

Новые материалы и технологии



СМЕРДОВ

Андрей Анатольевич
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Космические аппараты
и ракетно-носители»



БУЯНОВ

Иван Андреевич
первый заместитель
директора
НОЦ «НМКН»
(инжиниринговый центр)



ЧУДНОВ

Илья Владимирович
заместитель директора
НОЦ «НМКН»
(инжиниринговый центр)
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
e-mail: asmerdov@mail.ru

УДК 620.22—419.8(075.8)

Анализ оптимальных сочетаний требований к разрабатываемым углепластикам для крупногабаритных ракетно-космических конструкций*

А.А. Смердов, И.А. Буянов, И.В. Чуднов

Исследовано влияние повышения модулей упругости и пределов прочности углепластиков, предназначенных для применения в крупногабаритных несущих конструкциях силовых оболочек обтекателей и отсеков ракет. Показано, что для наибольшего эффекта повышение этих характеристик должно проводиться согласованно. На конкретных примерах проанализированы оптимальные сочетания требований к перспективным углепластикам.

Ключевые слова: углепластик, прочность, жесткость, устойчивость, отсеки, обтекатели ракет.

Analysis of optimal combinations of requirements to developed CFRP for large space-rocket designs*

A.A. Smerdov, I.A. Buyanov, I.V. Chudnov

The paper investigates the effect of increasing the modulus of elasticity and ultimate strengths of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) applied in large-size load carrying structures of radome shells and rocket chambers. It is shown that in order to obtain the maximum effect, the improvement of the mentioned characteristics should be performed in coordination. Optimal combinations of the requirements to the advanced CFRP have been analyzed using the particular examples.

Keywords: carbon fiber, strength, stiffness, stability, bays, missile radomes.

*Отдельные результаты настоящей работы получены при финансовой поддержке по проекту № 16.518.11.7077.

В настоящее время углепластики являются основным классом материалов для вновь создаваемых или модернизируемых ракетно-космических конструкций. Сочетание высоких жесткостных и прочностных характеристик с малой плотностью обеспечивает возможность их эффективного применения в таких изделиях, как силовые оболочки отсеков и обтекателей ракет, спутниковые платформы, антенны и несущие конструкции, корпуса баллонов давления и т. п.

К настоящему времени за рубежом создано много новых марок углеволокон, обладающих значительно более высокими характеристиками, чем традиционно применяемые в отечественной промышленности. Углеродные волокна с высокими прочностными и жесткостными свойствами начинают создавать и в России. При этом возникает вопрос о том, какие именно характеристики необходимо обеспечить сегодня и в обозримой перспективе для достижения наибольшей эффективности применения новых материалов в изделиях ракетно-космической техники.

Ситуация усугубляется тем, что, как правило, для разрабатываемых углеволокон невозможно одновременно достичь максимально высоких характеристик жесткости и прочности. Используемые технологические процессы позволяют получать либо высокопрочные, либо высокомодульные волокна [1]. И те, и другие характеристики с тех пор значительно улучшились [2], но разделение углепластиков на высокопрочные и высокомодульные сохраняется.

Так, среди применяемых сегодня за рубежом углеродных волокон, производимых одним из мировых лидеров в данной области — фирмой Тогау [3], можно выделить две серии, ориентированные на достижение разных показателей:

- волокна серии *T* (*T300*, *T400*, *T700*, *T800*, *T1000*) обладают высокой прочностью при умеренных значениях модуля упругости;
- волокна серии *M* (*M35*, *M40*, *M46*, *M50*, *M55*, *M60*) имеют очень высокую жесткость при сравнительно низких показателях прочности.

Так, прочность волокон серии *T* последовательно увеличивается от 3 530 МПа для волокна *T300* до 6 370 МПа для волокна *T1000* при том, что модуль упругости для всех волокон этой серии не превышает 230...295 ГПа. С другой стороны, модуль упругости волокон серии *M* также последовательно увеличивается от 343 ГПа для волокна *M35* до 588 ГПа для волокна *M60*, а по прочности эти волокна, как правило, уступают серии *T*.

Разумеется, прочность и жесткость однонаправленных композитов, в которых используются указанные волокна, гораздо меньше приведенных значений, однако, когда встает выбор между материалами с прочностью выше 3 000 МПа и материалами с модулем упругости почти 300 ГПа — ответ далеко не очевиден. Кроме того, возникает вопрос, не являются ли эти характеристики уже чрезмерными?

В настоящей работе проводится сравнительный анализ эффективности применения нескольких композиционных материалов — как реально существующих в России и за рубежом, так и гипотетических композитов, которые могут быть созданы в ближайшее время. Свойства исходных материалов (однонаправленных композитов), принимаемые для расчетного анализа, приведены в табл. 1. Эти данные получены из различных источников, включая работы [1—4]. Следует отметить, что полный набор из девяти характеристик, необходимых для проведения расчетов всего комплекса свойств исследуемых объектов, неизвестен практически ни для какого материала. Поэтому приходилось принимать часть характеристик по аналогии с известными. Свойства однонаправленных материалов задаются в их естественных системах координат [5]: ось *1* такой системы координат совпадает с направлением армирования, а ось *2* направлена по нормали к нему в плоскости слоя. Два первых столбца табл. 1 соответствуют двум основным материалам, применяемым в настоящее время в отечественной ракетно-космической промышленности: углепластик на основе ленты ЛУ-П и связующего ЭНФБ используется в ракетно-космических конструкциях, изготавливаемых методом выкладки; углепластик на основе волокон

УКН5000 и связующего ЭХД-МК широко применяется в конструкциях, изготавливаемых намоткой [6]. Оба эти материала созданы достаточно давно, и их характеристики уже не в полной мере отвечают потребностям сегодняшнего дня.

Представленные в табл. 1 значения относятся к элементарным слоям однонаправленного материала. Между тем, в конструкциях углепластики применяются в составе сложных многослойных структур. Большой интерес представляет сопоставление потенциальных возможностей этих структур, выполненных из различных углепластиков. Некоторые результаты такого анализа предельных возможностей показаны на рис. 1 и 2. Используемые при

построении этих рисунков алгоритмы расчета и оптимизации описаны в работе [7]. На рисунке 1 приведены сочетания модулей упругости в двух взаимно перпендикулярных направлениях, принципиально достижимые для различных структур из рассматриваемых углепластиков. На рисунке 2 изображены возможные сочетания модуля упругости в каком-либо выбранном направлении с модулем сдвига, доступные при одновременной максимизации обеих данных характеристик. На рисунках видно, что углепластики серии *M* значительно превосходят прочие материалы по своим потенциальным возможностям при требованиях максимальной жесткости.

Таблица 1

Свойства однонаправленных углепластиков, принимаемые для расчетного анализа

Характеристика	Углепластик					
	ЛУ-П/ЭНФБ	УКН5000/ЭХД-МК	T300/Ероху	T800H/Ероху	M46J/Ероху	M60J/Ероху
Модуль упругости материала:						
в направлении армирования E_1 , ГПа	140	120	125	160	245	330
в поперечном направлении E_2 , ГПа	9,6	9	7,8	7,8	6,9	5,9
Модуль сдвига						
G_{12} , ГПа	4,6	3,8	4,4	4,4	3,9	3,9
Коэффициент Пуассона прочности в направлении армирования, МПа:						
ν_{12}	0,3	0,3	0,34	0,34	0,32	0,32
Предел:						
при растяжении F_1^+	700	1300	1760	2840	2160	1760
при сжатии F_1^-	600	800	1570	1570	980	780
Предел прочности в поперечном направлении, МПа:						
при растяжении F_2^+ , МПа	27	27	80	80	45	30
при сжатии F_2^- , МПа	184	184	168	168	168	168
Предел прочности при сдвиге в плоскости формирования						
F_{12} , МПа	55	49	98	98	59	39

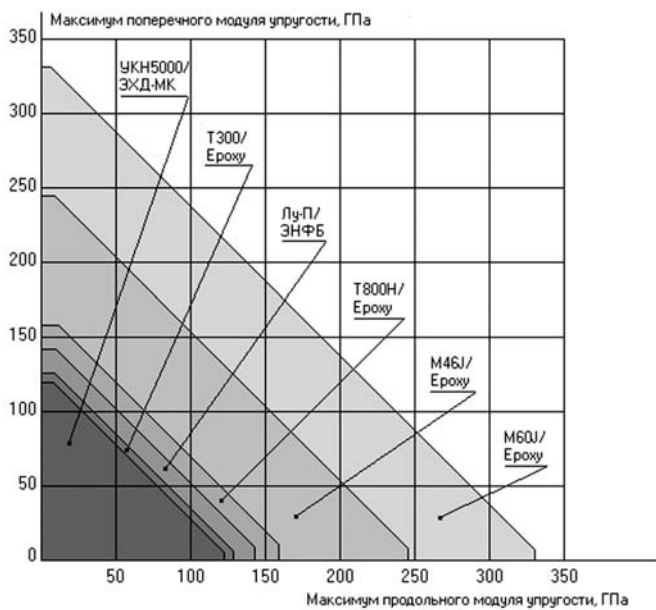


Рис. 1. Границы предельных возможностей исследуемых углепластиков в координатах максимум продольного модуля упругости — максимум поперечного модуля упругости

Требования такого рода возникают, например, при проектировании космических конструкций, таких как раскрываемые антенны, фермы и панели для размещения высокоточной аппаратуры. На эти конструкции действуют сравнительно небольшие нагрузки, так что их качество определяется не прочностью, а жесткостью.

С другой стороны, можно привести и примеры конструкций, для которых требования по жесткости отсутствуют вовсе либо являются второстепенными. Так, существуют силовые оболочки баллонов давления, для которых основным фактором, определяющим эффективность применения материала, является его прочность при растяжении. Для таких конструкций наиболее эффективными являются высокопрочные углепластики типа Т800 или Т1000.

Однако наибольший интерес представляет проектирование несущих конструкций, для которых важна как прочность, так и жесткость материала. Яркими представителями конструкций такого рода являются силовые оболочки отсеков и обтекателей ракет, работающие при сжимающих нагрузках. Их несущая способность может определяться как прочностью, так и устойчивостью, а, следовательно, требо-

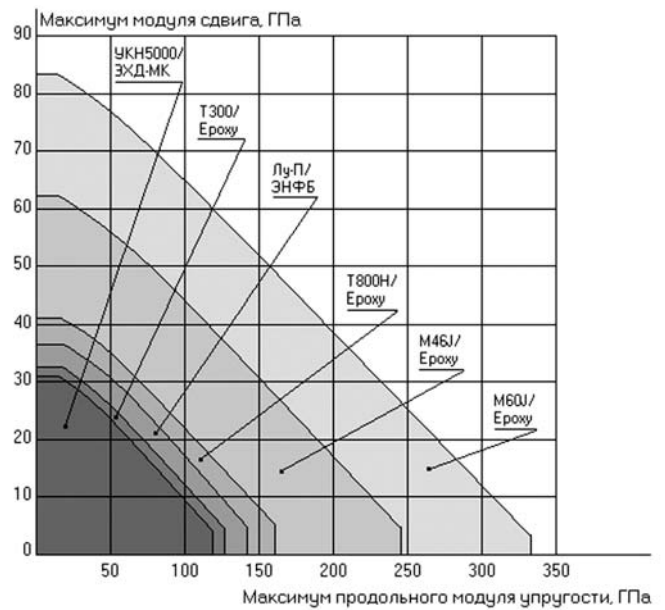


Рис. 2. Границы предельных возможностей исследуемых углепластиков в координатах максимум продольного модуля упругости — максимум модуля сдвига

вания к свойствам материала таких конструкций должны представлять собой некий компромисс.

В качестве объекта, для которого проводится сравнение эффективности применения различных материалов, выбрана силовая оболочка среднего переходника разгонного блока ДМ-SL, разработанного РКК «Энергия» для участия в международном проекте «Морской старт». В используемой конструкции оболочка изготавливается из алюминиевого сплава, но в перспективе предусмотрена разработка облегченной композитной конструкции данного изделия [8], представляющей собой трехслойную цилиндрическую оболочку с многослойными несущими обшивками из углепластика и сотовым наполнителем. Диаметр оболочки 3,7 м, длина 3,99 м. Оболочка нагружена осевой сжимающей силой 4,05 МН совместно с внешним давлением 14,7 кПа.

Прочность многослойных обшивок рассчитывалась по первому разрушению [5]; алгоритм расчета подробно описан в работе [7]. Для оценки общей устойчивости трехслойной оболочки использовались кинематические гипотезы ломаной линии [5]. Расчет устойчивости проводился путем перебора целочислен-

ных значений параметров волнообразования m (число полуволн в осевом направлении оболочки) и n (число волн по окружности) и нахождения минимальных значений, соответствующих $m = 1, 2, \dots$ и $n = 0, 2, 3, \dots$. Алгоритм расчета описан в работе [8]. Там же приведен алгоритм расчета местной устойчивости несущих слоев трехслойной оболочки по коротковолновым формам типа «сморщивания несущих слоев» [5]. Для местной устойчивости отдельно анализировались синфазная и антифазная формы деформирования обшивок [8]. Численные расчеты выполнялись на компьютере по программе расчета и оптимизации трехслойных композитных оболочек TRELА-2 (© Институт композитных технологий, 2008). Понижающий коэффициент по общей устойчивости принимался равным 0,5, по местной устойчивости — 0,3 [9].

В качестве базовых приняты результаты параметрического анализа трехслойной оболочки с обшивками из углепластика толщиной 0,77 мм каждая, армированными по схеме $[90^{\circ}_2/0^{\circ}_1/\pm\varphi_2]$ и толщиной сотового заполнителя АМГ-2Н 2,5/0,03, равной 32,4 мм; такая структура является оптимальной при использовании материала ЛУ-П/ЭНФБ [8]. При расчетах толщина однонаправленного слоя для всех материалов условно принималась одинаковой и равной 0,11 мм.

На рисунках 3 и 4 показаны результаты анализа зависимости запасов прочности и устойчивости от угла ориентации перекрестно армированных слоев $\pm\varphi$. Для анализа выбраны два крайних случая реализации требований к материалу: на рис. 3 обшивки выполнены из высокопрочного, но обладающего малой жесткостью материала Т800Н/Ероху, на рис. 4 — из высокомодульного материала М60J/Ероху. Нижняя огибающая кривых, приведенных на каждом графике, показывает запас несущей способности конструкции.

Из рисунка 3 следует, что высокая прочность материала Т800Н/Ероху не может быть реализована в данной конструкции, поскольку ее несущая способность определяется в зависимости от угла φ либо общей, либо мест-

ной устойчивостью. С другой стороны, при использовании высокомодульного материала

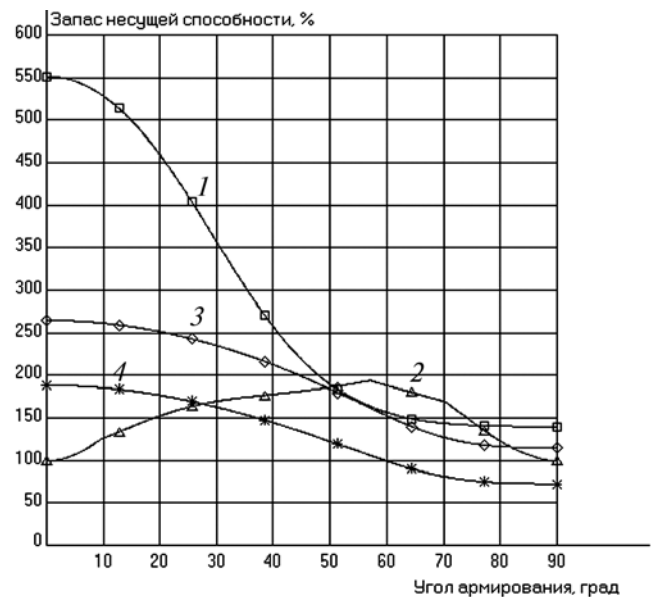


Рис. 3. Запас несущей способности трехслойной оболочки среднего переходника РБ ДМ-SL с обшивками из углепластика Т800Н/Ероху, армированными по схеме $[90^{\circ}_2/0^{\circ}_1/\pm\varphi_2]$:

1 — прочность; 2 — общая устойчивость; 3 — местная устойчивость (синфазные формы); 4 — местная устойчивость (антифазные формы)

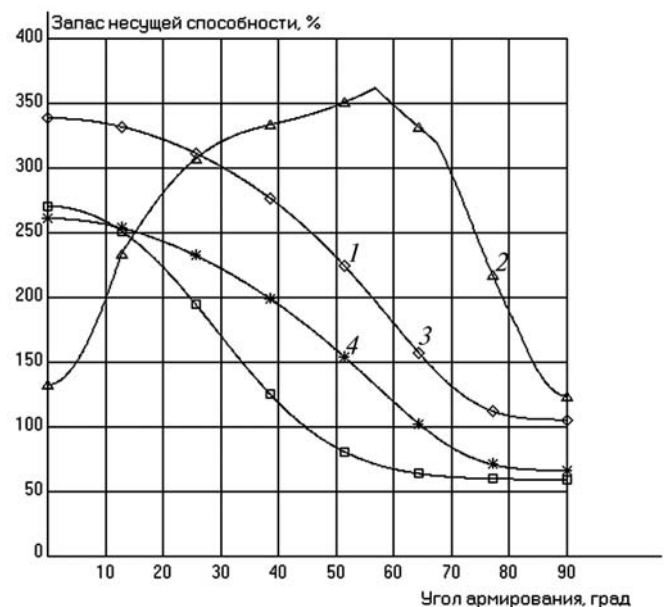


Рис. 4. Запас несущей способности трехслойной оболочки среднего переходника РБ ДМ-SL с обшивками из углепластика М60J/Ероху, армированными по схеме $[90^{\circ}_2/0^{\circ}_1/\pm\varphi_2]$:

1 — прочность; 2 — общая устойчивость; 3 — местная устойчивость (синфазные формы); 4 — местная устойчивость (антифазные формы)

M60J/Ероху для обшивок с углами армирования более $\pm 14^\circ$ несущая способность конструкции лимитируется прочностью, которая у этого материала невысока. Однако в целом второй материал позволяет добиться большего запаса по несущей способности, что говорит о важной роли жесткостных характеристик материала обшивок. Подтверждением тому служат приведенные на рис. 5 результаты сравнительного анализа несущей способности исследуемой оболочки с обшивками, выполненными из всех анализируемых материалов. Восходящие участки кривых соответствуют общей устойчивости, нисходящие — прочности (как это хорошо видно на рис. 3 и 4); для некоторых материалов в центре графика присутствует также небольшой нисходящий участок, соответствующий местной устойчивости. Видно, что материал *M60J/Ероху*, обладающий наибольшим модулем упругости среди всех рассмотренных материалов, способен обеспечить наилучшую несущую способность конструкции.

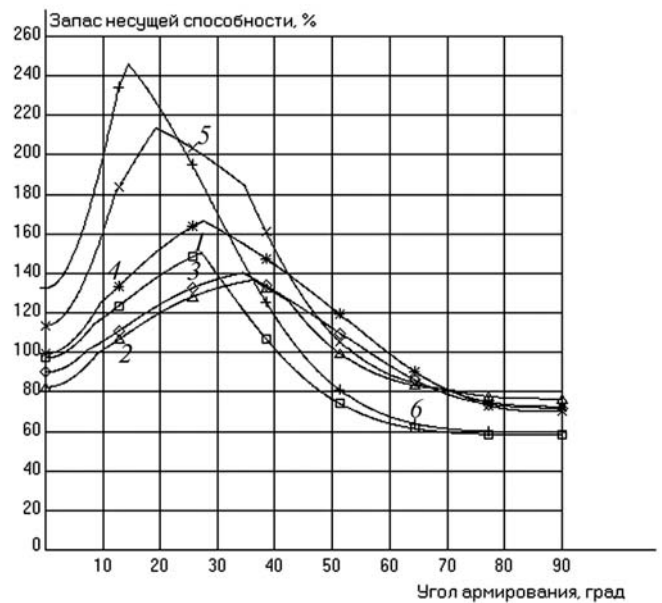


Рис. 5. Сопоставление несущей способности трехслойной оболочки среднего переходника РБ ДМ-SL с обшивками из углепластиков, армированными по схеме $[90^\circ_2/0^\circ_{\pm 1}/\pm \varphi_2]$:
 1 — ЛУ-П/ЭНФБ; 2 — УКН5000/ЭХД-МК;
 3 — Т300/Ероху; 4 — Т800Н/Ероху;
 5 — М46J/Ероху; 6 — М60J/Ероху

Таблица 2

Характеристики оптимальных оболочек с обшивкой, выполненной из различных материалов

Характеристика		Масса оптимальной конструкции, кг	Параметры оптимальной конструкции					Несущая способность оптимальной конструкции		
E_1 , ГПа	F_1^- , МПа		h_3 , мм	h_0 , мм	h_{90} , мм	h_φ , мм	φ	Запас прочности	Запас общей устойчивости	Запас местной устойчивости
160	700	165,7	29,5	0,11	0,22	0,22	$\pm 28^\circ$	1,024	1,007	1,324
180	700	159,3	27	0,11	0,22	0,22	$\pm 28^\circ$	1,018	1,006	1,466
200	700	152,9	24,5	0,22	0,11	0,22	$\pm 48^\circ$	1,067	1,001	1,237
220	700	147,8	22,5	0,22	0,11	0,22	$\pm 46^\circ$	1,088	1,010	1,406
240	700	142,7	20,5	0,22	0,11	0,22	$\pm 52^\circ$	1,016	1,017	1,336
260	700	140,2	19,5	0,11	0,22	0,22	$\pm 27^\circ$	1,023	1,003	2,082
280	700	136,3	24	0,11	0,11	0,22	$\pm 27^\circ$	1,001	1,010	1,434
300	700	133,8	23	0,11	0,11	0,22	$\pm 26^\circ$	1,022	1,005	1,528
320	700	132,5	22,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 24^\circ$	1,064	1,009	1,619
340	700	130,0	21,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 25^\circ$	1,041	1,012	1,694
360	700	127,4	20,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 26^\circ$	1,018	1,010	1,771
160	900	163,1	28,5	0,11	0,22	0,22	$\pm 35^\circ$	1,131	1,001	1,259
180	900	156,7	26	0,11	0,22	0,22	$\pm 37^\circ$	1,071	1,002	1,361
200	900	151,6	24	0,11	0,22	0,22	$\pm 35^\circ$	1,114	1,002	1,527
220	900	147,8	22,5	0,22	0,11	0,22	$\pm 46^\circ$	1,399	1,010	1,406
240	900	142,7	20,5	0,22	0,11	0,22	$\pm 52^\circ$	1,307	1,017	1,336

Характеристика		Масса оптимальной конструкции, кг	Параметры оптимальной конструкции					Несущая способность оптимальной конструкции		
E_1 , ГПа	F_1^- , МПа		h_3 , мм	h_0 , мм	h_{90} , мм	h_{φ} , мм	φ	Запас прочности	Запас общей устойчивости	Запас местной устойчивости
260	900	136,3	24	0,11	0,11	0,22	$\pm 36^\circ$	1,031	1,001	1,258
280	900	132,5	22,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 35^\circ$	1,056	1,003	1,364
300	900	130,0	21,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 36^\circ$	1,026	1,009	1,425
320	900	128,7	21	0,11	0,11	0,22	$\pm 34^\circ$	1,079	1,005	1,027
340	900	126,1	20	0,11	0,11	0,22	$\pm 35^\circ$	1,049	1,001	1,069
360	900	124,9	19,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 33^\circ$	1,104	1,000	1,141
160	1200	161,9	28	0,11	0,22	0,22	$\pm 43^\circ$	1,259	1,002	1,137
180	1200	155,5	25,5	0,11	0,22	0,22	$\pm 50^\circ$	1,082	1,001	1,097
200	1200	151,6	24	0,11	0,22	0,22	$\pm 35^\circ$	1,486	1,002	1,527
220	1200	146,5	22	0,11	0,22	0,22	$\pm 37^\circ$	1,409	1,001	1,629
240	1200	140,2	25,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 44^\circ$	1,132	1,001	1,035
260	1200	136,3	24	0,11	0,11	0,22	$\pm 36^\circ$	1,375	1,001	1,258
280	1200	132,5	22,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 35^\circ$	1,408	1,003	1,364
300	1200	128,7	21	0,11	0,11	0,22	$\pm 39^\circ$	1,265	1,004	1,381
320	1200	124,9	19,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 44^\circ$	1,115	1,003	1,356
340	1200	122,3	18,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 46^\circ$	1,063	1,000	1,375
360	1200	121,0	18	0,11	0,11	0,22	$\pm 45^\circ$	1,084	1,003	1,462
160	1500	161,9	28	0,11	0,22	0,22	$\pm 43^\circ$	1,574	1,002	1,137
180	1500	155,5	25,5	0,11	0,22	0,22	$\pm 50^\circ$	1,353	1,001	1,097
200	1500	150,4	23,5	0,11	0,22	0,22	$\pm 57^\circ$	1,205	1,000	1,002
220	1500	146,5	22	0,11	0,22	0,22	$\pm 37^\circ$	1,761	1,001	1,629
240	1500	140,2	25,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 44^\circ$	1,415	1,001	1,035
260	1500	136,3	24	0,11	0,11	0,22	$\pm 36^\circ$	1,719	1,001	1,258
280	1500	132,5	22,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 35^\circ$	1,760	1,003	1,364
300	1500	128,7	21	0,11	0,11	0,22	$\pm 39^\circ$	1,581	1,004	1,381
320	1500	124,9	19,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 44^\circ$	1,394	1,003	1,356
340	1500	122,3	18,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 46^\circ$	1,328	1,000	1,375
360	1500	119,8	17,5	0,11	0,11	0,22	$\pm 49^\circ$	1,246	1,001	1,354

Для определения оптимального сочетания прочности и жесткости, необходимых для обеспечения максимума несущей способности, было проведено дополнительное исследование, результаты которого приведены в табл. 2.

Задача поиска оптимальных параметров решалась по критерию минимума массы конструкции при обеспечении ее несущей способности при заданных нагрузках. Варьируемыми параметрами являлись толщина заполнителя,

толщины продольных, кольцевых и перекрестно армированных слоев в обшивках и угол ориентации перекрестно армированных слоев. Для оптимизационных расчетов также использовалась программа TRELА-2. При расчете массы силовой оболочки не учитывалась масса шпангоутов и навески, но учитывалась масса клея, скрепляющего обшивку и заполнитель (300 г/м²). В среднем при каждом оптимизационном расчете рассматривалось около 1 млн вариантов проекта оболочки.

При проведении исследования принимались различные характеристики однонаправленного материала слоев обшивок. В таблице 2 приведены значения модуля упругости в направлении армирования E_1 и предела прочности при сжатии в направлении армирования F_1 ; остальные характеристики принимались равными характеристикам материала M46J/Ероху. Приведены масса оптимальной конструкции, ее параметры: толщины заполнителя h_3 , толщины продольных, кольцевых и перекрестно армированных слоев h_0 , h_{90} и h_ϕ и угол ориентации перекрестно армированных слоев ϕ , а также запасы прочности, общей и местной устойчивости (во всех случаях по антифазным формам).

Анализ представленных в таблице результатов показывает, что повышение модуля упругости материала всегда приводит к снижению массы оптимальной конструкции, тогда как повышение прочности материала — не всегда (значения массы, уменьшившиеся при повышении прочности, выделены жирным). Это объясняется тем, что при повышении жесткости обшивок для обеспечения той же устойчивости может быть понижена толщина заполнителя, что и способствует снижению массы. При повышении прочности выигрыш по массе возможен только при уменьшении толщины обшивок (прочность не зависит от толщины заполнителя). Таким образом, уменьшение массы происходит только тогда, когда повышение прочности достаточно, чтобы снять как минимум один слой, а это достигается не при каждом повышении прочности. Следует обратить внимание на излишние запасы прочности оптимальных конструкций при прочности исходного материала 1 500 МПа.

Выводы

1. При разработке новых углепластиков для несущих конструкций ракетно-космической техники следует обращать внимание на согла-

сованное повышение как прочности, так и жесткости однонаправленного композита.

2. Для крупногабаритных трехслойных оболочек любое повышение продольного модуля упругости материала в диапазоне 160...360 ГПа позволяет снизить массу конструкции за счет уменьшения толщины заполнителя. Повышение прочности при продольном сжатии без увеличения жесткости позволяет гарантированно снизить массу только при малой исходной прочности (600...900 МПа). При прочности исходного материала свыше 1 200 МПа дальнейшее ее увеличение для рассмотренной конструкции, как правило, бесполезно.

3. Выбор наилучшего материала для каждой конкретной проектируемой конструкции должен опираться на результаты исследования, подобного проведенному в настоящей работе.

Литература

1. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
2. Меркулов В.Д. Эпоксидные полимерные материалы и композиты. Углепластики // Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Неметаллические конструкционные материалы. Т. II-4 / Под ред. А.А. Кулькова, В.В. Васильева. 2005. С. 172—189.
3. <http://www.torayca.com>
4. Протасов В.Д. Свойства конструкционных композиционных материалов // Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. Т. I-3. В 2-х кн. / Под ред. К.С. Колесникова. М.: Машиностроение. 1994. С. 311—314.
5. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
6. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
7. Зиновьев П.А., Смердов А.А. Оптимальное проектирование композитных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 103 с.
8. Смердов А.А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники. Дис. ... докт. техн. наук. М., 2008. 410 с.
9. Алфутов Н.А. О практическом расчете на устойчивость конструкций, состоящих из пластин и оболочек // Машиностроение: Энциклопедия. Т. 1-3. В 2-х кн. / Под ред. К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1995. Кн. 2. С. 214.

Статья поступила в редакцию 15.06.2012