

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИМЕЮТ ЗНАЧЕНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЕ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

STRUCTURE AND PROPERTIES MATTER

MODERN APPROACHES TO THERMAL PROTECTION OF UNMANNED
AERIAL VEHICLES

Павел ИВАНИШИН, начальник научно-исследовательского отдела РПУП «Завод точной электромеханики», кандидат технических наук

Валерий ЛУГИН, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела РПУП «Завод точной электромеханики», кандидат химических наук

Елена АЛЕЙНИКОВА, научный сотрудник научно-исследовательского отдела РПУП «Завод точной электромеханики», аспирант

Pavel IVANISHIN, Chief of Research Department of RPUE Precision Electromechanics Plant, Candidate of Technical Sciences

Valery LUGIN, Senior Research Scientist of the Research Department of RPUE Precision Electromechanics Plant, Candidate of chemical sciences

Elena ALEYNIKOVA, Research Associate of the Research Department of RPUE Precision Electromechanics Plant, postgraduate student

Условия эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БЛА) создают серьезные проблемы разработчикам в вопросах обеспечения работоспособности бортовой аппаратуры в экстремальных условиях ее эксплуатации. Одной из них является аэродинамический нагрев наружных поверхностей, приводящий к перегреву бортовой аппаратуры БЛА.

В данной статье рассмотрены традиционные подходы к разработке и наземной экспериментальной отработке наружного теплового покрытия высокоскоростного БЛА, которые могут быть применены к широкому классу беспилотников самолетного и ракетного типов.

The operating conditions of unmanned aerial vehicles (UAVs) pose significant challenges for designers in ensuring the functionality of on-board equipment in extreme environments. One such challenge is aerodynamic heating of the outer surfaces, which leads to increased temperatures affecting the on-board equipment of UAVs.

This article discusses traditional approaches to the development and ground-based experimental testing of external thermal coatings for high-speed UAVs, applicable to a wide range of both aircraft-type and rocket-type UAVs.

Для защиты элементов конструкций, работающих в условиях повышенных температур и воздействия высокотемпературных газовых потоков, применяются наружные теплозащитные покрытия (ТЗП). От их эффективности зависит надежность и продолжительность эксплуатации соответствующих изделий. Применение ТЗП способно не только улучшить отдельные эксплуатационные характеристики конструкций (техники), но и защитить изделия от воспламенения.

Дело в том, что температура на внешних поверхностях БЛА при их движении на высоких скоростях в плотных слоях атмосферы за счет аэродинамического нагрева достигает нескольких сотен, а иногда и тысяч градусов, значительно превышая не только температуры разложения всех органических веществ, но и температуры изменения физического состояния многих неорганических огнеупорных материалов. Эксплуатация изделий авиационной, ракетной и космической техники возможна только благодаря

External thermal protective coatings (TPCs) are essential for safeguarding structural elements exposed to elevated temperatures and high-temperature gas flows. The reliability and service life of UAVs depend significantly on the effectiveness of these coatings. By using TPCs, it is possible not only to enhance specific performance characteristics of UAV structures but also to protect them from ignition.

During high-speed flight in dense atmospheric layers, the aerodynamic heating of UAVs' external surfaces can reach several hundred to thousands of degrees Celsius, far exceeding not only the decomposition temperatures of organic substances but also the temperatures at which many inorganic refractory materials undergo physical state changes. The operation of aircraft, rocket, and space technologies is therefore feasible only through the application of various protective methods, equipment, and materials, including TPCs.

The most effective way to manage the thermal load and temperature gradient between the hot environment and UAV

использованию различных методов, защитных средств и материалов, в том числе и ТЗП.

Наиболее эффективно тепловой и температурный перепад между горячей средой и конструкцией достигается за счет разрушающихся (абляционных) материалов. После поглощения тепла в них проходят многочисленные энергоемкие эндотермические превращения. Взаимодействие высокоскоростного потока с абляционными теплозащитными материалами (ТЗМ) сопровождается уносом его массы. Происходит поглощение и рассеивание тепла с автоматическим регулированием температуры абляции, что значительно ограничивает тепловой поток, поступающий к защищаемой конструкции.

И хотя абляционная система теплозащиты в весовом отношении весьма эффективна, однако она является одноразовой. Работоспособность абляционных ТЗМ исчисляется минутами, а иногда и секундами. Причем при длительном воздействии теплового потока эффективность ТЗМ снижается, увеличиваясь с повышением температуры рабочей среды.

Сейчас в качестве основных абляционных теплозащитных материалов используются композиции на основе полимеров, представляющие, как правило, сложные многокомпонентные системы. Не все физико-химические превращения в ТЗМ и не все компоненты, входящие в его состав, одинаково влияют на суммарные характеристики процесса разрушения — скорость разрушения или температуру разрушающейся поверхности. Для обеспечения необходимой эрозионной стойкости, теплозащитных свойств, механической прочности и сохранения этих свойств в течение длительного периода важную роль играют наполнители, способствующие изменению физико-механических, теплофизических и других свойств композиционных материалов.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке ТЗМ сравнительно низкой плотности ($<1000 \text{ кг/м}^3$). Эти работы ведутся как в сфере получения пенистых материалов с применением химических пенообразователей, так и использования легких наполнителей, главным образом фенолоформальдегидных, стеклянных, кремнеземных и других микросфер, а также полых волокон и продуктов переработки древесины. Материалы, содержащие микросферы, получили название «синтактных пен».

Следует отметить, что продукты первого типа значительно уступают синтактным пенам по способности противостоять высокотемпературному аэродинамическому нагреву. Проблема снижения плотности ТЗМ стоит очень остро, так как с ней связана проблема увеличения полезного груза авиационного изделия. Но решение, позволяющее создать теплозащитное покрытие низкой плотности, найдено.

Исходя из требований, предъявляемых к теплозащитному покрытию, в качестве полимерного связующего для создания ТЗП была выбрана эпоксиновая смола — смесь смолы на основе диглицидилового эфира бисфенола А со смолой диглицидилового эфира бисфенола F. В смоле на основе диглицидилового эфира бисфенола F атомы фтора замещают атомы водорода в бензольных кольцах бисфенола А. Именно атомы фтора повышают температуру стеклования, реакционную способность и адгезию к материалам различной химической природы данного вида смолы. Для отверждения композиции использовали отвердитель типа ТЭТА (триэтилентетрамин).

Теплоизолирующими и армирующими компонентами для создания высокотемпературного композиционного теплоизоляционного покрытия (ТИП) стали полые стеклянные микросферы и углеродные волокна, обладающие отличной термостойкостью и устойчивостью к тепловому напряжению в материалах, подвергаемых резким изменениям температуры. Такие микросферы дают возможность производства продуктов с низкой плотностью с улучшенными свойствами и характеристиками, поскольку обладают плотностью приблизительно 1/5 большинства терморезистивных смол. При равных значениях массы, полые микросферы занимают почти в пять раз больше объема, чем смола, позволяя снижать массу соединения, количество летучих органических веществ и стоимость. Они также обеспечивают другие полезные свойства, такие как повышенная ударная прочность, улучшенные теплоизоляционные характеристики и лучшее сопротивление тепловому удару.

Принцип работы ТЗП, наполненного полыми микросферами, заключается в создании ими теплового барьера: чем выше процентное

structures is through the use of degradable (ablative) materials. These materials absorb heat and undergo multiple energy-intensive, endothermic transformations. The interaction of a high-speed flow with ablative thermal protective materials (TPMs) leads to the gradual removal of the material's mass. This process absorbs and dissipates heat while automatically regulating the ablation temperature, which limits the heat flow entering the protected structure.

Although ablative thermal protection systems are highly effective in terms of weight, they are single-use. The operational lifespan of ablative TPMs is measured in minutes, and sometimes even seconds. Furthermore, with prolonged exposure to heat flux, the effectiveness of TPMs decreases, and this decline accelerates as the temperature of the working environment increases.

Currently, polymer-based composites, typically complex multicomponent systems, serve as the main ablative thermal protective materials. However, not all physical and chemical transformations in these TPMs and not all components of their composition have the same impact on the destruction process, including destruction rate and surface temperature. Fillers play a vital role in ensuring erosion resistance, thermal protection, mechanical strength, and the retention of these properties over extended periods. They also contribute to alterations in the physical, mechanical, thermal, and other properties of composite materials.

Currently, considerable attention is focused on developing low-density thermal protective materials ($<1,000 \text{ kg/m}^3$). This research includes efforts to produce foam materials using chemical foaming agents and incorporating lightweight fillers, such as phenol-formaldehyde, glass, silica microspheres, hollow fibres, and wood by-products. Materials containing microspheres are known as syntactic foams.

It is worth noting that conventional foam materials are significantly inferior to syntactic foams in their resistance to high-temperature aerodynamic heating. Reducing the density of TPMs is a critical challenge because it directly impacts the payload capacity of an aircraft. However, recent developments have led to the creation of low-density thermal protective coatings that help address this issue effectively.

Based on the requirements for thermal protective coatings, an epoxy resin—a mixture of resin based on diglycidyl ether of bisphenol A and diglycidyl ether of bisphenol F—was chosen as the polymer binder for the thermal protective coating. In the diglycidyl ether of bisphenol F, fluorine atoms replace hydrogen atoms in the benzene rings of bisphenol A. These fluorine atoms increase the glass transition temperature, reactivity, and adhesion of this resin type to materials of various chemical compositions. The resin was cured using a triethylenetetramine (TETA) hardener.

The thermal insulation and reinforcing components used in creating a high-temperature composite thermal insulation coating are hollow



Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение образца теплозащитного материала на основе смолы диглицидилового эфира бисфенола А/Ф с отвердителем ТЭТА

Fig. 1. Electron microscopic image of a thermal protective material sample based on bisphenol A/F diglycidyl ether resin with TETA hardener.

наполнение полыми стеклянными микросферами, тем меньше объемный вес и меньше значение главного параметра теплоизоляционного покрытия — коэффициента теплопроводности.

Второй компонент наполнителя — углеродные волокна — по сравнению с обычными конструкционными материалами (например алюминием или сталью) обладают некоторыми весьма полезными свойствами. Они исключительно термостойки: в инертных средах или в вакууме до 3000 °С, на воздухе до 450 °С. По термостойкости углеродные волокна превосходят все известные жаростойкие волокнистые материалы. Кроме того, углеродное волокно и композиты на его основе имеют очень низкий, практически нулевой коэффициент линейного расширения, что делает углеродный компонент незаменимым в некоторых специальных областях применения.

Для исследования микроструктуры и состава всех элементов изделия был применен метод сканирующей электронной микроскопии с электронно-зондовым энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным химическим анализом (SEM+EDX). При этом использовали сканирующий электронный микроскоп JSM-5610LV с системой химического анализа JED-2201, JEOL.

Структура оптимизированного по составу, виду и количеству компонентов высокотемпературного композиционного ТИП на основе диглицидилового эфира бисфенола А/Ф с отвердителем ТЭТА приведена на рис. 1. В качестве теплоизоляционных и армирующих наполнителей были использованы стеклянные микросферы (К-20), материал углеродный измельченный (М).

Анализ микроструктуры полученного экспериментального образца ТЗП показывает, что покрытие представляет собой полимерную основу, наполненную полыми микросферами с преимущественным диаметром 20–100 мкм и армированную углеродными волокнами с преимущественным диаметром 5–7 мкм. Следует отметить достаточно однородное распределение наполнителей, большой процент целых полых микросфер и хорошее переплетение армирующих углеродных волокон.

Определение плотности данного вида композиционного ТЗП весовым методом показывает, что покрытие имеет плотность 0,6–0,7 г/см³.

Содержание минеральных наполнителей, температуры плавления и термического разложения теплозащитного покрытия определяли методом термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии (TGA/DSC) (термоаналитическая система TGA/DSC-1/1600 HF, Mettler Toledo Instruments).

Результаты термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии полученного покрытия типа 2 при нагреве до 100 °С приведены на рис. 2.

glass microspheres and carbon fibres, chosen for their excellent thermal stability and resistance to thermal stress in materials subjected to rapid temperature changes. These microspheres enable the production of low-density products with enhanced properties, as their density is approximately one-fifth that of most thermosetting resins. At equal mass, hollow microspheres occupy nearly five times the volume of resin, which reduces the weight of the compound, the amount of volatile organic compounds, and production costs. Additionally, they offer other valuable properties, such as increased impact strength, improved thermal insulation, and enhanced resistance to thermal shock.

The principle of operation for a thermal protective coating filled with hollow microspheres is based on the formation of a thermal barrier. The higher the percentage of hollow glass microspheres in the coating, the lower the bulk density and thermal conductivity coefficient, which is a critical parameter for heat insulation.

The second component of the filler—carbon fibres—provides valuable properties compared to conventional structural materials like aluminium or steel. Carbon fibres are highly thermal resistant, withstanding temperatures up to 3,000 °C in inert environments or vacuum, and up to 450 °C in air. In terms of heat resistance, carbon fibres surpass all known thermal resistant fibrous materials. Additionally, carbon fibre and its composites exhibit a very low, nearly zero coefficient of linear expansion, making it indispensable in specific applications.

The microstructure and elemental composition of all product components were examined using scanning electron microscopy (SEM) combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). A JSM-5610LV scanning electron microscope equipped with a JED-2201 energy-dispersive X-ray analysis system, both from JEOL, was used for this study.

The structure of the high-temperature composite thermal insulation coating based on diglycidyl ether of bisphenol A/F with TETA hardener and optimised in terms of composition, type, and quantity of components, is shown in Fig. 1. Glass microspheres (K-20) and ground carbon material (M) were used as thermal insulation and reinforcing fillers.

Microstructural analysis of the experimental thermal protective coating sample reveals a polymer matrix filled with hollow microspheres predominantly 20–100 µm in diameter and reinforced with carbon fibres predominantly 5–7 µm in diameter. The fillers are distributed quite uniformly, with a high percentage of intact hollow microspheres, and the reinforcing carbon fibres are well-interwoven.

Density determination of this composite thermal protective coating by the gravimetric method indicates a density of 0.6–0.7 g/cm³.

Thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry (TGA/DSC) were employed to analyse the thermal protective coating, specifically to determine the content of mineral fillers, as well as the melting temperatures and thermal

Результаты термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии ТЗП показывают, что термическое разложение полимерной основы теплозащитного покрытия, сопровождающееся потерей массы, начинается при температуре около 165 °С. Потеря массы идет достаточно равномерно до температуры около 316 °С, при этом теряется всего 5,7 % массы покрытия. Затем начинается стадия с более интенсивной потерей массы с максимальной скоростью при температуре 356 °С. При нагреве до 600 °С теряется до 73 % от исходной массы покрытия.

Изучение теплофизических характеристик экспериментальных образцов теплоизоляционных покрытий (далее — исследования ТФХ) осуществляли методом лазерной вспышки с использованием прибора для определения теплопроводности и температуропроводности LFA 457 MicroFlash. Диск помещали в рабочую камеру прибора, где нижняя поверхность образца нагревалась коротким лазерным импульсом. Изменение температуры на верхней поверхности образца регистрировалось с помощью инфракрасного детектора. Результаты исследований ТФХ приведены на рис. 3.

В результате исследования ТФХ экспериментальных образцов теплоизоляционных покрытий установлено, что коэффициент температуропроводности образца в интервале температур 50–250 °С незначительно изменяется в диапазоне 0,12–0,15 мм²/с (рис. 3). При дальнейшем увеличении температуры до 350 °С указанный коэффициент уменьшается до 0,05 мм²/с.

Аналогичным образом изменяется коэффициент теплопроводности, значения которого составляют 0,10–0,14 Вт/м·К в интервале температур 50–250 °С и резко уменьшается до 0,04 мм²/с.

Резкое уменьшение коэффициентов температуропроводности и теплопроводности может быть связано с началом интенсивной термодеструкции материала ТЗП, приводящей к расслоению и образованию внутренних полостей в материале, которые обладают более низкой температуропроводностью и теплопроводностью. Данные результаты согласуются с результатами комплексного термического анализа (рис. 2).

decomposition temperatures of its components. These analyses were conducted using a TGA/DSC-1/1600 HF thermoanalytical system from Mettler Toledo Instruments.

The thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry results for the obtained Type 2 coating, heated to 100 °C, are shown in Fig. 2.

The results of thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry of the thermal protective coating indicate that thermal decomposition of the polymer base, accompanied by mass loss, begins at approximately 165 °C. Mass loss occurs relatively uniformly up to about 316 °C, with only 5.7 % of the coating mass lost. Subsequently, a phase of more intense mass loss begins, reaching its maximum rate at 356 °C. By 600 °C, up to 73 % of the initial coating mass is lost.

The thermal properties of experimental thermal insulation coating samples were analysed using the laser flash method on the LFA 457 MicroFlash device, which measures thermal conductivity and thermal diffusivity. Disk-shaped samples were placed in the device's chamber, where the lower surface of each sample was exposed to a brief laser pulse. An infrared detector recorded the temperature change on the upper surface of the sample. The thermo-physical properties obtained are shown in Fig. 3.

The study found that the thermal diffusivity of the sample remains relatively stable within the range of 0.12–0.15 mm²/s between 50 °C and 250 °C (Fig. 3). As temperature increases further to 350 °C, this coefficient decreases to 0.05 mm²/s.

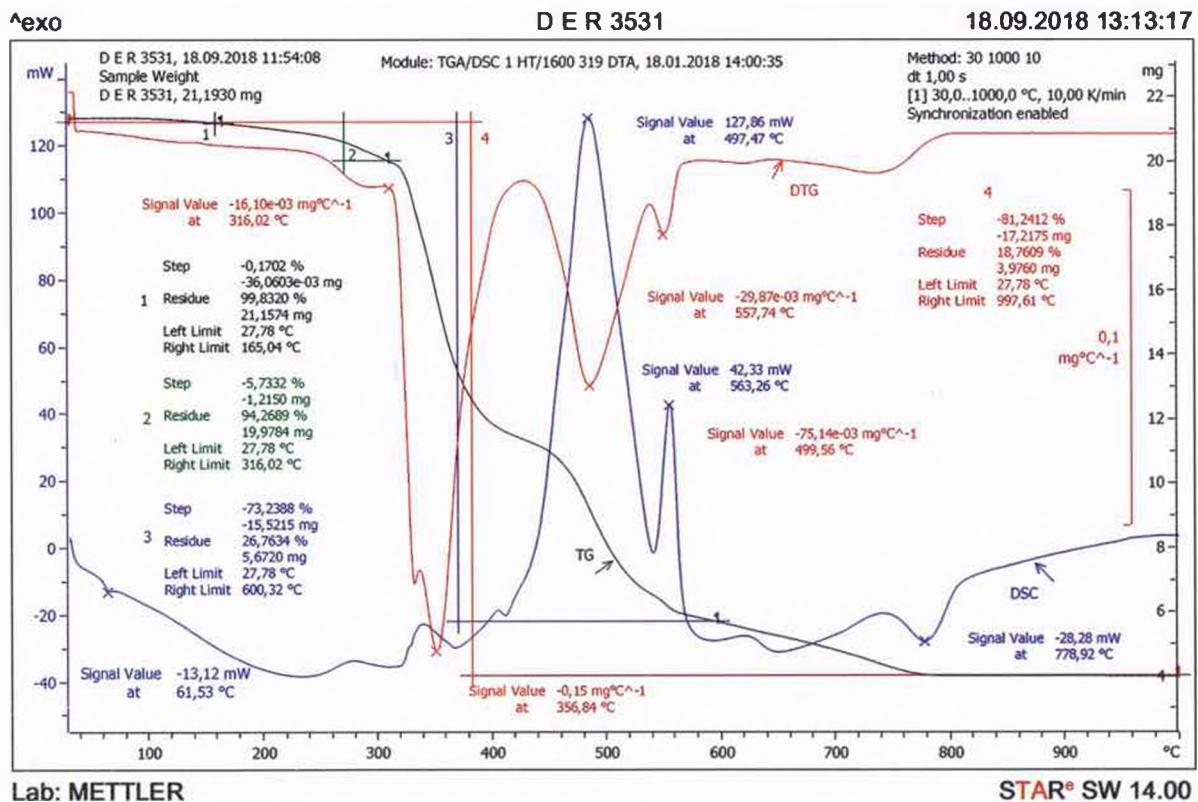


Рис. 2. Результаты термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии ТЗП на основе смолы диглицидилового эфира бисфенола А/Ф

Fig. 2. Results of thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry of the thermal protective coating based on bisphenol A/F diglycidyl ether resin.

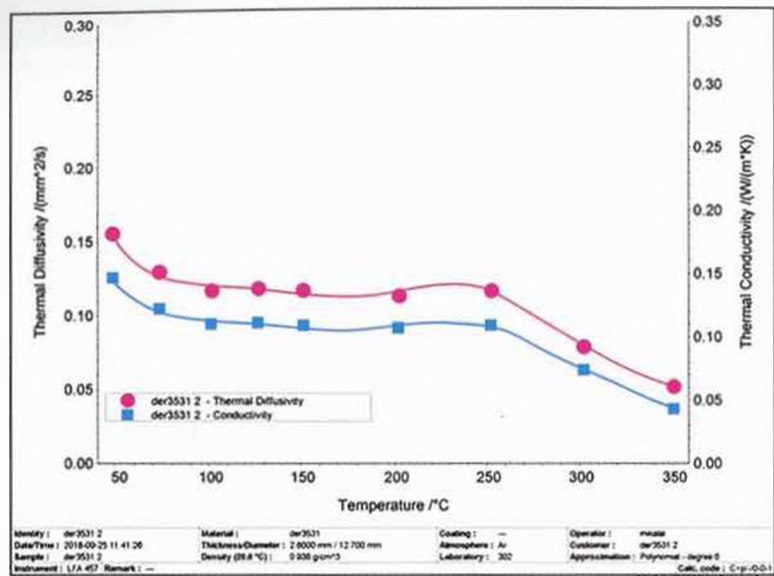


Рис. 3. Изменение температуропроводности (красная линия) и теплопроводности (синяя линия) при нагреве

Fig. 3. Change in thermal diffusivity (red line) and thermal conductivity (blue line) with increasing temperature.

Поскольку, как показали проведенные исследования, активная термодеструкция ТЗП на основе эпоксидных смол происходит при температурах 280–350 °С, то с целью достижения необходимых критических температур изделия и для повышения общей термостойкости на поверхности основного слоя ТЗП целесообразно формирование дополнительного энергопоглощающего абляционного покрытия с большей температурной стойкостью.

В качестве полимерного связующего для создания дополнительного наружного слоя с большей температурной стойкостью была использована полиметилфенилсилоксановая смола, наполненная алюминиевой пудрой.

Структура поверхности дополнительного наружного теплозащитного слоя на силоксановой основе, наполненного алюминиевой пудрой, приведена на рис. 4.

Структура покрытия представляет собой полимерную основу, наполненную частицами алюминия чешуйчатой структуры с преимущественными размерами 5–50 мкм. Результаты анализа отражены в табл. 1 и на рис. 5–6.



Рис. 4. Структура дополнительного наружного теплозащитного слоя на силоксановой основе, наполненного алюминиевой пудрой

Fig. 4. Structure of an additional external thermal protective siloxane-based layer, filled with aluminum powder.

The thermal conductivity coefficient follows a similar trend, with values of 0.10–0.14 W/m·K between 50 °C and 250 °C, dropping sharply to 0.04 W/m·K at higher temperatures.

This pronounced reduction in thermal diffusivity and thermal conductivity may be attributed to the onset of intense thermal degradation of the thermal protective coating material, leading to delamination and the formation of internal cavities, which have lower thermal conductivity and diffusivity. These results align with the comprehensive thermal analysis findings (Fig. 2).

As the analysis indicates, active thermal degradation of epoxy resin-based TPCs occurs at temperatures between 280 °C and 350 °C. To achieve the required critical temperatures and improve the overall heat resistance, it is advisable to apply an additional ablative coating with higher temperature resistance over the primary layer of TPCs.

Табл. 1. Элементный состав наружного теплозащитного слоя образца ТЗП

Table 1. Elemental composition of the external thermal protective layer of the sample coating.

Элемент / Element	Масс. % / Mass %
C	38.03
O	13.04
Mg	1.63
Al	30.44
Si	13.02
K	1.68
Fe	1.76
Прочие	0,4 %
Total	100.00

A polymethylphenylsiloxane resin filled with aluminium powder was selected as the polymer binder for creating this additional external layer with enhanced thermal resistance.

The surface structure of the additional external thermal protective siloxane-based layer, filled with aluminium powder, is shown in Fig. 4.

The coating structure consists of a polymer matrix filled with aluminium particles exhibiting a flaky structure, with predominant particle sizes ranging from 5 to 50 μm. Analytical results are presented in Table 1 and Figs. 5–6.

The results of thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry of the thermal protective coating indicate that the thermal decomposition of the polymer base of the coating, composed of polyorganosiloxane resin, begins at approximately 230 °C. Mass loss occurs relatively uniformly up to around 565 °C, with only 19.1% of the coating’s mass being lost. In the temperature range of 565 °C to 645 °C, a phase of mass gain is observed due to the oxidation of aluminium, leading to the formation of refractory aluminium oxide. Between 653 °C and 660 °C, an intense endothermic peak is observed, corresponding to the melting of aluminium, which is accompanied by significant thermal energy absorption.

Результаты термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии ТЗП показывают, что термическое разложение полимерной основы теплозащитного покрытия на основе полиорганосилоксановой смолы начинается при температуре около 230 °С. Потеря массы идет достаточно равномерно до температуры около 565 °С, при этом теряется только 19,1 масс. % покрытия. Затем в интервале 565 °С — 645 °С начинается стадия увеличения массы покрытия за

Due to their high thermal conductivity, the aluminium particles help dissipate heat from the coated substrate. Additionally, as the resin oxidises, the aluminium particles fuse with it, forming a refractory ceramic layer with durable metal-siloxane bonds.

Heat transfer studies of thermal protective coatings were conducted by measuring the temperature gradient across the thickness of the thermal protective material applied to a metal substrate. The surface layer of the coating was heated using a burner flame at a temperature approximating the maximum possible operational temperature for the coating.

To simulate potential operational conditions, samples of the thermal protective coating were applied to metal disks made of carbon structural steel, measuring 50±1 mm in diameter and 3 mm in thickness (Fig. 9). The coating was applied at a thickness of 2.5 mm. For comparison, an uncoated metal substrate was also tested, with the rate of temperature increase on its reverse side recorded (Fig. 8).

The efficiency of the thermal protective coating is evaluated based on the time required to reach a specific temperature or the maximum temperature achieved on the inner surface within a fixed period.

Graphs illustrating temperature rise on the reverse surface of metal disks are shown in Fig. 10.

An analysis of the temperature rise graph shows that an uncoated metal disk heats up to 270 °C in 60 seconds, 360 °C in 120 seconds, and 420 °C in 180 seconds.

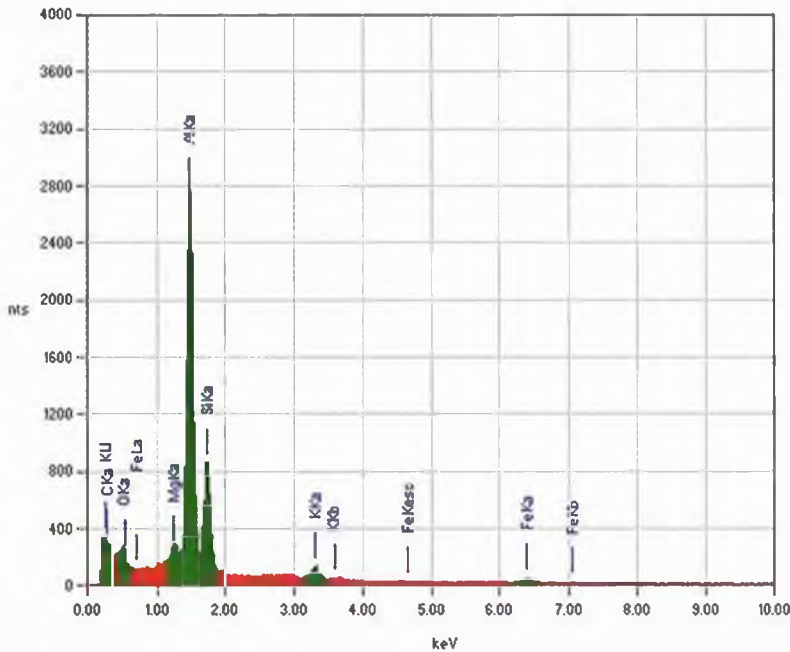
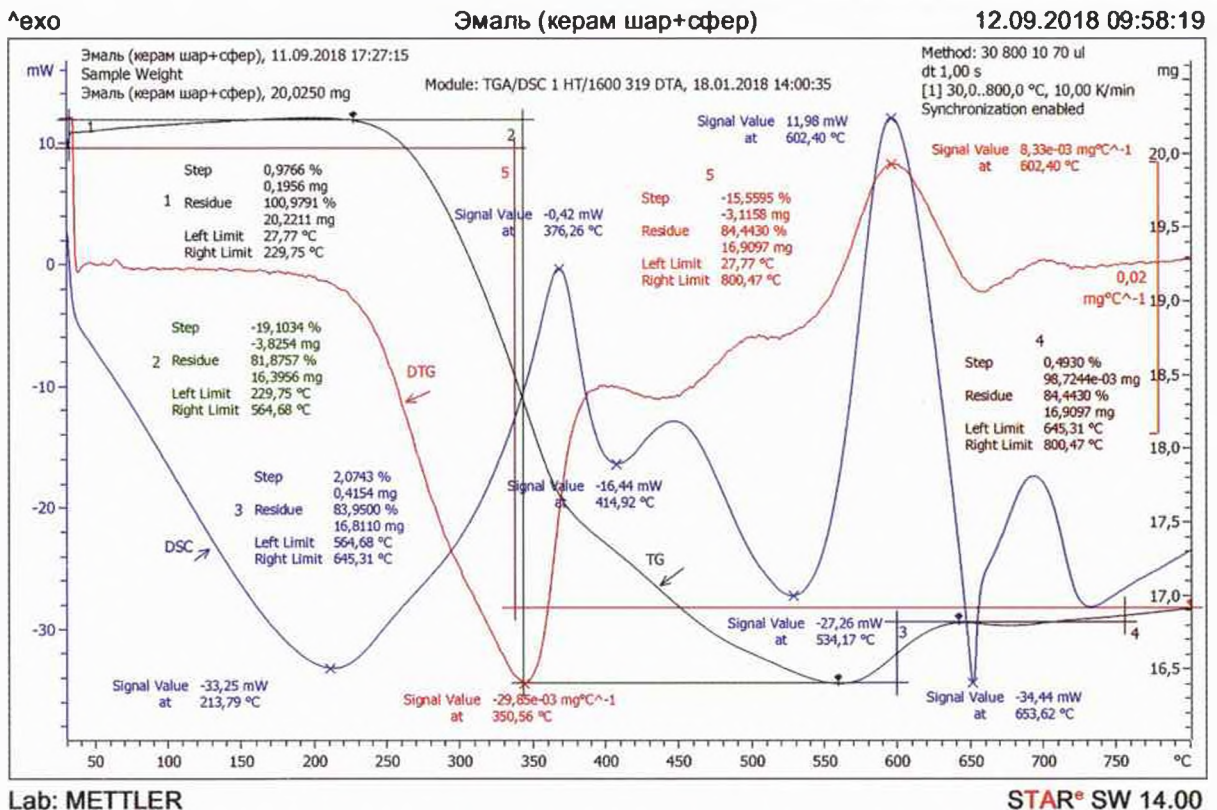


Рис. 5. Результат электронно-зондового химического анализа на наружного теплозащитного слоя

Fig. 5. Results of electron probe chemical analysis of the external thermal protective layer.



Lab: METTLER

STAR[®] SW 14.00

Рис. 6. Результаты термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии ТЗП на основе полиорганосилоксановой смолы, наполненной алюминиевой пудрой

Fig. 6. Results of thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry of the thermal protective coating based on polyorganosiloxane resin filled with aluminium powder.

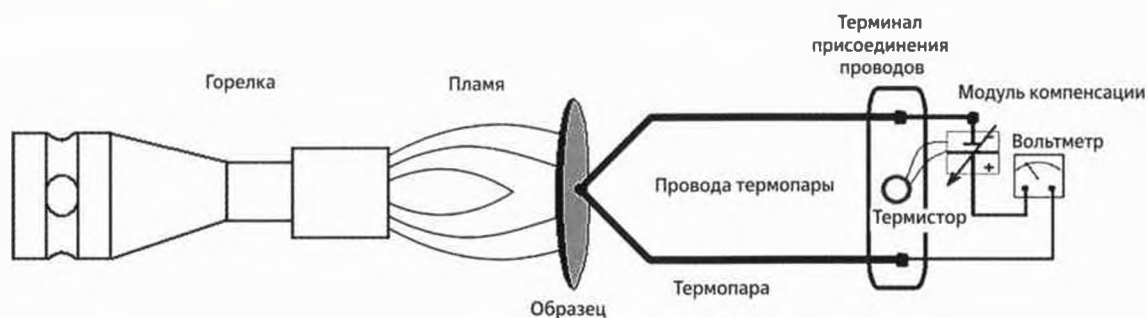


Рис. 7. Схема установки по измерению теплозащитных свойств покрытий

Fig. 7. Schematic of the setup for measuring the thermal protection properties of coatings.

счет окисления алюминия, с образованием тугоплавкого оксида алюминия. В области температур 653–660 °С наблюдается интенсивный эндотермический пик, соответствующий плавлению алюминия и сопровождающийся большим поглощением тепловой энергии.

Благодаря своей высокой теплопроводности частицы алюминия отводят тепло от покрытого субстрата. Кроме того, по мере окисления смолы частицы алюминия будут сплавляться с нею, образуя тугоплавкое керамическое покрытие с прочными связями — металл-силоксан.

Исследования теплопередачи теплозащитных покрытий производились путем определения перепада температур между поверхностью теплозащитного материала, нанесенного на металлическую подложку, в направлении его толщины при разогреве поверхностного слоя покрытия пламенем горелки с температурой, близкой к максимально возможной при эксплуатации покрытия.

Для проведения испытаний разработанных теплоизоляционных покрытий в условиях, приближенных к возможным эксплуатационным, были изготовлены образцы покрытий, нанесенные на металлический диск из углеродистой конструкционной стали диаметром 50±1 мм и толщиной 3 мм (рис. 9). Толщина теплозащитного покрытия составляла 2,5 мм. В качестве объекта сравнения использовали металлическую подложку без теплоизоляционного покрытия, на обратной стороне которой также регистрировали скорость подъема температуры (рис. 8).

Эффективность теплозащитного покрытия определяется по времени достижения определенной температуры либо по максимальной температуре внутренней стороны за фиксированное время.

A metal disk with an epoxy resin-based thermal protective coating heats up to 105 °C in 60 seconds, 145 °C in 120 seconds, and 150 °C in 180 seconds.

A metal disk with an epoxy resin-based thermal protective coating with an additional layer based on polyorganosiloxane resin filled with aluminium powder heats up to 50 °C in 60 seconds, 75 °C in 120 seconds, and 90 °C in 180 seconds.

These findings indicate that the polyorganosiloxane layer, approximately 100 μm thick and filled with aluminium powder, enhances thermal protection and slows the degradation rate of the main thermal protective layer. This additional protection is achieved due to the high heat resistance of the polyorganosiloxane resin and the extra heat absorption required for heating, melting, and oxidising the aluminium particles. Under high-speed operating conditions, the thermal protective effectiveness of this layer increases due to the ablation effect.

Using this type of 2.5 mm thick thermal protective coating can reduce surface and internal temperatures of unmanned aerial vehicles by 300–800 °C compared to uncoated products.



Изображение поверхности металлического диска с нанесенным ТЗП образца № 1 (вид сверху)

Top-view image of the surface of a metal disk with thermal protective coating sample No. 1.

Изображение поверхности металлического диска с нанесенным ТЗП образца № 1 после проведения испытаний (вид сверху)

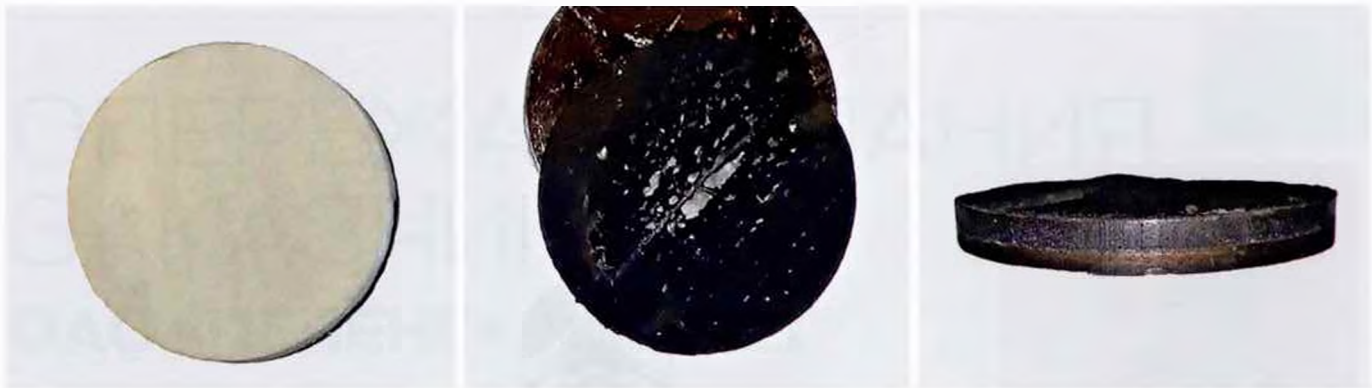
Top-view image of the surface of a metal disk with thermal protective coating sample No. 1 after testing.

Изображение поверхности металлического диска с нанесенным ТЗП образца № 1 после проведения испытаний (вид сбоку)

Side-view image of the surface of a metal disk with thermal protective coating sample No. 1 after testing.

Рис. 8. Испытание ТЗП образца № 1 на основе смолы диглицидилового эфира бисфенола А/Ф с отвердителем ТЭТА

Fig. 8. Testing of thermal protective coating sample No. 1, based on bisphenol A/F diglycidyl ether resin cured with TETA hardener.



Изображение поверхности металлического диска с нанесенным ТЗП образца № 2 до проведения испытаний (вид сверху)

Top-view image of the surface of a metal disk with thermal protective coating sample No. 2 before testing

Изображение поверхности металлического диска с нанесенным ТЗП образца № 2 после проведения испытаний (вид сверху)

Top-view image of the surface of a metal disk with thermal protective coating sample No. 2 after testing.

Изображение поверхности металлического диска с нанесенным ТЗП образца № 2 после проведения испытаний (вид сбоку)

Side-view image of the surface of a metal disk with thermal protective coating sample No. 2 after testing.

Рис. 9. Испытание ТЗП образца № 2 на основе смолы диглицидилового эфира бисфенола А/Ф с отвердителем ТЭТА с дополнительным теплозащитным слоем на основе полиорганосилоксановой смолы, наполненной алюминиевой пудрой

Fig. 9. Testing of thermal protective coating sample No. 2, based on bisphenol A/F diglycidyl ether resin with TETA hardener, with an additional thermal protective layer made of polyorganosiloxane resin filled with aluminium powder.

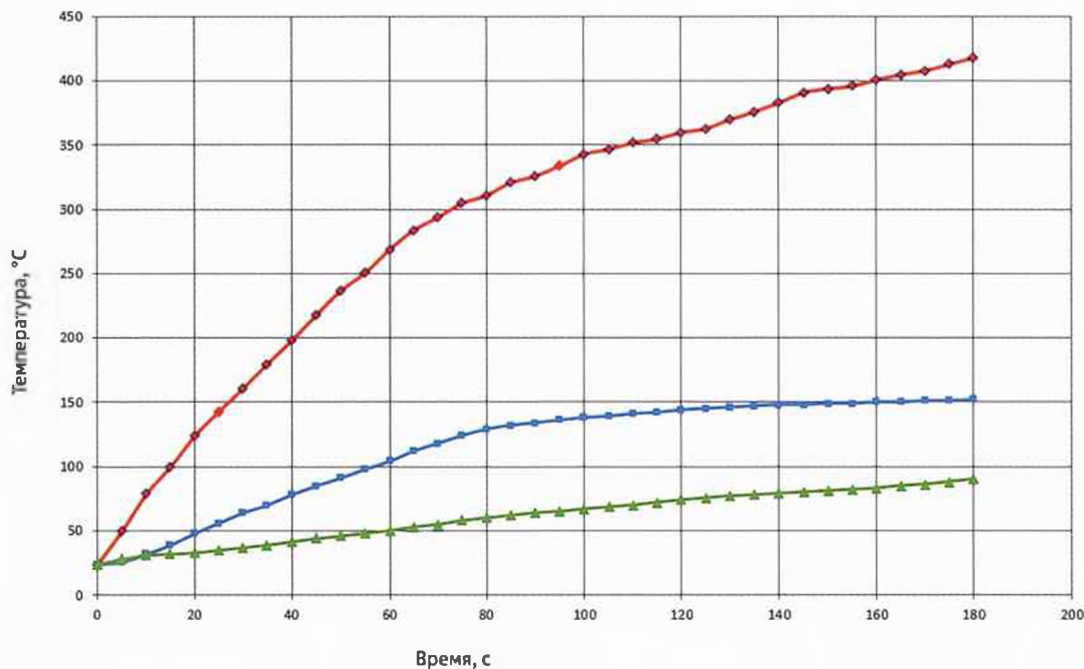


Рисунок 10. Изменение температуры на задней поверхности металлического диска без покрытия (красный цвет) с нанесенным ТЗП на основе эпоксидной смолы (образец 1, синий цвет) и с дополнительным слоем на основе полиорганосилоксановой смолы, наполненной алюминиевой пудрой (образец 2, зеленый цвет)

Fig. 10. Temperature variation on the back surface of a metal disk: uncoated (red), coated with a thermal protective coating based on epoxy resin (Sample 1, blue), and coated with an additional layer of polyorganosiloxane resin filled with aluminium powder (Sample 2, green).

Графики, иллюстрирующие скорость подъема температуры на задней поверхности металлического диска, приведены на рис. 10.

Анализ графика подъема температуры показывает, что металлический диск без покрытия за 60 секунд нагревается до 270 °C, за 120 секунд — до 360 °C, а за 180 секунд — до 420 °C.

Металлический диск с теплозащитным покрытием на основе эпоксидной смолы по истечении 60 секунд нагревается до 105 °C, за 120 секунд — до 145 °C, а за 180 секунд — до 150 °C.

Металлический диск с теплозащитным покрытием на основе эпоксидной смолы с дополнительным слоем на основе полиорганосилоксановой смолы, наполненной алюминиевой пудрой, за 60 секунд нагревается до 50 °C, за 120 секунд — до 75 °C, а за 180 секунд — до 90 °C.

В результате проведенных исследований установлено, что слой (толщиной около 100 мкм) на основе полиорганосилоксановой смолы, наполненной алюминиевой пудрой, выступает в роли дополнительной теплозащиты и уменьшает скорость деструкции основного теплозащитного слоя. Дополнительная теплозащита основного слоя осуществляется за счет более высокой термостойкости полиорганосилоксановой смолы, а также за счет дополнительных затрат теплового потока на нагрев, плавление и окисление частиц алюминия. В условиях движения на высоких скоростях, теплозащитные свойства данного слоя будут возрастать за счет абляционного эффекта.

Применение данного типа теплозащитного покрытия толщиной 2,5 мм позволяет снизить температуру на поверхности и внутри летательных аппаратов и изделий на 300–800 °C по сравнению с образцами без покрытия.