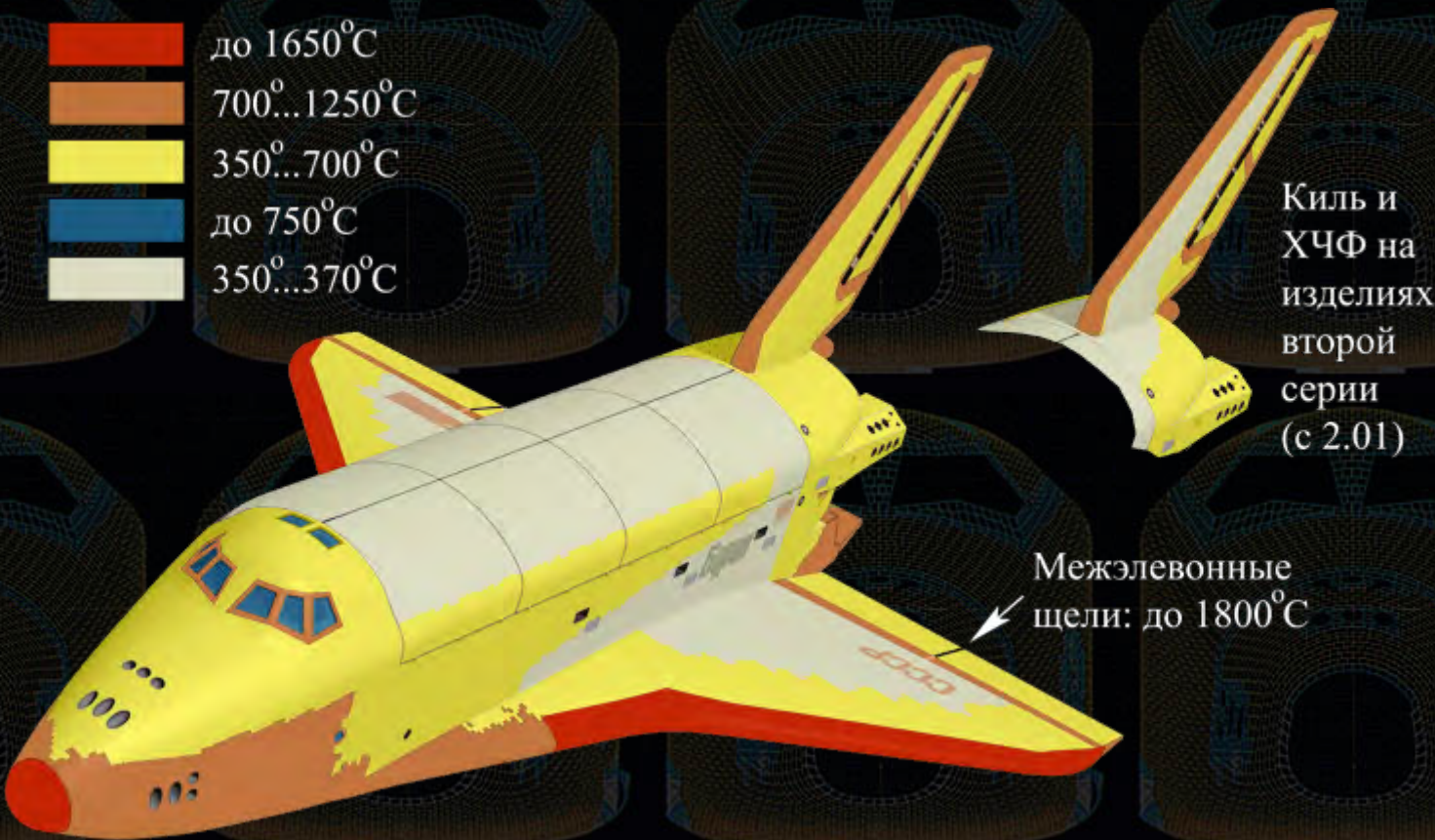
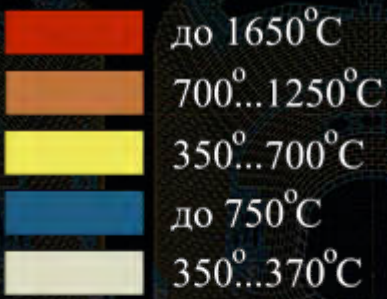


Элементы (типы) теплозащиты "Бурана"



до 1650°С

К числу наиболее ответственных компонентов теплозащиты "Бурана" относятся такие термостойкие элементы конструкции, как носовой обтекатель и секции передних кромок крыла из "углерод-углеродного" материала (УММ) "Гравимол" (название материала образовано из сокращения наименований разработчиков: НИИ "Графит", ВИАМ и НПО "Молния").

Характеристики материалов ГРАВИМОЛ и ГРАВИМОЛ-В		Значения
Плотность, г/см ³		1,85
Предел прочности, МПа		
	при изгибе	100
	при сжатии	90
	при сдвиге	20
	при растяжении	35
Коэффициент теплопроводности, Вт/(МхК)		25,0
Коэффициент теплового расширения в интервале температур 20...2000°С, град ⁻¹		(3...5)х10 ⁻⁶

Из материала Гравимол был изготовлен носовой обтекатель фюзеляжа. Гравимол-В использовался для изготовления секций носка крыла ([смотри раскрывающийся рисунок справа](#)). Материалы сходны по технологии изготовления и различались лишь тканым наполнителем [для носового кока (полусферическая деталь) более тонкий наполнитель ТКК-2, а для деталей кромки крыла наполнитель ТНУ-4]. Крепление агрегатов из УУМ осуществлялось тягами из жаропрочных сплавов с системой защитных покрытий.



Для изготовления УУМ применялись углеродные ткани и модифицированные фенольные смолы, подвергавшиеся пиролизу в процессе высокотемпературного передела. В последующем полуфабрикат УУМ проходил процессы пироуплотнения и боросилицирования. На внешнюю сторону агрегатов из УУМ наносилось внешнее противоокислительное покрытие на основе дисилицида молибдена.

Для предотвращения перетекания тепла от наиболее теплонагруженных агрегатов из УУМ к "холодной" силовой конструкции ОК, а также для компенсации температурного расширения УУМ были применены отсечные мосты из нитридной конструкционной керамики, которые устанавливались в узлах крепления углерод-углеродных агрегатов.

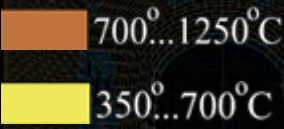
Для предотвращения контактного переноса тепла агрегаты из УУМ изолировались от ТЗП гарантированным зазором, заполненным термическим уплотнением на основе нитевидных кристаллов карбида кремния (для перекрытия лучистого теплового потока).



Обтекатель носка фюзеляжа



Секции передней кромки крыла



Нижняя поверхность и большая часть боковой поверхности планера "Бурана" в зонах с максимальными температурами аэродинамического нагрева 700...1250°С защищена многоразовой ТЗ в виде керамических плиток из волокон двуокиси кремния, имеющих белое или черное внешнее эрозионно-стойкое покрытие.

Разработка технологии, организация производства кварцевых волокон из отечественного сырья и теплозащитных материалов на их основе осуществлялась отечественными институтами и предприятиями. Для придания готовому ТЗП высокой стойкости к циклическим тепловым нагрузкам необходимо было использовать исходное сырье - жильный кварц, в котором содержание структурных и минеральных примесей было бы минимально (особенно щелочных и щелочноземельных), а наличие двуокиси

кремния составляло не менее 99,9 %, что в целом обеспечивало устойчивость к кристаллизации аморфной окиси кремния и предопределяло стабильность свойств готового материала при эксплуатации.

Для создания ТЗП, удовлетворяющих требованиям эксплуатации ОК "Буран", потребовалось впервые разработать технологию получения мелкодисперсного штапелированного кварцевого волокна диаметром 1...2 мкм. Исходя из оценки нагрузок, действующих на теплозащиту ОК, были сформулированы требования к ТЗП по пределу прочности при растяжении на уровне 0,2 МПа. По оценкам отечественных институтов значение эксплуатационной нагрузки на отрыв по поверхности теплозащиты достигало 0,02...0,025 МПа. Одновременно на теплозащиту действовали "отрывающие" инерционные нагрузки до 150 ед., вызванные колебаниями панелей конструкции, что приводило к отрывающему напряжению по месту соединения ТЗ с конструкцией порядка 0,02 МПа.

К основным факторам нагружения теплозащиты на отрыв относятся и местные прогибы поверхности конструкции изделия под нагрузкой. Ввиду высокой хрупкости кварцевой ТЗ даже незначительный прогиб металлической основы вызвал бы отрыв или разрушение плиток. Во избежание этого, а также для компенсации разницы в коэффициенте термического расширения (КТР) элементы ТЗ приклеивались к металлу через демпфер (фетровую подложку), снижающий эти нагрузки. Тем не менее, при прогибе 0,2 мм по длине элемента ТЗ 150 мм возникали напряжения отрыва до 0,02 МПа. Кроме того, неточности подгонки к металлу элементов ТЗ порождали после приклейки остаточные напряжения в подложке и элементе 0,02... 0,03 МПа. Практически несовпадения поверхностей элемента ТЗ и металла могли достигать 0,5 мм. Все эти нагрузки могли действовать как раздельно, так и вместе, поэтому суммарное значение напряжения на отрыв достигало 0,08 МПа.

Исходя из вышеуказанных требований, были разработаны и в дальнейшем освоены промышленностью два типа высокотемпературостойких теплозащитных материалов: ТЗМК-10 и ТЗМК-25.

Характеристики	Теплоизоляционный материал			
	ТЗМК-10	Li-900(США)	ТЗМК-25	Li-2200(США)
Плотность, г/см ³	0,15	0,144	0,25	0,35
Рабочая температура, °С	до 1250	до 1260	до 1250	до 1260
Теплопроводность, Вт/(МхК) (Р=1 атм, Т=20°С)	0,05	0,05	0,06	0,06
Предел прочности при растяжении, МПа	I* 0.20 II** 0.35	0.08 0.32	I* 0.40 II** 1.0	0.40 1.0
Предел прочности при сжатии, МПа	I* 0.40 II** 0.60	0.40 0.60	I* 1.20 II** 1.8	1.20 1.80
Коэффициент температурного расширения, 10 ⁻⁷ град ⁻¹	5,5+1,5	5,5	5,5+1,5	5,5
Динамический модуль упругости, МПа	I* 20...110 II** 120...320	50...100 150...300	60...270 300...600	100...250 350...650
Примечание:	*I - перпендикулярно плоскости **II - параллельно плоскости			

При разработке ТЗП к исходным компонентам предъявлялись требования не только по минимальному содержанию примесей, но и их совместимости с аморфным кварцем. При смешивании кварцевых волокон со связующим оно в основном концентрировалось в зоне контакта волокна и при последующем обжиге формировался пространственный каркас, объем которого более чем на 90% состоял из пустот.

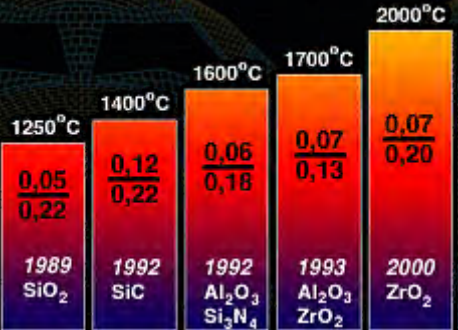
В результате была разработана уникальная технология и определены критерии оценки параметров технологического процесса, обеспечившие получение различных типов теплозащитных материалов со стабильными свойствами.

Каждый этап технологического процесса получения ТЗП контролировался. На стадии выходного контроля блок ТЗП проходил 100-процентный рентгеноконтроль на наличие посторонних включений и неравноплотности. Также оценивалась прочность каждого блока.

Как видно из таблицы, материал ТЗМК-10 превосходит зарубежный аналог Li-900 по пределу прочности при растяжении, а ТЗМК-25 легче Li-2200 на 30 %, что для космических объектов весьма существенно.

В тепловой защите ОК "Буран" использовались материалы на базе кварцевых и кремнеземных волокон. Дальнейшее повышение рабочей температуры подобных материалов требует замены волокон SiO₂ на более тугоплавкие Al₂O₃, ZrO₂, SiC, Si₃N₄.

Справа показано повышение рабочих температур теплозащитных материалов (волокнистая керамическая плитка) за счет замены волокон на более тугоплавкие (черные цифры - теплопроводность при 20°С/800°С, Вт/(м * град)

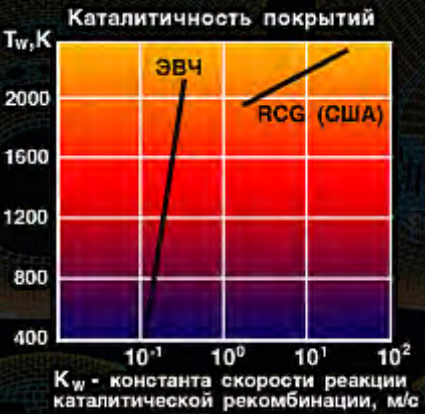


Внешнее эрозионное покрытие

Поскольку теплозащита работала в зоне воздействия высокотемпературного воздушного потока, который мог вызвать разрушение поверхности ТЗМ, каждый элемент снабжался наружным покрытием, которое выполняло следующие функции:

- обеспечение требуемых оптических характеристик для переизлучения теплового потока;
- эрозионная защита ТЗМ от воздействия встречного напора воздуха;
- защита высокогигроскопического ТЗМ от попадания воды и влаги.

По имеющемуся опыту экспериментальной отработки наружное эрозионно стойкое покрытие успешно справилось с первыми двумя задачами и только частично с третьей. Практически защитить ТЗК от попадания влаги очень сложно, так как при даже незначительных механических воздействиях в покрытии образовались трещины. Поэтому предохранение ТЗК от воды и влаги было обеспечено другими способами.



Одновременно решались задачи повышения стойкости внешнего покрытия к образованию трещин. За время разработки и производства ТЗК внешнее покрытие непрерывно совершенствовалось. В настоящее время применяют покрытия двух марок: "черные" ЭВЧ-4М1У-3 и ЭВЧ-6, имеющие высокую излучательную способность, в основном защищают нижнюю часть планера при спуске от наибольших тепловых нагрузок; "белое" - ЭВС-6 - в орбитальном полете ограничивает температуру нагрева от солнечного излучения верхней части планера. Покрытия имеют достаточную стойкость к трещинообразованию.

Представляет интерес серия эрозионно стойких покрытий типа ЭВЧ и ЭВС для плиточной теплозащиты, типа ЭВГС - для гибкой теплозащиты, типа ВРЧ и ВРС - для оперативного ремонта и восстановления работоспособности механически поврежденной теплозащиты без демонтажа ее с изделия. Указанные покрытия обеспечивают работоспособность теплозащиты при температурах до 1250°C и имеют уникальные свойства каталитичности.

Дальнейшая модификация покрытия оказалась малоперспективной, так как его стойкость к трещинообразованию под механическим воздействием определяется не только прочностью самого покрытия, но и жесткостью основания.

В последнее время были разработаны покрытия более ударостойкие, однако при наличии трещин они не защищали ТЗМ от влаги, а незащищенный ТЗМ мог впитать до 500... 700 % воды по весу. Поэтому были проведены работы по созданию состава для гидрофобизации материалов ТЗМК-10 и разработке защитных лаковых пленок на внешнем эрозионно стойком покрытии для заживления трещин и защиты от попадания атмосферных осадков.

Защита элемента от влаго- и водонасыщения

Для обеспечения гидрофобного эффекта плитка ТЗМ обрабатывалась раствором кремнийорганического полимера. Гидрофобизация проводилась при изготовлении ТЗК и выгорала при первом спуске ОК с орбиты в зонах, где температура покрытия превышала 450°C. Кроме того, на элементах большой толщины гидрофобизация всего объема не обеспечивалась, так как внешние слои, прилегающие к наружному покрытию, могли набирать влагу. Это приводило бы не только к неконтролируемому повышению веса, но и могло повлечь за собой разрушение поверхности покрытия при выходе на орбиту ОК вследствие интенсивного испарения влаги.

Первоначально была разработана водозащита в виде лаковой пленки на основе различных полимеров (для "черных" и "белых" покрытий), напыляемой на внешнюю и боковую поверхности плитки. Как показали испытания и эксплуатация, покрытие обеспечивает наземную водозащиту ТЗК.

Нанесение покрытий в зазоры между плитками трудно контролировать, что снижает надежность водозащиты боковых поверхностей, само покрытие - одноразовое, т.е. требует повторного нанесения после эксплуатации. Вместе с тем, благодаря электропроводности лакового покрытия достигалось снятие статического электричества с поверхности ОК.

Вторым этапом было решение вопроса межполетной объемной гидрофобизации, что обеспечивало защиту от влагонасыщения всего объема плитки ТЗП. Наиболее эффективным для этого было кремнийорганическое соединение - гексаметилдисилазан. Его введение в объем плитки ТЗМ привело к практически равномерному распределению по поверхности волокон и обеспечило гидрофобные свойства материала по всему объему плитки.

Гидрофобные свойства сохранялись при эксплуатации в наземных условиях после термостарения на воздухе при 80°C в течение 30 ч. Повторная гидрофобизация технологична и может быть осуществлена различными методами: газозащитным способом, диффузионным насыщением, а также шприцеванием.

Наиболее простые методы гидрофобизации - диффузионное насыщение и газозащитный способ, так как они не требуют технологического оборудования и не приводят к дополнительному повреждению эрозионно стойкого покрытия, как при шприцевании. При диффузионном насыщении во внутренний объем плитки ТЗМ вводились пары гексаметилдисилазана путем газозащитной диффузии через гидрофобный поясик. Для 100 % гидрофобизации ТЗМ объемом 100 м³ необходимо введение 160 дм³ гидрофобизатора с двух противоположных граней плитки с продолжительностью процесса 24 часа.

Как уже отмечалось, крепление элементов к обшивке осуществляется через демпфирующую подложку - фетр. В качестве исходного материала для подложки были использованы комбинации термостойких органических штапельированных волокон (марка готового материала АТМ-15ПК).

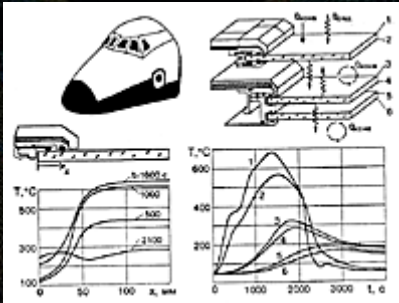
С целью придания водоотталкивающих свойств демпфирующая подложка (фетр) подвергалась гидрофобной обработке составом на основе кремнийорганической эмульсии и последующей калибровке при температуре 200°C.

Для обеспечения допустимой температуры на обшивке изделия в зазорах между элементами ТЗ-покрытия устанавливались вкладыши из многослойного фетрового материала на основе термостойких органических волокон, причем на внешнюю поверхность после гидрофобизации и калибровки наносилось эрозионно стойкое водозащитное покрытие из кремнийорганического полимера, который обеспечивал готовому вкладышу (АТМ-16ПКП) работоспособность при рабочей температуре 430°C в условиях одностороннего нагрева.

Производство ТЗМК-10/ТЗМК-25:

- исходное сырье (сверхчистый кварцевый песок) поставлялся с Кыштымского горнообогатительного комбината, полуфабрикат (сверхтонкое кварцевое волокно) выпускало НПО "Стеклопластик", а заготовки для плиток изготавливались в ОНПП "Технология".

до 750°C

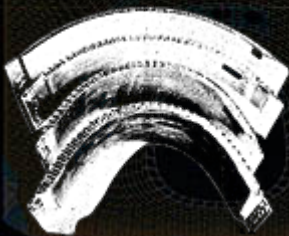


Иллюминаторы кабины экипажа, выдерживающие нагрев до 750°C, также можно считать элементами тепловой защиты многофункционального назначения. Они выполнены трехслойными: два наружных слоя выполняют функции тепловой и противометеорной защиты, внутренний - собственно герметичный иллюминатор. Слева на рисунке показано расчетное моделирование процессов радиационно-конвективного теплообмена в многостекольных иллюминаторах.

350°...370°C

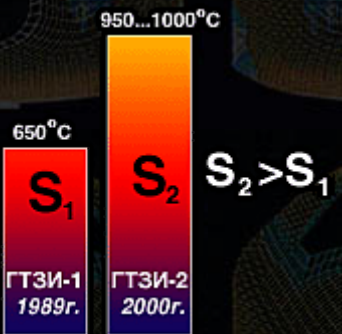
В менее нагреваемых зонах для температур до 350...370°C используется гибкая теплозащита из волокнистых органических материалов АТМ-19ПКП. Оно изготавливалось многослойным из термостойких органических волокон на иглопробивных машинах. Водозащитные свойства АТМ-19ПКП обеспечивались так же, как на материале АТМ-15ПК.

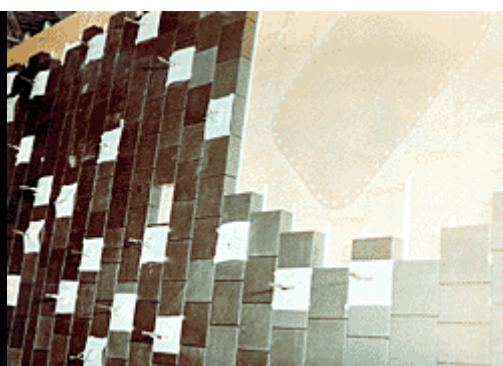
Работы по перспективной гибкой ТЗ для будущих АКС из определенным образом прошитых матов с внешним покрытием из ткани направлены на совершенствование технологии их получения.



К элементам системы теплозащиты "Бурана" относятся термостойкие экраны из металлических сотовых панелей с предельными температурами эксплуатации (слева), различные термостойкие уплотнения, а также панели абляционной теплозащиты для межэлевонной щели с термостойкостью до 1800°C.

Крепление теплозащиты





Для крепления слоев теплозащитного покрытия между собой (плитка + фетр) и всего элемента теплозащитного покрытия к обшивке (фетр + обшивка) использовался разработанный клей-герметик холодного отверждения Эластосил 137-175М на основе модифицированного кремнийорганического каучука. Он обеспечил надежное соединение слоев теплозащитного покрытия между собой и с обшивкой изделия в диапазоне температур от минус - 130 до + 300°C.

Термические уплотнения

Для предотвращения проникновения теплового потока между элементами ТЗ, а также в зонах разъемно-стыковых узлов с изменяющимися в процессе эксплуатации зазорами были применены гибкие термические уплотнения трех типов: жгутовые, щеточные и межплиточные забивки. В свою очередь, каждый тип включал несколько видов.

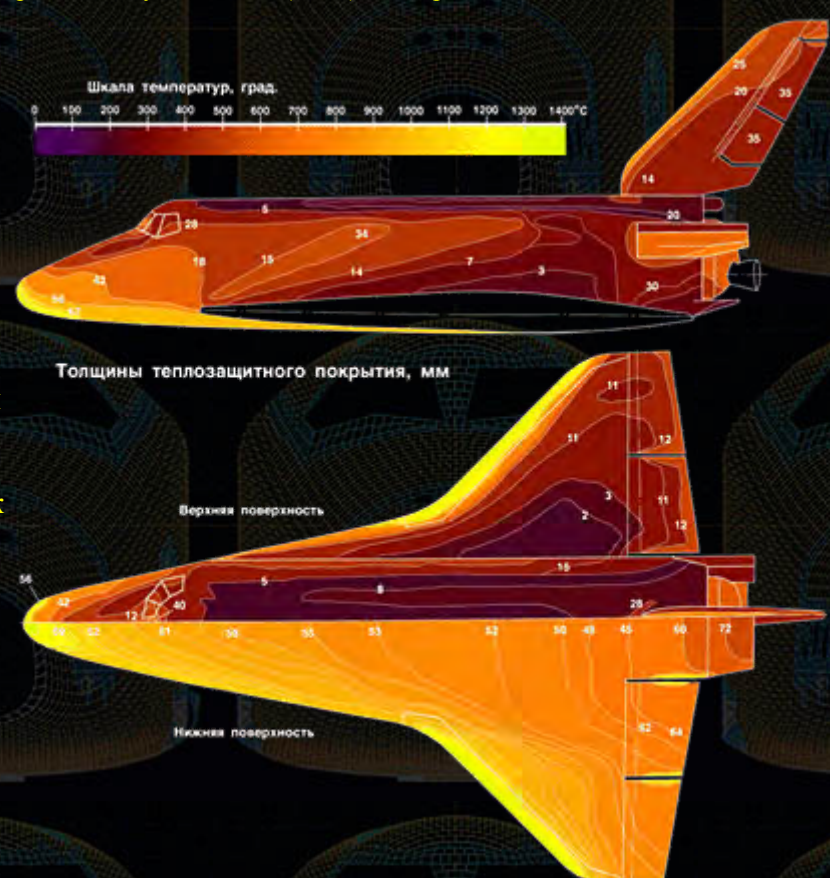
Щеточные высоковорсовые уплотнения (ВВУ) в основном использовались в зонах установки створок отсека полезного груза, щеточные низковорсовые уплотнения (НВУ) - в подвижных узлах вертикального оперения балансирующего щитка, элевона. Жгутовые уплотнения ШТКВ-10, ШТКВ-20 на основе штапелированных кварцевых волокон с оплеткой из непрерывных кварцевых нитей использовались для уплотнения зазоров в местах установки створок и люков различного назначения. Жгутовые уплотнения ШТКВ-15 на основе нитевидных кристаллов карбида кремния с оплеткой из непрерывных неорганических нитей были применены в наиболее теплонагруженных зонах, в частности для уплотнения зазора стыка отдельных секций носка крыла, а также в зоне стыка агрегатов - УУМ с теплозащитными элементами.

Зазоры между отдельными наиболее теплонапряженными элементами ТЗП заполнялись специальным холстом из кварцевого волокна, причем разработанная технология позволяла производить ремонт разрушенных участков уплотнения путем удаления их и замены на новые.

При зазорах между элементами ТЗП более 5 мм использовались межплиточные термические уплотнения (МТУ) из неорганических волокон.

Справа на схеме приведены расчетные значения толщин теплозащиты, обеспечивающие на момент посадки значение температуры металлической обшивки планера из алюминиевого сплава Д-16Т не выше 160°C. Толщины указаны в миллиметрах и нанесены на [карту максимальных температур](#).

Фактические толщины теплозащиты выбираются с учетом дополнительных требований к гладкости внешней поверхности и других технологических ограничений, поэтому они могут несколько отличаться от теоретических обычно в большую сторону.



Различные элементы (типы) теплозащиты "Бурана" можно подробно рассмотреть на примере головной машины второй серии - [изделии N 2.01](#)



Web-master: © [Валентин Юсупович](#) 1998-2006
E-mail: buran@buran.ru
DVD version