменению толщины детали.

В данной работе представлены результаты испытаний образцов стрингерных панелей на устойчивость. Выполнен конечно-элементный анализ влияния коробления на устойчивость, а также фактической и средней паспортной толщины образцов.

Для исследования влияния технологии на толщину композитных панелей были изготовлены формованием две партии образцов: «УА» — автоклавным, «У» — вакуумным. Образцы, содержащие 10, 20, 40 или 80 слоев, состояли только из однонаправленных слоев либо из слоев, чередующих направления 0 и 90°.

Цель работы — валидация расчетных моделей образцов стрингерных панелей, разработанных с помощью АВРП, и исследование влияния технологических факторов на их несущую способность.

Исследование толщины композитных панелей в зависимости от конструктивно-технологических факторов. Для того чтобы исследовать влияние технологии изготовления, количества слоев и других факторов на толщину композитных панелей, изготовлены образцы размерами 100×100 мм, различающиеся технологией изготовления, маркировкой, количеством слоев n и схемой укладки (табл. 1).

Таблица 1

Параметры исследуемых образцов

Маркировка	n , шт.	Укладка	Маркировка	n , шт.	Укладка
УА1	10	[(0/90) ₅]	У1	10	[(0/90) ₅]
УА2	20	[(0/90) ₁₀]	У2	20	[(0/90) ₁₀]
УА3	40	[(0/90) ₂₀]	У3	40	[(0/90) ₂₀]
УА4	80	[(0/90) ₄₀]	У4	80	[(0/90) ₄₀]
УА5	10	[0 ₁₀]	У5	10	[0 ₁₀]
УА6	20	[0 ₂₀]	У6	20	[0 ₂₀]
УА7	40	[0 ₄₀]	У7	40	[0 ₄₀]
УА8	80	[0 ₈₀]	У8	80	[0 ₈₀]

Значения теоретической толщины образца после отверждения, вычисленной по средней паспортной толщине монослоя, фактической толщины до отверждения после опрессовки и фактической толщины после отверждения представлены на рис. 1. Измерения проведены с помощью цифрового микрометра Micron 32510-06 (свидетельство о поверке № С-НН/17-07-2024/355120348 действительно до 16.07.2025) с допускаемой абсолютной погрешностью ± 3 мкм.

Для сравнения на рис. 2 представлены толщины образцов типа «У» и «УА» после отверждения. Величина усадки определена как разница между толщинами образцов до отверждения после опрессовки и после отверждения. Усадка для образцов типа «АУ» составляет 4...10 %. Для образцов типа «У» получены значения $-6...-2$ %. Знак « \rightarrow » означает, что после отверждения толщина образца увеличилась. Толщины образцов типа «У» на 5...14 % больше, чем у образцов типа «АУ».

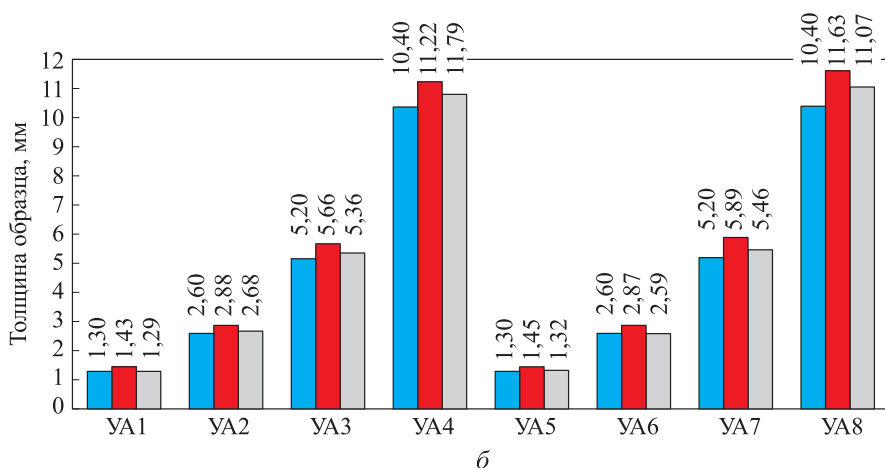
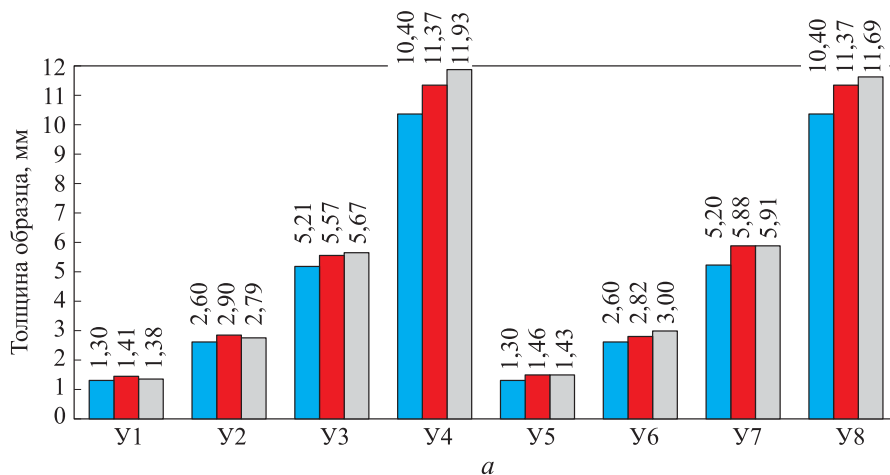


Рис. 1. Толщины образцов типа «У» (а) и «УА» (б):

■ — теоретическая после отверждения; ■ — до отверждения после опрессовки; ■ — после отверждения

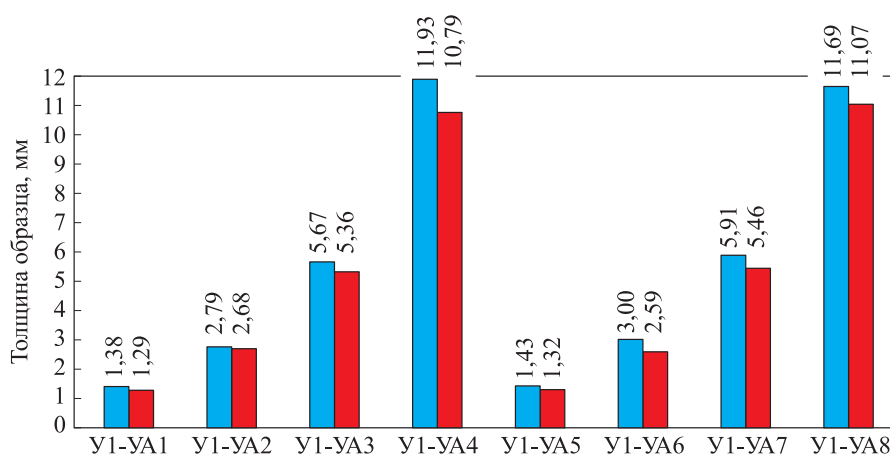


Рис. 2. Толщины образцов типа «У» и «УА» после отверждения при вакуумном (■) и автоклавном (■) формовании

Результаты испытаний. Для валидации алгоритма были изготовлены из препрега АСМ102-130UD образцы стрингерных панелей с укладкой трех типов: укладки первого типа получены в результате работы АВРП (обозначение О4); укладки второго типа имеют следующее процентное соотношение слоев: 50 % слоев с направлением 0, 40 % слоев с направлением $\pm 45^\circ$ и 10 % слоев с направлением 90° (обозначение О5), такое соотношение обычно рекомендуется для крыльевых силовых панелей; укладки третьего типа получены в результате работы АВРП и скорректированы с учетом ограничения на сбалансированность (обозначение О6). Механические характеристики материала АСМ102-130UD приведены ниже:

Модуль упругости монослоя в направлении, ГПа:	
нулевого слоя E_1	126,3
в поперечном E_2	10,4
Модуль сдвига монослоя E_{12} , ГПа	4,9
Коэффициент Пуассона μ	0,34
Толщина монослоя t_c , мм	$0,13 \pm 0,02$
Плотность γ , кг/м ³	$1,55 \cdot 10^3$

Схема образца стрингерной панели представлена на рис. 3, укладки образцов приведены в табл. 2. Изготовленные образцы показаны на рис. 4.

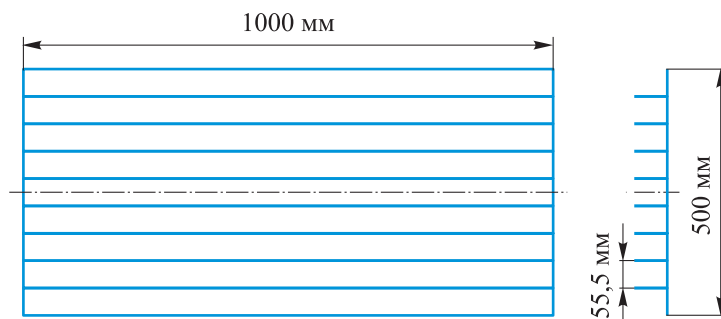


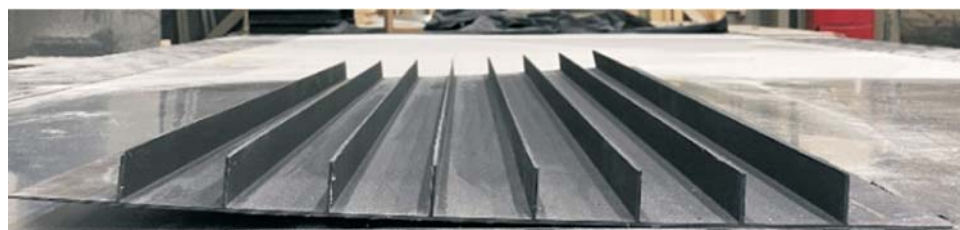
Рис. 3. Схема образца стрингерной панели

Таблица 2

Параметры образцов стрингерной панели

Тип	h , мм	$h_{стр}$, мм	Укладка
О4*	2,340	22	$[45/(0)_8]_s$
О5	2,340	27	$[45/90/-45/0/0/0/45/0/0]_s$
О6**	2,340	22	$[\pm 45/(0)_7]_s$

Примечание: * — оптимизированная укладка; ** — оптимизированная и сбалансированная укладка.



а



б



в

Рис. 4. Образцы стрингерных панелей:

а — образец О4; б — образец О5; в — образец О6

На рис. 4 видно, что образцы с несбалансированной укладкой (О4 и О5) искривились. Толщина готового образца составила $\approx 2,1$ мм, что на $\approx 10\%$ меньше теоретически рассчитанной толщины (произведение средней паспортной толщины и количества монослоев).

Для анализа напряженно-деформированного состояния образцов были разработаны их конечно-элементные модели (КЭМ) и оснастка для испытаний (рис. 5).

Критические силы стрингерных образцов с фактической толщиной, полученные при моделировании образца в стенде $P_{кр}^{стенд}$, разрушающая нагрузка при испытаниях $P_{разр}$ и различие между этими силами $\delta_{ст}$ даны в табл. 3, в которой также приведены критические силы образцов в стенде с теоретической толщиной $P_{кр}^п$, полученные с помощью конечно-элементного анализа, и значение $\delta_п$, показывающее различие $P_{кр}^п$ и $P_{разр}$. Знак « \rightarrow » в табл. 3 означает, что нагрузка в эксперименте меньше, чем в КЭМ.

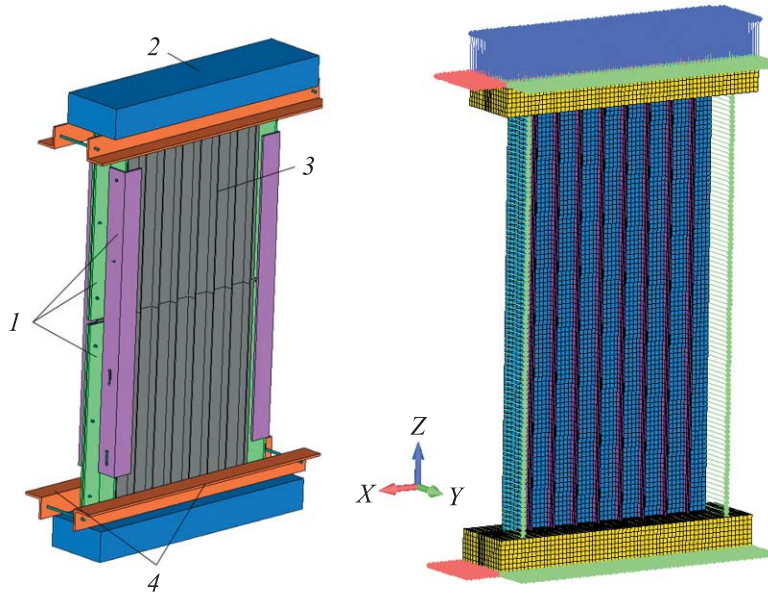


Рис. 5. Конечно-элементная модель и схема оснастки для испытаний образцов стрингерных панелей:
 1 — продольные уголки; 2 — опорная плита; 3 — образец

Таблица 3

Критические силы стрингерных образцов

Тип	$P_{\text{разр}}, \text{ кгс}$	$P_{\text{кр}}^{\text{станд}}, \text{ кгс}$	$\delta_{\text{ст}}, \%$	$P_{\text{кр}}^{\text{п}}, \text{ кгс}$	$\delta_{\text{п}}, \%$
O4(1)	154,55	226,98	-42,60	265,01	-71,47
O4(2)	205,94	226,98	-10,20	265,01	-28,68
O5(1)	277,53	285,68	-2,90	388,04	-39,82
O5(2)	281,45	285,68	-1,50	388,04	-37,87
O6(1)	250,07	228,13	-9,60	254,18	-1,64
O6(2)	212,80	228,13	-6,70	254,18	-19,45

При использовании в КЭМ фактической толщины получено хорошее соответствие расчета с экспериментом. Исключением является только образец O4(1), имеющий ярко выраженную начальную кривизну, учет которой приводит к снижению расчетной критической нагрузки для этого образца до 203,75 кН (на 10 %) от критической нагрузки прямолинейного образца. Уменьшение фактической толщины монослоя относительно средней паспортной толщины приводит к снижению критической нагрузки на 2...40 %.

Заключение. Представлены образцы стрингерных панелей, разработанные с помощью АВРП. Проведены испытания образцов на устойчивость. Получено хорошее соответствие критических нагрузок,

определенных в эксперименте и с помощью КЭ-анализа. Исследовано влияние технологических факторов на толщину готового изделия. Установлено значительное влияние на несущую способность, особенно на устойчивость, отклонений толщины, связанных с допусками при поставке препрегов и усадкой при формовании панелей. Получено, что итоговая толщина детали при вакуумном формовании в процессе отверждения увеличивается, а при автоклавном — уменьшается, что соответственно влияет на устойчивость. Показано, что компоновка слоев оказывает несущественное влияние в укладке на толщину при формовании.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Митрофанов О.В. Прикладное проектирование панелей крыла минимального веса из композитных материалов с учетом закритического поведения обшивки. *Вестник Московского авиационного института*, 2002, т. 9, № 1, с. 34–41.
- [2] Дудченко А.А., Канчая Рохас Рауль Анхель. Рациональное проектирование конструкции отсека фюзеляжа из композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*, 2011, № 2, с. 21–34.
- [3] Балунов К.А., Ишмуратов Ф.З., Туктаров С.А., Уськов В.М., Чедрик В.В. Многодисциплинарные аспекты в исследованиях синтеза и оптимизации конструктивно-силовых схем летательных аппаратов. *Сборник статей научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов»*, Жуковский, 8–9 декабря 2016 года. Москва, Изд-во ЦАГИ, 2017, с. 29–36.
- [4] Грищенко С.В. Феноменологическая методика подбора рациональных параметров укладки слоев при проектировании панелей авиационных конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*, 2019, № 4, с. 45–49.
- [5] Хазиев А.Р. *Оптимальное проектирование композитных элементов конструкций по условиям прочности, жесткости и устойчивости*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009, 143 с.
- [6] Киреев В.А., Казаков И.А. Выбор рациональных параметров композитных панелей крыла. *Ученые записки ЦАГИ*, 2023, № 3, Том LIV, с. 89–100.
- [7] Бадрухин Ю.И., Терехова Е.С. Рациональное проектирование тонкостенных несущих панелей из слоистого композита при комбинированном нагружении. *Вестник Московского авиационного института*, 2023, т. 30, № 4, с. 130–139.
- [8] Бадрухин Ю.И., Терехова Е.С. *Программное обеспечение по выбору оптимальной укладки монослоев в слоистых композитных панелях по условиям прочности и устойчивости*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680522. Заявка № 2023669792. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 02.10.2023.
- [9] Василевич Ю.В., Горелый К.А. *Механика препрегов — расчет изделий из армированных композиционных материалов*. В 2 ч., ч. 1. Минск, БНТУ, 2016, 295 с.
- [10] Обверткин И.В. Исследование объемной химической усадки модифицированных эпоксидных смол. *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*, 2022, т. 12, № 4, с. 113–117.

- [11] Варушкин Е.М. Исследование температурных остаточных напряжений и деформаций в толстостенных намоточных изделиях из армированных пластиков. *Механика полимеров*, 1971, № 6, с. 1040–1046.
- [12] Василевич Ю.В., Горелый К.А., Сахоненко С.В., Иванов С.Н. Влияние химической усадки связующего в процессе отверждения на образование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композита. *Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник, вып. 31*. Минск, БНТУ, 2016, с. 67–72.
- [13] Корольков В.И., Некравцев Е.Н., Сафонов К.С., Огурцов П.С., Оганесов В.А., Попов И.С., Самохвалов В.В. Исследование процессов устранения коробления авиационных изделий из полимерных композиционных материалов, полученных методом высокотемпературного формования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10 (739), с. 84–94.
DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-84-94
- [14] Хасков М.А., Сафронов Е.В. Моделирование процессов отверждения терморезистивных матриц на примере сложнопрофильного образца. *Труды ВИАМ*, 2019, № 12 (84), с. 46–54. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-46-54
- [15] Соколов В.В., Антипов П.Ю., Голищев О.А., Долинский С.В. Влияние количества слоев армирующего материала на толщину и весовые характеристики углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии. *Пластические массы*, 2021, № 1–2, с. 62–64.
DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-62-64

Статья поступила в редакцию 26.08.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Терехова Е.С. Влияние некоторых конструктивно-технологических аспектов проектирования изделий из слоистого композита на их несущую способность. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 10. EDN GJSRIC

Терехова Елена Сергеевна — старший научный сотрудник, ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина». Область деятельности: проектирование элементов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. e-mail: terekhovae@sibnia.ru

Certain design and technological features in rational design of the thin-walled load-bearing panels made of laminated composite influencing their load capacity

© E.S. Terekhova

Chaplygin Siberian Scientific Research Institute of Aviation (SibNIA),
Novosibirsk, 630051, Russian Federation

The problem of designing a thin-walled panel made of layered polymer composite material with minimum weight and ensuring its strength and stability is characterized by increased complexity, since stability strongly depends on the bending rigidity determined not only by the layers percentage in laying, but also by their position in thickness. Considering this circumstance, an algorithm for selecting the rational parameters (ASRP) was developed for the thin-walled load-bearing panels made of the layered composite according to the minimum weight, strength and stability requirements. To improve the algorithm efficiency, analytical solutions were obtained for the problems determining critical load in loss of stability of both unreinforced and discretely reinforced with stringers the composite panels under combined loading. Analytical solutions were verified using the finite element method. This article objective is to validate computation models of stringer panel samples developed using the ASRP and to study the technological factors influence on their load-bearing capacity. Samples of the stringer panels were developed for the ASRP validation. The samples were tested for stability. Satisfactory agreement was obtained between the critical loads realized in the experiments and using the finite element analysis. To study the influence of technological factors on the bearing capacity, samples of the composite panels with different numbers of layers were manufactured using the autoclave and vacuum molding. Difference was identified between the average expected passport sample thicknesses and the thicknesses of the manufactured samples.

Keywords: layered composites, composite panels stability, stringer panel, rational design, shrinkage

REFERENCES

- [1] Mitrofanov O.V. Prikladnoe proektirovanie panelei kryla minimalnogo vesa iz kompozitnykh materialov s uchetom zakriticheskogo povedeniya obshivki [Composite material wing panel of minimal mass design considering supercritical skin response]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2002, vol. 9, no. 1, pp. 34–41.
- [2] Dudchenko A.A., Kanchaya Rojas Raul Anjel. Ratsionalnoe proektirovanie konstruksii otseka fyuzelyazha iz kompozitsionnykh materialov [Rational design of the fuselage section structure made of composite materials]. *Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov — Composite Materials Constructions*, 2011, no. 2, pp. 21–34.
- [3] Balunov K.A., Ishmuratov F.Z., Tuktarov S.A., Uskov V.M., Chedrik V.V. Mnogodisciplinarnye aspekty v issledovaniyakh sinteza i optimizatsii konstruktivno-silovykh skhem letatelnykh apparatov [Multidisciplinary aspects in research of synthesis and optimization of the structural-force schemes of an aircraft]. In: *Sbornik statey nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Prochnost konstruksiy letatelnykh apparatov”, Zhukovsky, 8–9 dekabrya 2016 goda* [Collection of articles from the scientific and technical conference “Strength of the aircraft structures”, Zhukovsky, December 8–9, 2016]. Moscow, TsAGI Publ., 2017, pp. 29–36.

- [4] Grishchenko S.V. Fenomenologicheskaya metodika podbora ratsionalnykh parametrov ukladki sloev pri proektirovanii paneley aviatsionnykh konstruksiy iz sloistykh polimernykh kompozitsionnykh materialov [The phenomenological method of selection of rational parameters of layers laying for the design of laying panels of aircraft constructions made of laminated polymeric composite materials]. *Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov — Composite Materials Constructions*, 2019, no. 4, pp. 45–49.
- [5] Khaziev A.R. *Optimalnoe proektirovanie kompozitnykh elementov konstruksiy po usloviyam prochnosti, zhestkosti i ustojchivosti. Dis. ...kand. tekhn. nauk* [Optimal design of composite structural elements based on strength, rigidity and stability conditions. Diss. ... Cand. Sc. (Eng.)]. Moscow, 2009, 143 p.
- [6] Kireev V.A., Kazakov I.A. Vybor ratsionalnykh parametrov kompozitnykh paneley kryla [Selection of rational parameters of the composite wing panels]. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 2023, no. 3, vol. LIV, pp. 89–100.
- [7] Badrukhin Yu.I., Terekhova E.S. Ratsionalnoe proektirovanie tonkostennykh nesushchikh paneley iz sloistogo kompozita pri kombinirovannom nagruzhenii [Rational design of thin-walled load-bearing panels made of laminated composite under the combined loading]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — MAI Aerospace Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 130–139.
- [8] Badrukhin Yu.I., Terekhova E.S. *Programmnoe obespechenie po vyboru optimalnoy ukladki monosloev v sloistykh kompozitnykh panelyakh po usloviyam prochnosti i ustojchivosti* [Software for selecting the optimal laying of monolayers in layered composite panels based on the strength and stability conditions]. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2023680522. Zayavka no. 2023669792. Data gosudarstvennoy registratsii v Reestre programm dlya EVM 02.10.2023 [Certificate of state registration of computer program no. 2023680522. Application no. 2023669792. Date of state registration in the Register of computer programs October 2, 2023].
- [9] Vasilevich Yu.V., Gorelyi K.A. *Mekhanika prepregov — raschet izdeliy iz armirovannykh kompozitsionnykh materialov* [Prepreg mechanics – computation of products from reinforced composite materials]. In 2 parts, part 1. Minsk, BNTU Publ., 2016, 295 p.
- [10] Obvertkin I.V. Issledovanie obyemnoy khimicheskoy usadki modifitsirovannykh epoksidnykh smol [Study of volumetric chemical shrinkage of modified epoxy resins]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta — Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 113–117.
- [11] Varushkin E.M. Issledovanie temperaturnykh ostatochnykh napryazheniy i deformatsii v tolstostennykh namotochnykh izdeliyakh iz armirovannykh plastikov [Study of thermal residual stresses and deformations in thick-walled wound products made of reinforced plastics]. *Mekhanika polimerov — Polymer Mechanics*, 1971, no. 6, pp. 1040–1046.
- [12] Vasilevich Yu.V., Gorelyi K.A., Sakhonenko S.V., Ivanov S.N. Vliyanie khimicheskoy usadki svyazuyushchego v protsesse otverzhdeniya na obrazovanie ostatochnykh napryazheniy v tsilindricheskikh obolochkakh iz kompozita [The influence of chemical shrinkage of the binder during curing on the formation of residual stresses in the cylindrical composite shells]. In: *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik, vyp. 31* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection, iss. 31]. Minsk, BNTU Publ., 2016, pp. 67–72.
- [13] Korolkov V.I., Nekravtsev E.N., Safonov K.S., Ogurtsov P.S., Ogenesov V.A., Popov I.S., Samokhvalov V.V. Issledovanie protsessov ustraneniya korobleniya

- aviatsionnykh izdeliy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov, poluchennykh metodom vysokotemperaturnogo formovaniya [Research of the processes of eliminating warpage of aviation products made of polymer-composite materials obtained by high-temperature molding]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10 (739), pp. 84–94. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-84-94>
- [14] Khaskov M.A., Safronov E.V. Modelirovanie protsessov otverzhdeniya termoreaktivnykh matrits na primere slozhnoprofilnogo obraztsa [The optimization of thermosetting matrixes curing schedule on the example of a complex shape sample]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2019, no. 12 (84), pp. 46–54. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-12-46-54>
- [15] Sokolov V.V., Antipov P.Yu., Golishchev O.A., Dolinskiy S.V. Vliyaniye kolichestva sloev armiruyushchego materiala na tolshchinu i vesovye kharakteristiki ugleplastikovyykh detaley, poluchaemykh metodom vakuumnoy infuzii [Effect of number of layers of the reinforcing material on the thickness and weight characteristics of carbon fiber parts produced by vacuum infusion]. *Plasticheskie massy*, 2021, no. 1–2, pp. 62–64. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-1-2-62-64>

Terekhova E.S., Senior Researcher, Chaplygin Siberian Scientific Research Institute of Aviation (SibNIA). Research interests: designing parts of aviation structures made from the polymer composite materials. e-mail: terekhovae@sibnia.ru