

УДК 536.2

Анализ вариантов исполнения многослойного теплозащитного покрытия на основе материала с высокой степенью анизотропии теплопроводности

Зарубин Владимир Сергеевич^(*)

vszarubin@gmail.com

Леонов Виктор Витальевич

lv-05@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Применение в составе теплозащиты космических спускаемых аппаратов материалов с высокой степенью анизотропии теплопроводности позволяет компенсировать неравномерность распределения тепловых нагрузок по их поверхности и выровнять результирующее поле температур. В работе рассмотрены различные варианты исполнения многослойного теплозащитного покрытия на основе анизотропного материала. Проведены расчеты термонапряженного состояния этих вариантов при осуществлении спуска в атмосфере с местной параболической скоростью и остыванием после посадки.

Ключевые слова: теплозащитное покрытие, пирографит, термонапряженное состояние, анизотропный материал, баллистическая капсула

Введение. В предыдущих исследованиях было показано, что многослойное теплозащитное покрытие, выполненное из последовательных слоев стеклоуглерода СУ-2500, пиролитического графита УПВ-1Т и пористого керамического материала на основе кварцевых волокон ТЗМК-10 позволяет обеспечить непревышение максимальных рабочих значений температур материалов при спуске аппарата с использованием различных траекторий [1]. Однако при длительном нагреве существует вероятность значительного науглероживания материала ТЗМК-10 из-за контакта с пирографитом. Это обстоятельство приводит к увеличению теплопроводности теплоизоляционного слоя и, следовательно, повышению температуры оболочки корпуса аппарата. В работе рассмотрены варианты исполнения теплозащитного покрытия, позволяющие избежать этого эффекта.

Материалы и методы; результаты. В качестве объекта исследования выбрана баллистическая капсула сегментально-конической формы, осуществляющая вход в атмосферу Земли с местной параболической скоростью по траектории с двумя промежуточными входами в атмосферу. Исходный вариант лобовой теплозащиты аппарата представляет собой сферический сегмент, состоящий из силовой оболочки, выполненной из титанового сплава ОТ-4, и последовательных слоев ТЗМК-10, УПВ-1Т и СУ-2500. Дополнительно на слой стеклоуглерода нанесен тонкий слой высокотеплопроводного антиокислительного покрытия [2].

Для предотвращения науглероживания ТЗМК-10 рассмотрены несколько вариантов модификации указанного многослойного теплозащитного покры-

тия. Первым вариантом является введение промежуточного слоя стеклоуглерода между слоями УПВ-1Т и ТЗМК-10. Вторым вариантом является использование вместо слоев пирогرافита и стеклоуглерода одного слоя композиционного материала, состоящего из чередующихся слоев УПВ-1Т и СУ-2500. Третий и четвертый варианты модификации предполагают замену волокнистого керамического материала на основе кварцевых волокон на материалы, не склонные к науглероживанию. В качестве таких материалов рассмотрены керамический материал на основе муллит-корундовых волокон ТЗМК-1700 и углеграфитовый войлок на основе вязкого волокна КАРБОПОН-22.

Для рассмотренных вариантов исполнения многослойного теплозащитного покрытия проведены расчеты термонапряженного состояния при спуске в атмосфере с учетом остывания после посадки. В качестве граничного условия при расчетах использована плотность теплового потока, рассчитанная по параметрам траектории с использованием разработанного программно-математического обеспечения [3].

Заключение. По результатам расчетов проведен анализ применимости модификаций многослойного теплозащитного покрытия, обеспечивающих отсутствие науглероживания теплоизоляционного слоя, для обеспечения защиты аппарата при спуске в атмосфере Земли с местной параболической скоростью входа.

Список источников

- [1] Зарубин В.С., Леонов В.В. Оценка эффективности применения стеклоуглерода в качестве защиты многослойного теплозащитного покрытия спускаемого аппарата. *Тепловые процессы в технике*, 2023, т. 15, № 7, с. 309–316.
- [2] Сорокин О.Ю., Гращенков Д.В., Солнцев С.Ст., Евдокимов С.А. Керамические композиционные материалы с высокой окислительной стойкостью для перспективных летательных аппаратов (обзор). *Труды ВИАМ*, 2014, № 6.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8>
- [3] Зарубин В.С., Зимин В.Н., Леонов В.В., Зарубин В.С. Анализ теплового режима теплозащиты с применением анизотропного материала при спуске на землю возвращаемой капсулы. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2021, № 2 (52), с. 36–45.