

УДК 539.434; 536.468

А. А. Алексеев, В. А. Забайкин, П. К. Третьяков, И. Е. Наумов

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: lab2@itam.nsc.ru

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ

В работе экспериментально изучалась термостойкость образцов жаростойких сплавов и композиционных материалов при длительном воздействии высокоскоростным высокотемпературным потоком (вплоть до их разрушения). В процессе испытаний измерялась локальная температура поверхности в наиболее теплонапряженных областях. Сделаны оценки тепловых потоков к поверхности образцов в процессе выхода на стационарный режим.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхзвуковой поток, композиционные материалы, термостойкость материалов.

Введение

Проблема тепловой защиты элементов летательного аппарата с гиперзвуковой скоростью полета остается актуальной, несмотря на достижения в этой области в связи с развитием ракетно-космической техники. С историей преодоления теплового барьера можно ознакомиться в [1]. Закономерности построения тепловой защиты, анализ различных методов и их эффективность приведены в монографии [2]. Вопрос о тепловой стойкости особенно остро стоит при выборе материала для изготовления тракта прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) для высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) [3]. В этой работе приведены теплофизические характеристики различных материалов. Высокий уровень температур в прямоточном тракте двигателя (при числах Маха полета $LA \geq 6,0$ температура потока у стенки становится более 1 700 К) вызывает необходимость применения специальных материалов (например, сплавы Inconel, Hastelloy). Причем с ростом температуры требуется нанесение защитного слоя или применение активного охлаждения [4; 5]. Для защиты элементов конст-

рукции ЛА возникает необходимость поиска новых материалов [6], которые обладают высокими показателями прочности и термостойкости. Можно отметить, что в качестве перспективных рассматриваются композиционные материалы.

В работе экспериментально изучалась термостойкость сплава ВЖ98 и углерод-карбидкремниевый композиционный материал (УКККМ). Эти материалы были выбраны на основе данных об их жаропрочности и жаростойкости при высоких уровнях рабочих температур.

Параметры экспериментальной установки

Работа выполнена на стенде сверхзвукового горения ИТПМ СО РАН [7]. Для подогрева воздуха применялся плазмотрон мощностью до 2 МВт, обеспечивающий нагрев в диапазоне 1 200–3 000 К. Испытуемые образцы обтекались сверхзвуковым потоком с числом Маха $M = 2,2$. Температура торможения потока в условиях эксперимента составляла $T = 1\,650 \div 1\,800$ К; диапазон изменения скоростного напора $(1,3 \div 2,3) \cdot 10^5$ кг/(м·с²). Эти параметры при-

близительно соответствует условиям, возникающим в камере сгорания ПВРД при скорости полета ЛА превышающей скорость звука приблизительно в 5–6 раз [8]. Время, в течение которого проводились испытания образцов, не превышало двух минут и было ограничено условием стабильной работы плазмотрона.

Методика измерений

В процессе экспериментов проводилась регистрация давления в форкамере, расхода воздуха через сопло. Регистрация параметров велась автоматической системой сбора, обработки и визуализации данных на базе персонального компьютера и модулей аналого-цифровых преобразователей [9].

Визуализация волновой структуры обтекания в отсутствие термического воздействия проводилась теневым методом (прибор ИАБ-451). Изображение регистрировалось камерой технического зрения с возможностью изменения времени экспозиции в диапазоне $1/100000 \div 1/50$ с.

Определение прочностных характеристик производилось методом Виккерса ГОСТ 2999-75 и ISO 6507. Суть метода заключается во вдавлении в испытуемый материал правильной четырехгранной алмазной пирамиды с углом 136° между противоположными гранями. Твердость по Виккерсу вычисляется путем деления нагрузки на площадь поверхности полученного пирамидального отпечатка. Основными параметрами при измерении твердости по Виккерсу является нагрузка и время выдержки, составившие в данных экспериментах 0,3 кг и 10 с.

Для измерения температуры поверхности образцов применялся оптический пирометр IS 300, работающий в инфракрасной области (0,8–1,1 мкм) в диапазоне средних и высоких температур (920–2 070 К). Основной сложностью пирометрических измерений температуры является трудность учета связи между термодинамической температурой объекта и регистрируемой пирометром тепловой радиацией. Необходимо учитывать, что поток теплового излучения с исследуемой поверхности зависит от многих факторов: температура тела, материал и форма, состояние поверхности, наличие оксидной пленки и др.

Для получения корректных результатов, помимо правильной установки пирометра, необходимо знание степени черноты изучаемых материалов. Степень черноты определялась экспериментально. В муфельную печь помещался тестируемый образец. Контроль температуры в печи велся при помощи хромель-алюмелевой термопары, параллельно производилась регистрация излучения образца пирометром. Из полученных данных рассчитана степень черноты для металлических образцов, а также для образца из композиционного материала. Однако следует заметить, что при возрастании температур поверхность металлов начинает окисляться, что приводит к росту степени черноты. При этом погрешность определения температур для металлов может достигать до 10 %; для композиционных материалов погрешность составляла примерно 2 %.

В ходе экспериментов для проведения исследований термостойкости материалов использовались образцы, изготовленные из сплава ВЖ98 в виде пластин с клиновидной закругленной на конце кромкой (рис. 1, а) размерами $70 \times 60 \times 6$ мм, а также образец из УКККМ, который представлял собой плоскую пластину размерами $70 \times 60 \times 5$ мм.

Как отмечалось выше, эти образцы были выбраны для тестирования на основании их высокой жаропрочности и жаростойкости. Жаропрочный, жаростойкий сплав ВЖ98 применяется для изготовления деталей камер сгорания, форсажных камер с рабочей температурой до 1 270–1 370 К. Максимальная температура эксплуатации сплава УКККМ – 1 920 К. По сравнению со сплавом ВЖ98 композиционный материал обладает существенно меньшей плотностью, что является значительным преимуществом при конструировании элементов ЛА.

Образцы крепились вблизи от выходного среза осесимметричного сопла диаметром 50 мм. На рис.1 представлена схема установки образца, картина и схема обтекания. Температура поверхности образца определялась по регистрации излучения в наиболее теплонапряженном месте. Определение этого места осуществлялось по яркости свечения образца в горячем потоке при съемке видеокамерой. Область, от которой фиксировалось излучение поверхности образца, отмечена на рис.1 пунктирной окружностью.

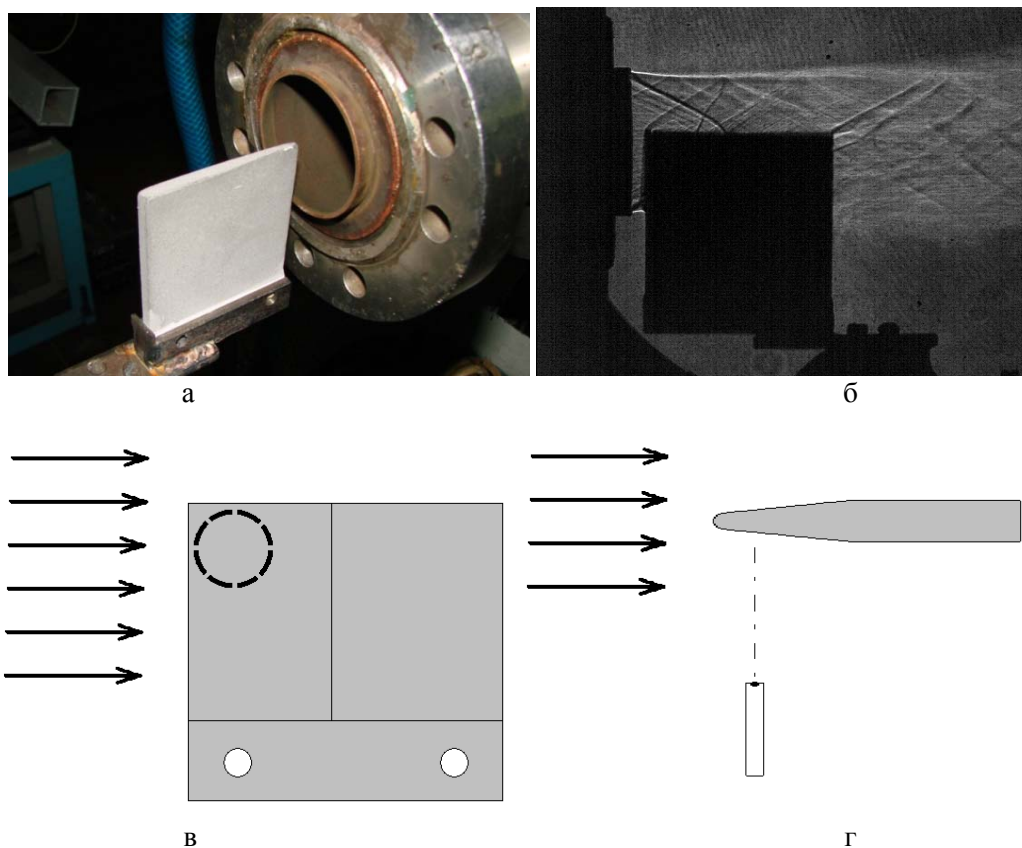


Рис 1. Общий вид установки образца и схема измерения температуры: *а* – установка образца на выходе из сопла; *б* – теневая картина обтекания исследуемого образца потоком; *в, г* – схема установки пирометра и зона регистрации температуры

Сводные данные экспериментов

Таблица 1

Параметр	Образцы из сплава ВЖ98			УКККМ	30ХГСА
	1	2	3		
Время воздействия, с	40	60	100	100	18
Температура воздействия, К	1 650	1 700	1 650	1 600–1 800	1 600
Давление в форкамере, Па	$6,10 \cdot 10^5$	$5,4-5,6 \cdot 10^5$	$5,80 \cdot 10^5$	$5,85 \cdot 10^5$	$5,9 \cdot 10^5$
Радиус закругления, мм	1	0,5	1,5	–	1,5
Угол раскрытия, градус	6	10	6	–	6

Экспериментальное исследование термостойкости материалов

Для проведения эксперимента были использованы три образца из сплава ВЖ98 с различными геометрическими параметрами (табл. 1), по одному образцу из УКККМ и из стали 30ХГСА. Сталь 30ХГСА относится к классу легированной конструкционной ста-

ли, широко применяется в авиационном машиностроении, выбрана для сравнения с жаростойкими образцами.

Три образца из сплава ВЖ98 были подвергнуты тестированию с различным временем воздействия потока. Образец ВЖ98 № 1 (см. табл. 1) подвергся воздействию потока в течение 40 с при давлении в форкамере $P \approx 6,10 \cdot 10^5$ Па и температуре торможения

потока $T \approx 1650$ К. Образец прошел испытание, выдержав время эксперимента, без деформации. Максимальная температура поверхности, зафиксированная пирометром, составила 1550 К (рис. 2).

Образец ВЖ98 № 2 подвергся воздействию потока в течение 60 с при давлении в форкамере $P \approx 5,60 \cdot 10^5$ Па и температуре торможения потока $T \approx 1700$ К. Квазистационарный режим установился примерно на двадцатой секунде. Образец выдержал испытание без деформации, максимальная температура поверхности, зафиксированная пирометром, составила 1450 К.

Образец ВЖ98 № 3 подвергся воздействию потока в течение 100 с при давлении в форкамере $P \approx 5,8 \cdot 10^5$ Па и температуре торможения потока $T \approx 1650$ К. Образец прошел испытание без деформации. Максимальная температура поверхности, зафиксированная пирометром, составила 1650 К. Этот образец обладал наиболее массивным и коротким обтекателем и, следовательно, большей теплоемкостью по сравнению с другими образцами. Тем не менее на 25-й секунде температура образца с хорошей точностью вышла на постоянное значение. Ниже, на рис. 3, приведена зависимость температуры поверхности образца от времени для данного эксперимента.

Образец, изготовленный из композиционного материала, подвергался воздействию потока в течение 100 с при давлении в форкамере $P \approx 5,85 \cdot 10^5$ Па и температуре торможения потока $T \approx 1800$ К. Образец прошел испытание, выдержав время эксперимента и не разрушившись, максимальная температура поверхности, зафиксированная пирометром, составила 1450 К. На рис. 4 приведена зависимость температуры поверхности от времени. Необходимо отметить, что время выхода на квазистационарный режим заметно больше, чем у предыдущего образца.

Образец из стали 30ХГСА подвергался воздействию потока при давлении в форкамере $P \approx 5,90 \cdot 10^5$ Па и температуре торможения потока $T \approx 1600$ К. На 16-й секунде эксперимента началось плавление образца с последующим возгоранием, температура в измеряемой области поверхности в момент воспламенения составила 1300 К. После этого на 18-й секунде эксперимент был прекращен. Можно сделать вывод о том, что эта сталь заметно уступает по термостойкости образцам из сплава ВЖ98.

Анализ результатов по термостойкости материалов

По методу Виккерса была измерена микротвердость образца № 3 из сплава ВЖ98, при нагрузке в 30 Н и времени выдержки 10 с. Зависимость от продольной координаты (направленной вдоль потока) не была обнаружена. На рис. 5 изображена зависимость микротвердости от поперечной координаты (направленной поперек потока). Измерения показывают, что микротвердость области образца, находившейся непосредственно в потоке, примерно в два раза меньше части, не подвергавшейся воздействию разогретых газов.

На рис. 5 отчетливо виден скачок микротвердости, соответствующий границе высокотемпературного потока.

Измерить микротвердость образца, изготовленного из композиционного материала, оказалось невозможно ввиду наличия в его структуре множества пор, препятствующих достоверному измерению методом вдавливания алмазной пирамидки.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в условиях эксперимента происходит уменьшение твердости и повышение вязкости сплава ВЖ98 вследствие нагрева образца и последующего плавного охлаждения.

Расчет тепловых потоков

Выполнен расчет тепловых потоков, проходящих через поверхность образца из композитного материала. Основными источниками поступления и отвода тепла в данном случае являлись конвективный теплоперенос и излучение поверхности образца.

Так как пограничный слой на всей пластинке устанавливается турбулентным вследствие конечной толщины кромки, то согласно [4] число Нуссельта может быть рассчитано по формуле

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= \frac{ax}{\lambda_w} = \\ &= 0,029 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \left(\frac{T_w}{T_0} \right)^{0,39} \left(1 + \frac{k-1}{2} r \text{M}^2 \right)^{0,11}. \end{aligned} \quad (1)$$

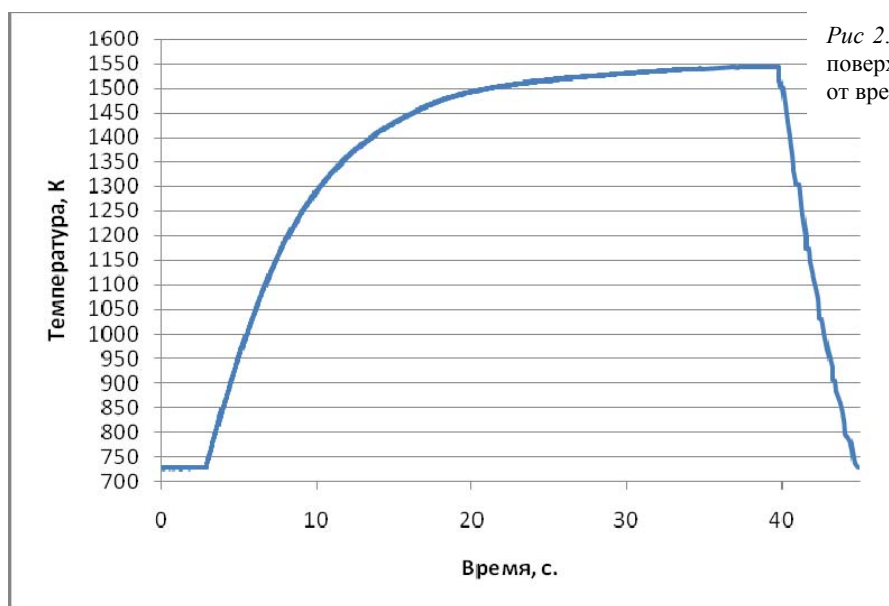


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности образца ВЖ98 № 1 от времени

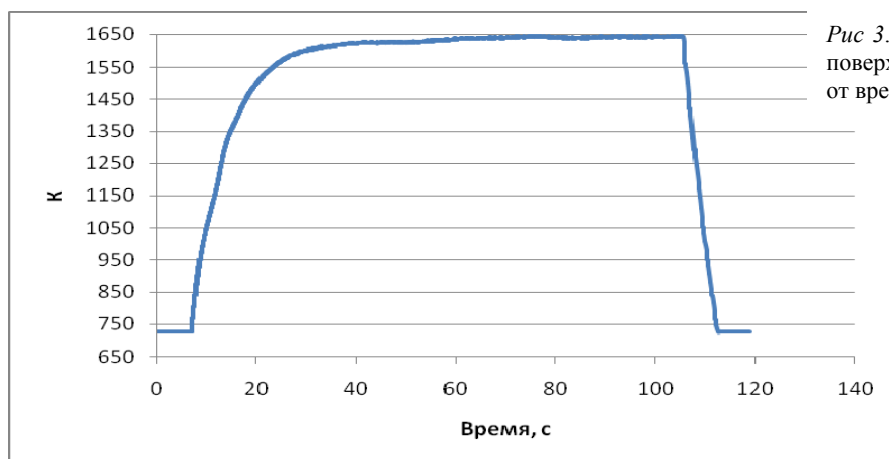


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности образца ВЖ98 № 3 от времени

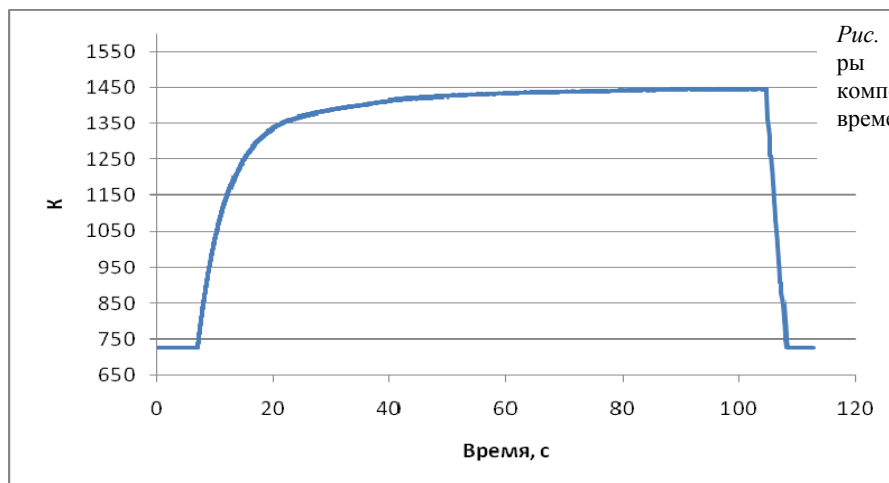
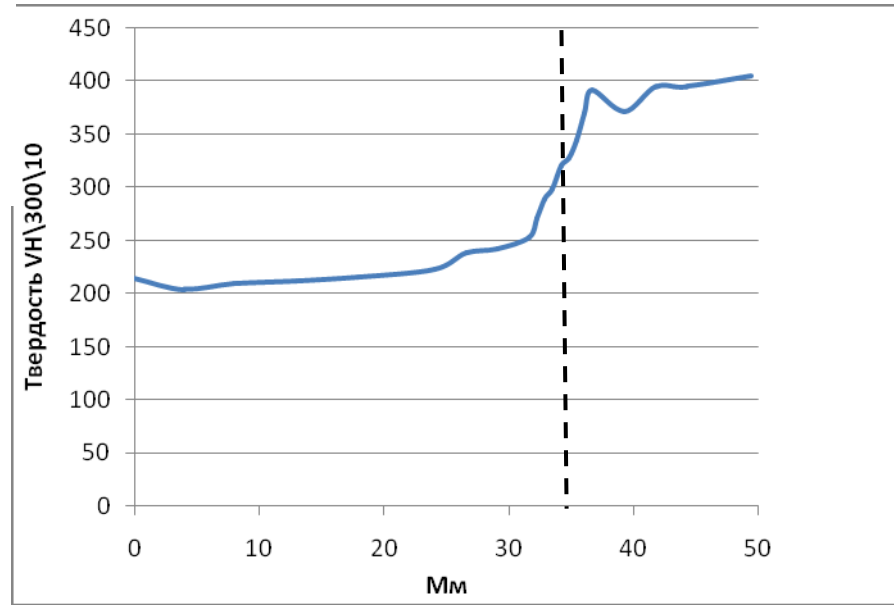


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности образца из композиционного материала от времени

Рис. 5. Микротвердость образца ВЖ98 № 3. Слева от пунктирной линии – область, находившаяся в потоке; справа – вне потока



В расчете были приняты следующие значения:

$M = 2,2$ – число Маха потока;

$T_0 = 1770$ К – температура торможения потока;

$$U_\infty = \sqrt{\frac{T_0 R}{m} \frac{2k}{k-1} \left(1 - \left(\frac{P}{P_{\text{фк}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \cong 1300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

скорость воздушного потока на выходе из сопла;

$P_{\text{фк}} = 5,8 \cdot 10^5$ Па – давление в форкамере;

$P = 0,54 \cdot 10^5$ Па – давление на выходе из сопла;

$m = 28,89 \frac{\text{кг}}{\text{КМоль}}$ – молярная масса воздуха;

$$\text{Re} = \frac{U_\infty \rho_w x}{\mu_w} \approx 4,7 \cdot 10^6$$
 – число Рейнольдса

потока в окрестности пятна измерения пирометром;

$x = 0,0175$ м – расстояние от края, на котором находился центр пятна измерения пирометром;

$\text{Pr} \approx 0,86$ – число Прандтля для основной турбулентной части пограничного слоя [4];

$$\lambda_w \cong 0,83 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$
 – теплопроводность

воздуха около поверхности тела;

$$\mu_w = 6,16 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$
 – вязкость воздуха

у стенки;

$$k = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$$
 – отношение теплоемкостей

воздуха;

$r = 0,89$ – коэффициент восстановления для турбулентного течения [4];

$\rho_w = 1,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность воздуха у поверхности тела;

$C_p = 1,297 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ – теплоемкость воздуха при T_e [10];

T_w – температура стенки (регистрируется пирометром);

a – коэффициент теплоотдачи.

Выражая коэффициент теплоотдачи из формулы (1) для числа Нуссельта, можно рассчитать конвективный тепловой поток

$$q = a(T_e - T_w).$$

Рассмотрим мощность излучения, испускаемую поверхностью нагретого тела. Согласно закону Стефана – Больцмана, мощность излучения, испускаемого поверхностью площадью S , составляет [10]

$$P = S \varepsilon \sigma T^4,$$

где ε – экспериментально определенная степень черноты; σ – постоянная Стефана –

Больцмана (определяется как $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^3 h^2}$,

где h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, c – скорость света). Численно

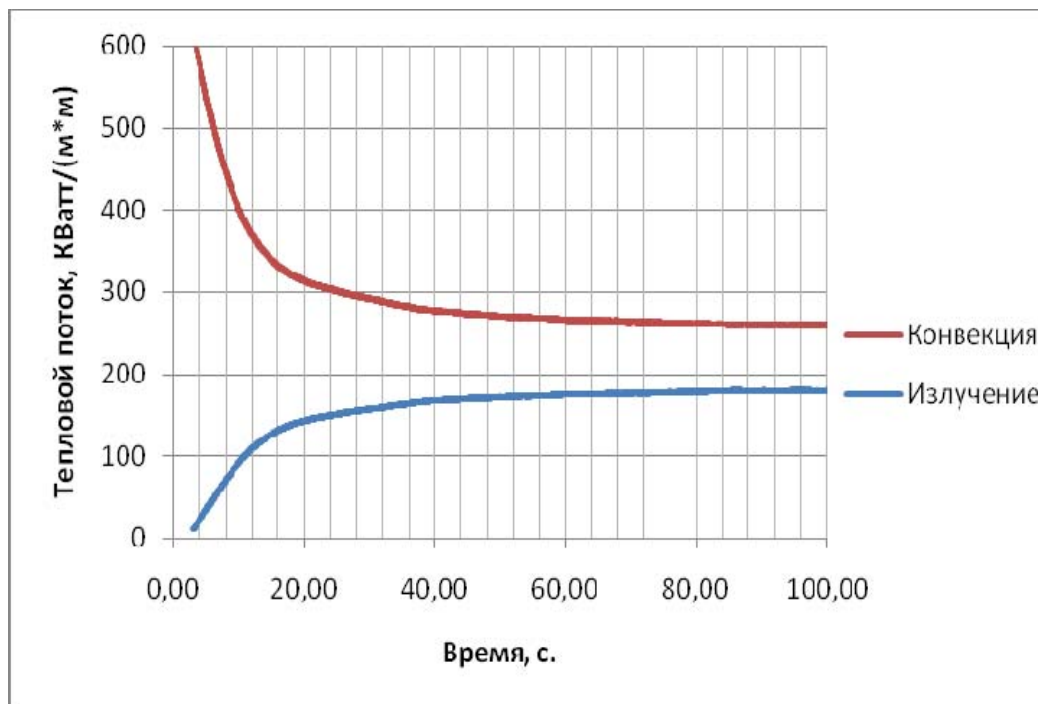


Рис. 6. Тепловые потоки, проходящие через поверхность образца, выполненного из композиционного материала

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}^4}.$$

Соответственно удельная мощность излучения с поверхности

$$W = \frac{P}{S} = \varepsilon \sigma T^4.$$

Температура образца в зависимости от времени регистрировалась пирометром, параметры потока на протяжении эксперимента поддерживались постоянными. Таким образом, имея зависимость мощности излучения нагретого тела от температуры, а также зависимость теплового потока от температуры, была установлена зависимость тепловых потоков, проходящих через поверхность образца, от времени (рис. 6).

При установлении термического равновесия суммарный тепловой поток, проходящий через поверхность, равняется нулю. Разница в мощности двух тепловых потоков при установившемся режиме течения равна отводу тепла за счет теплопроводности через крепление образца к державке. Из приведенных расчетов видно, что основной отвод тепла происходит за счет излучения образца.

Заключение

Создан регистрирующий комплекс по тестированию материалов на термоустойчивость в высокоскоростных потоках. Разработана и отлажена методика регистрации локальной температуры поверхности и динамики нагрева образца. Получены данные об изменении прочностных характеристик сплава ВЖ98.

В результате испытаний установлено, что сплав ВЖ98 и углерод-карбидкремниевый композиционный материал способны выдержать долговременное воздействие высокотемпературным потоком с числом Маха $M = 2,2$. Эти материалы могут быть рекомендованы для применения при конструировании тракта прямоточного двигателя и теплонапряженных элементов ЛА.

Список литературы

1. Heppenheimer T. A. Facing the Heat Barrier: A History of Hypersonics. NASA, 2007. 336 p.

2. Никитин П. В. Тепловая защита. М.: Изд-во МАИ, 2006. 510 с.
3. Valdevit L., Vermaak N., Zok F. W., Evans A. G. A Materials Selection Protocol for Lightweight Actively Cooled Panels // Journal of Applied Mechanics. 2008. Vol. 75 / 061022. P. 1–15.
4. Авдучевский В. С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М.: Оборонгиз, 1960. 389 с.
5. Dinescu I., Oprescu M. Technologies for Future Precision Strike Missile System // The Annals of «Durena de Jos» University of Galati. 2003. Vol. 2. P. 24–27.
6. Гофин М. Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. СПб.: Мир, 2003. 671 с.
7. Забайкин В. А. Качество высокоэнгальпийного потока при электродуговом подогреве воздуха в установке для исследования сверхзвукового течения // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 1. С. 28–36.
8. Зуев В. С., Макарон В. С. Теория прямооточных и ракетно-прямоточных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 367 с.
9. Baturin A. A., Postnov A. V., Smogolev A. A. Simultaneous Usage of the E-440 Modules for Experimental Data Acquisition // Proc. of the International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-2007). Novosibirsk, 5–10 February 2007. Part 3. P. 200–203.
10. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена М.: Машгиз, 1962. 456 с.

Материал поступил в редколлегию 08.04.2012

A. A. Alekseev, V. A. Zabaykin, P. K. Tretjakov, I. E. Naumov

RESEARCH OF THERMAL DURABILITY OF MATERIALS IN HIGH-SPEED FLOWS

In this paper, the thermal stability of heat-resistant alloy samples and composite materials at long-term effect of high-temperature high-speed flow (up to their destruction) was investigated. During the tests the local surface temperature in the most heat-stressed areas was measured. Estimations of heat flows to the surface of the samples on transition to the stationary mode have been made.

Keywords: high temperature supersonic flow, composite materials, material heat resistance.