

Открытое акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева» (г. Миасс)

О влиянии процесса старения материалов теплозащиты на тепловые режимы спускаемых летательных аппаратов

Для температурного режима летательного аппарата определяющими параметрами являются теплопроводность, теплоемкость и плотность тепловой защиты. В процессе эксплуатации, под воздействием влажности, температуры и солнечного излучения, данные характеристики теплозащитных материалов (ТЗП) могут подвергаться изменениям [1], что описывается термином *старение* материала.

В авиационной и космической отрасли большое количество работ посвящено влиянию старения на изменение коэффициента теплопроводности тепловой защиты [2–4]. Это связано с преимущественно стационарным характером тепловых процессов, происходящих внутри теплозащиты самолетов и спутников.

В тепловых режимах спускаемых летательных аппаратов (СЛА) большую роль играют нестационарные процессы прогрева и уноса материалов теплозащиты. При этом, значительный вклад в температуру корпуса СЛА вносят характеристики теплоемкости и плотности.

Вследствие больших тепловых нагрузок, незначительные, для других типов ЛА, отклонения теплофизических характеристик (ТФХ) материалов теплозащиты могут приводить к существенному повышению температуры силового корпуса.

В работе систематизированы данные по изменению теплопроводности, теплоемкости и плотности материалов, характерных для тепловой защиты СЛА. Для теплозащиты с внешним слоем из углепластикового материала приведена оценка влияния деградации теплопроводности, теплоемкости и плотности на температурный режим корпуса СЛА, выполнен расчет необходимого коэффициента запаса толщины теплозащиты.

Для определения влияния старения на ТФХ теплозащиты летательного аппарата был выполнен анализ экспериментальных данных, полученных в рамках работ по продлению сроков эксплуатации изделий.

Анализ проводился по материалам, старение которых проходило естественным образом, при хранении и эксплуатации в составе изделий.

Одной из основных проблем данного анализа стало отсутствие сведений о начальных значениях теплопроводности, теплоемкости и плотности.

Технические условия и отраслевые стандарты на материал регламентируют диапазон допустимых начальных значений ТФХ материала. Однако использование ТУ и ОСТ в качестве начальных значений ТФХ

скрывает существенную долю изменений в свойствах материала ввиду большого диапазона возможных начальных значений ТФХ (см. таблицу 1).

Табл. 1. Разброс значений ТФХ материалов, характерных для теплозащиты спускаемых ЛА (в процентах) по ТУ и ОСТ.

Материал	λ	C_p	ρ
Углепластик	20	16	12
Органопластик	8	5	9
Кварцестеклопластик	22	15	13
Фторопласт	5	8	12

В таблице 2 приведено отклонение теплопроводности, теплоемкости и плотности некоторых материалов теплозащиты от диапазона значений, заданного ТУ.

Табл. 2. Отклонение значений ТФХ материалов от ТУ (в процентах).

Материал	λ	C_p	ρ
Углепластик	9	6	0
Органопластик	0	0	0
Кварцестеклопластик	11	0	0
Фторопласт	0	5	0

В численных расчетах используются исходные данные на материал, сформированные на основе многократных измерений. Исходные данные содержат, как правило, более узкий диапазон значений характеристики материала. В данной работе для анализа влияния старения на ТФХ материалов теплозащиты за номинал принимается значение, полученное по результатам натурных измерений (см. например [5]). Максимальные отклонения ТФХ от номинальных значений и изменение коэффициента температуропроводности представлены в таблице 3.

Таблица 3. Максимальное отклонение теплофизических характеристик материалов, характерных для теплозащиты спускаемых летательных аппаратов.

материал	Максимальное отклонение, % от номинала			
	λ	c_p	ρ	α
Углепластик	+61	-23	-6	+110
Органопластик	-18	+14	-4	-22
Кварцестеклопластик	+28	-12	-4	+25
Фторопласт	-16	-3	+2	-2

Результаты анализа таблиц 1, 2 и 3 дают следующую качественную картину старения материалов теплозащиты.

Несмотря на то, что имеющихся данных недостаточно для определения зависимости изменения ТФХ от времени, направление старения (в сторону улучшения или деградации) отдельной характеристики материала во всех измерениях оставалось неизменным. Наибольшему изменению подвержена

теплопроводность материала. В меньшей степени изменяется теплоемкость. Плотность при длительной эксплуатации изученных материалов практически не изменяется.

Фторопласт и ОП-56379Н являются стабильными материалами как относительно разброса исходных характеристик, так и по их изменению в процессе старения.

Наибольшей деградации подвержены характеристики углепластиковых материалов. Изменение ТФХ углепластиков в процессе старения и вследствие разброса значений по ТУ необходимо учитывать в форме коэффициента запаса по толщине теплозащиты ЛА.

Влияние старения на тепловой режим СЛА по траектории спуска исследовано на летательном аппарате, представляющем собой тонкий осесимметричный конус, затупленный по сфере.

На боковой поверхности ЛА использована двухслойная схема тепловой защиты:

- наружный слой – углепластиковый аблятор для снижения тепловых потоков к нижележащим слоям за счет поглощения тепла в процессе теплового разрушения материала;
- теплоизолирующий подслой из органопластика, для обеспечения допустимых температурных режимов корпуса ЛА.

Расчеты проведены в одномерной постановке прогрева и уноса материала ТЗП. Расчет тепловых потоков и унос материала аблятора выполнен по методу В.С. Авдеевского [6] с корректировками, внесенными в ОАО «ГРЦ Макеева» по результатам многочисленных экспериментальных исследований.

Анализ выполнен для трех характерных траекторий гиперзвукового движения ЛА с параметрами входа в атмосферу на высоте 100 км:

- $V_{вх} \approx 6$ км/с;
- $V_{вх} \approx 7$ км/с;
- $V_{вх} > 8$ км/с.

Траектория спуска в атмосфере рассчитывалась в приближении материальной точки с учетом изменения формы и массы модельного ЛА.

Толщины ТЗП боковой поверхности ЛА были предварительно оптимизированы для каждой из расчетных траекторий по следующим критериям:

1. Температура теплоизоляционного подслоя в конце полета не превышает температуры разрушения.
2. Температура корпуса ЛА не превышает некоторой характерной для данного металла допустимой температуры.
3. Линейный унос материала аблятора к концу полета не превышает 85% от его начальной толщины.

Для количественной оценки влияния изменения ТФХ теплозащиты на тепловой режим СЛА выполнено три серии расчетов, в которых значение характеристик углепластика искусственно ухудшалось на 10% от номинала.

На графиках рисунка 1 приведено изменение максимальной температуры СЛА в полете для следующих расчетных случаев:

- 1) Теплопроводность, теплоемкость и плотность углепластика приняты в соответствии с номиналом.
- 2) Теплопроводность искусственно ухудшается на 10%.
- 3) Теплоемкость искусственно ухудшается на 10%.
- 4) Плотность искусственно ухудшается на 10%.
- 5) Все исследуемые ТФХ углепластика ухудшаются на 10% в сравнении с номиналом.

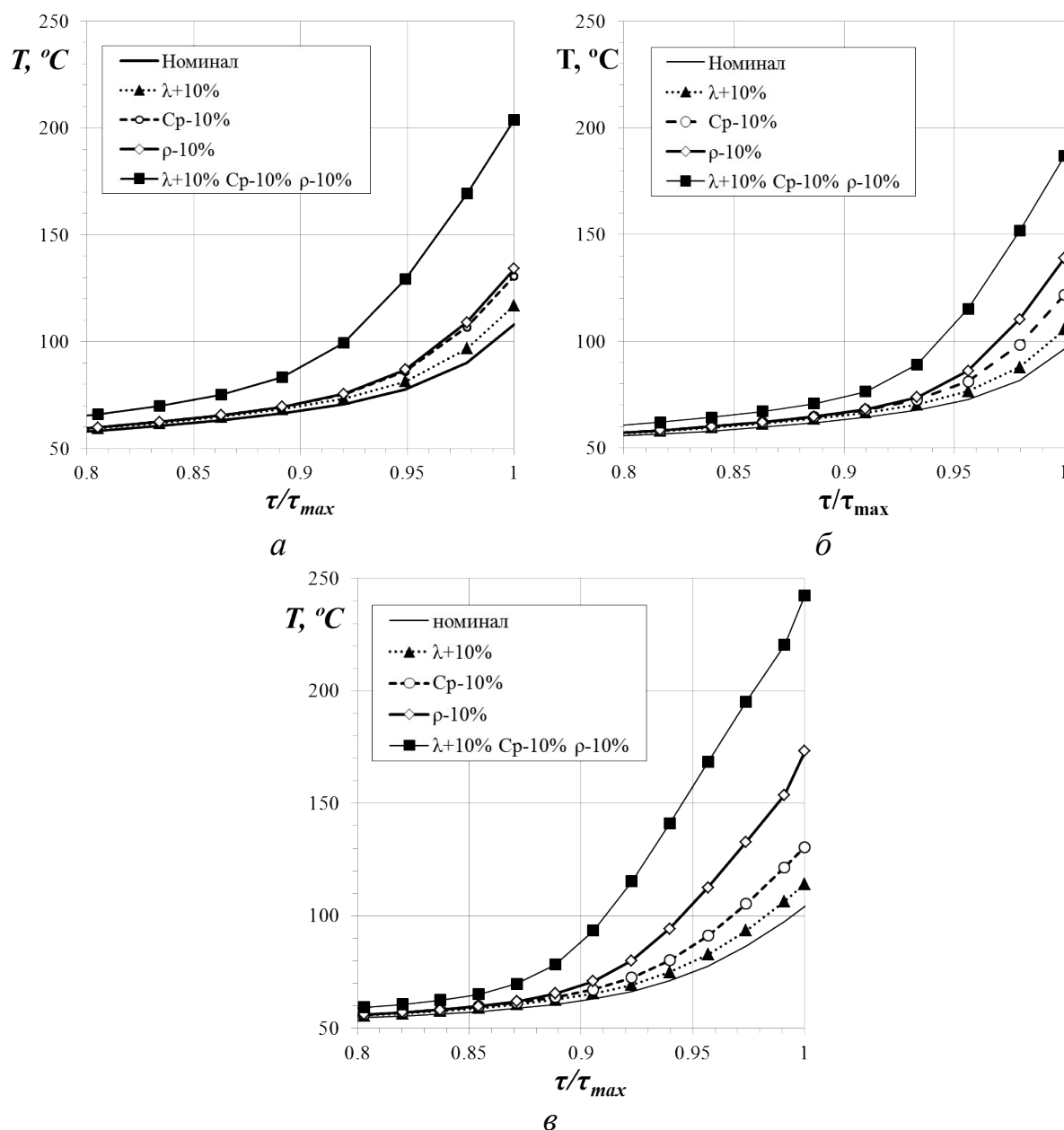


Рис. 1. Изменение максимальной температуры корпуса СЛА по траектории спуска в атмосфере: а) –траектория с $V_{\text{вх}} \approx 6$ км/с; б) траектория с $V_{\text{вх}} \approx 7$ км/с; в) траектория с $V_{\text{вх}} > 7$ км/с. τ/τ_{max} – относительное время полета.

Как можно заметить, деградация плотности вносит наибольший вклад в увеличение температуры корпуса ЛА. Например, деградация плотности на

траектории с $V_{\text{вх}} > 7$ км/с приводит к увеличению температуры корпуса ЛА на 70 С.

Вклад теплоемкости и теплопроводности в тепловой режим ЛА, при переходе к более теплонапряженным траекториям, практически не изменяется.

Для оценки коэффициента запаса была выполнена серия расчетов теплового режима. Теплопроводность, теплоемкость и плотность материалов теплозащиты принимались в соответствии со следующими вариантами:

- 1) *Номинал* – ТФХ принимаются в соответствии с исходными данными, без учёта деградации.
- 2) *Эксперимент* – ТФХ принимаются в соответствии с наихудшим случаем деградации материалов теплозащиты, приведенным в таблице 3.
- 3) *Деградация на 10%* – ТФХ каждого материала ТЗП искусственно деградируют на 10% от номинала. Данный вариант приведен для сравнения и соответствует характерным колебаниям ТФХ углепластика.

Результаты расчета для траектории с $V_{\text{вх}} > 7$ км/с приведены на рисунке 2. Следует отметить, что без использования коэффициентов запаса, деградация ТФХ на 10% приводит к увеличению температуры корпуса СЛА на 170 С к концу полета, что может сказаться на сохранности полезной нагрузки.

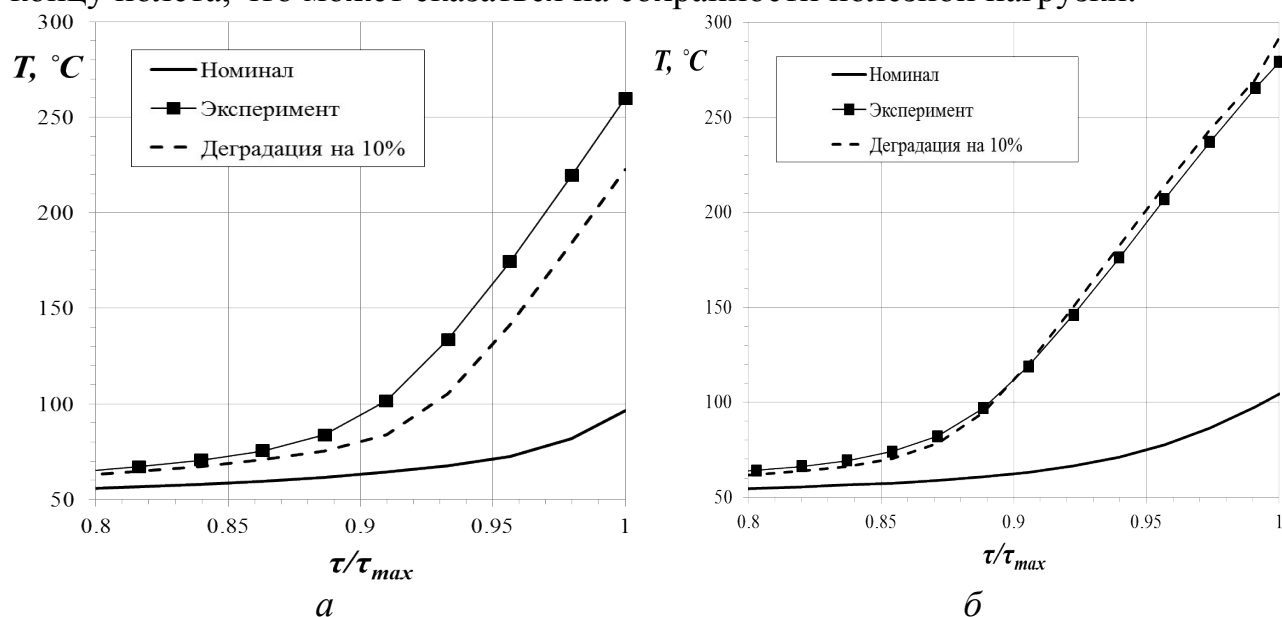


Рис. 2. Изменение максимальной температуры корпуса СЛА по траектории спуска в атмосфере: а) –траектория с $V_{\text{вх}} \approx 7$ км/с; б) траектория с $V_{\text{вх}} > 7$ км/с. τ/τ_{max} – относительное время полета.

Коэффициент запаса подбирался подбором толщины углепластика таким образом, чтобы температура корпуса СЛА в конце полета совпала с номиналом, и составил 20% по толщине углепластика.

Заключение

В результате работы была выполнена систематизация данных по изменению ТФХ теплозащитных материалов в процессе естественного

старения. При длительных сроках хранения для углепластиковых материалов внешнего слоя теплозащиты наблюдается заметная деградация ТФХ.

Выполнена оценка влияния малых отклонений теплопроводности, теплоемкости и плотности на тепловой режим корпуса СЛА. Показана существенно нелинейная зависимость теплового режима корпуса СЛА от плотности внешнего материала теплозащитного покрытия.

В серии расчетов показано, что эффект старения оказывает значимое влияние на температурный режим корпуса СЛА и должен быть учтен в форме коэффициента запаса.

Литература

1. Гойхман Б.Д., Смехунова Т.П. Прогнозирование изменений свойств полимерных материалов при длительном хранении и эксплуатации // Успехи химии, вып. 8, 1980 г.
2. Giannadakis K., Varna J. Effect of thermal aging and fatigue on failure resistance of aerospace composite materials // Materials Science and Engineering. No. 5, 2009. P. 1–9.
3. Amin A., Salman M. An overview on aging of polymeric insulators // Advanced Materials Science. No 13, 2006. P. 93–116.
4. Tomblin J. Aging of composite aircraft structures Benchcraft Starship and B-737 horizontal stabilizer // Proceedings of the Joint Advanced Materials and Structures conference, June 17, 2008. P. 110–124.
5. Голованов А.Н., Кузин А.Я. Восстановление эффективных коэффициентов теплопроводности углепластиковых материалов в условиях теплового нагружения от плазменной струи // Вестник Томского государственного университета, серия «Математика и механика» №4, 2010 г., стр. 83–89.
6. Конвективный теплообмен изделий РКТ. Руководство для конструкторов. Под редакцией докт. техн. наук Б.А. Землянского. Г. Королев, Московской обл. 2010. 397 с.