УДК 621.453/.457.03:620.22-419:536.28

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.11

Ю. И. ЕВДОКИМЕНКО¹, И. А. ГУСАРОВА², Г. А. ФРОЛОВ¹, В. М. КИСЕЛЬ¹, Д. В. БОРОВИК¹, С. В. БУЧАКОВ¹

 ¹ Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Национальной Академии наук Украины, Киев, Украина
² Государственное конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, Днепр, Украина

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПАКЕТА КОРПУСА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПРОГРАММИРОВАННОМ НАГРЕВЕ

Выполнено экспериментальное определение температурных зависимостей теплофизических характеристик многофункционального покрытия МФП-92 в рабочем диапазоне температур при тепловом нагружении, имитирующем штатные условия полета. Нагрев осуществляли струёй промышленной кислород-пропановой горелки, установленной на штативе с возможностью варьирования расстояния до поверхности образца. Программы эксплуатационных режимов работы материала включают два пика нагрева до температуры ~1400 °C с темпом нагрева и охлаждения 20-40 град/с. В таких условиях происходит термическая деградация материала МФП-92, изменяющая его фазовый состав, структуру и, соответственно, теплофизические характеристики (ТФХ). Основные преобразования в материале МФП-92 происходят в диапазоне температур до 1000 °C, поэтому теплопередача в нем при заданных программах нагрева может быть описана с помощью упрощённой модели ТФХ. Эта модель предполагает существование материала в двух состояниях – исходном (фаза А) и отожженном с полностью завершенными процессами преобразований (фаза Б), каждому из которых приписывается свой набор ТФХ. Для определения ТФХ материала МФП-92 в его образцах в процессе тепловых испытаний регистрировали температурные поля, которые затем обрабатывали с использованием методики решения на компьютерной модели обратной (коэффициентной) задачи теплопроводности (ОЗТ). В результате получали температурные зависимости удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности фаз А и Б, а также величину наиболее мощного теплового эффекта фазового перехода при 110 °C в фазе А. Остальные фазовые переходы учитывали соответствующими изменениями удельной теплоемкости. При испытаниях материала также определен коэффициент излучения материала. По температурным полям, полученным при тепловых испытаниях образцов трехслойного пакета тепловой защиты «материал МФП-92-теплоизоляция-стальная подложка» в условиях нагрева по программе эксплуатационного режима была проведена верификация двухфазной модели материала МФП-92 и полученных значений его ТФХ, подтвердившая их адекватность.

Ключевые слова: многофункциональное покрытие; теплофизические характеристики; исходное и отожженное состояния; высокотемпературные испытания; моделирование.

Введение

Многофункциональное покрытие МФП-92 (далее – материал МФП-92) применяется для тепловой защиты корпусов ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) при температурах до 1400 °C в течение нескольких минут полета. На рис. 1 показаны зависимости температуры системы теплозащиты наружного корпуса ракетного двигателя от времени на возможных эксплуатационных режимах.

Краткое описание материала МФП-92 приведено в статье «Теплофизические характеристики теплозащитного материала корпуса ракетного двигателя при температурах до 1000 °С» (опубликована в этом журнале). В ней представлены ТФХ материала МФП-92 при печном нагреве до 1000 °С. Настоящая работа является продолжением исследований при более высоких температурах и темпах нагрева.

Как ранее было показано, даже при относительно невысоких температурах (нагрев до 450 °C в течение 75 минут) материал МПФ-92 претерпевает заметные физико-химические превращения, изменяющие его свойства, в частности, удельную теплоемкость и плотность (она уменьшается более, чем на 10 %). Ещё более значительные изменения происходят в материале при нагреве выше 1000 °C. Хотя, в соответствии с техническими требованиями, при нагреве в эксплуатационных условиях абляционное разрушение материала не происходит, его химический и фазовый составы, а также структура (в частности, увеличивается пористость) существенно изменяются, что неизбежно приводит к изменению его

© Ю. И. Евдокименко, И. А. Гусарова, Г. А. Фролов, В. М. Кисель, Д. В. Боровик, С. В. Бучаков, 2021

ТФХ. В задачах теплопередачи – это изменение может быть учтено с помощью модели, предполагающей существование материла в двух состояниях – исходном (фаза А) и отожженном с полностью завершенными процессами преобразований (фаза Б), каждому из которых приписывается свой набор ТФХ. Учитывая, что теплопроводность материалов в процессе химической деструкции зависит от темпа нагрева [1], задачей данной работы было исследование ТФХ материала МФП-92 при эксплуатационном темпе нагрева в диапазоне 20-40 град/с (рис. 1).



Рис. 1. Программы эксплуатационных режимов нагрева № 1 и № 2 системы теплозащиты на основе материала МФП-92 и обобщающий их испытательный режим

1. Методика определения теплофизических характеристик при струйном нагреве

1.1. Методика определения эффективных ТФХ термически разлагающихся материалов в условиях струйного нагрева

Для обеспечения требуемой скорости нагрева экспериментальные температурные поля в образцах МФП-92 получали при нагреве в струе продуктов сгорания кислородно-пропановой горелки. Полученные температурные поля обрабатывали с использованием методик решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) и прямой задачи (ПЗТ) в одномерной постановке [2, 3], в результате чего получали искомые температурные зависимости значений удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности материала. Получаемые таким образом значения ТФХ имеют сугубо эффективный характер, включая в себя все влияющие на теплопередачу тепловые эффекты деструкции материала в конкретных условиях нагрева. Они могут трактоваться, как ТФХ условного материала, существующего в двух стабильных фазах, теплопередача в котором происходит так же, как в материале МФП-92, и применимы только к задачам теплопроводности.

На рис. 2 показана схема экспериментальной модели.



Рис. 2. Схема модели для определения $T\Phi X$ при струйном нагреве: 1 – пластина-образец; 2 – кольцевая канавка; 3 – датчик теплоприемника №1; 4 – термопары датчика №1; 5 – теплоприемник №1; 6 – датчик теплоприемника №2; 7 – термопара датчика №2; 8-теплоприемник №2; 9 – дистанцирующие элементы; 10 – базальтовая теплоизоляция; 11 – асбестовая теплоизоляция; 12 - теплоизолирующий корпус; 13 – теплоизолирующая плита; 14 – прижимная плита; 15 – опорная плита; 16 - крепежные элементы

Для обеспечения одномерности нагрева концентрированным струйным источником (горелкой) в модели выделяется центральная область с максимальным «уплощением» поля, для чего в образцепластине (1) с тыльной стороны на глубину 5 мм прорезается кольцевая канавка (2) толщиной 1,5 мм с внутренним диаметром 13 мм. Под образцом с воздушным зазором устанавливаются теплоприемник № 1 (5) с датчиком теплового потока (3), выполненные из нержавеющей стали 12Х18Н9Т, и медный теплоприемник №2 (8) с датчиком (6). Высота датчика (3) – 6 мм, датчика (6) – 10 мм. На датчиках зачеканены термопары (4) и (7), соответственно.

Основным фактором, влияющим на точность определения ТФХ, является соответствие условий эксперимента применяемой компьютерной модели. В данном случае применение одномерной модели требует минимизации тепловых потерь с боковых поверхностей образца и теплоприемников, а также с тыльной поверхности нижнего теплоприемника. Для этого образец и пакет теплоприемников установлены в массивном шамотном корпусе (12, 13) с базальтовой (10) и асбестовой (11) теплоизоляцией.

Для определения ТФХ материала МФП-92 при эксплуатационном темпе нагрева экспериментальную модель с установленными на ней образцом и датчиками теплового потока помещали в струю промышленной кислород-пропановой сварочной горелки, установленной на штативе с возможностью вертикального перемещения для регулирования плотности теплового потока.

В процессе испытаний температуру нагреваемой поверхности образца измеряли пирометрами с лазерным наведением:

1. INFRATHERM Converter IGA 100 (IMPAC Electronic Gmb, ΦΡΓ) – диапазон измеряемых температур 350...1800 °C. Длина волны λ=1,45...1,8 μм. Ошибка измерений не превышает 0,3 % при температурах до 1500 °C и 0,5 % при температурах свыше 1500 °C, частота измерений – до 100 в секунду.

2. IMPAC ISQ 5-LO MB-30 (Luma Sense Technologies, США) – диапазон измеряемых температур 1000...3000 °С. Двуцветный пирометр с длинами волн λ =0,9 µм и λ =1,05 µм. Ошибка измерений – не более 0,005 T(°C) + 2 °С при температурах до 1500 °С и 0,01 T(°С) при температурах свыше 1500 °С, частота измерений – до 100 в секунду.

Температуру тыльной поверхности образца и датчиков теплового потока одновременно измеряли термопарами типа К (хромель-алюмель), показания которых регистрировали на ПК.

Для синхронизации записи перед зажиганием горелки образец закрывали теплозащитным экраном, а объектив одного из пирометров – шторкой, после настройки факела горелки экран и шторку одновременно убирали, что обеспечивало точную фиксацию момента начала нагрева по реакции пирометра. Интенсивность нагрева регулировали перемещением горелки на штативе. В большинстве случаев нагрев производили по программе первого пика нагрева на эксплуатационном режиме № 2 (рис. 1).

В расчете использовали ранее разработанную двухфазную модель ТФХ материала МФП-92, предполагающую существование материала в двух состояниях – исходном (фаза А) и отожженном с полностью завершенными необратимыми физикохимическими фазовыми преобразованиями (фаза Б), каждому из которых приписывается свой набор ТФХ. Промежуточные состояния при этом из рассмотрения исключаются постулатом, что переход из фазы А в фазу Б происходит одномоментно в момент достижения температуры 1000 °С. Предложенная двухфазная модель ТФХ МФП-92 предполагает, что фаза А в любой точке объема материала существует до первого достижения температуры 1000 °С, но в условиях эксплуатационных режимов она никогда не достигается в слоях покрытия у подложки, температура на которой ограничена предельно допустимыми значениями её материалов.

Для упрощения расчетной процедуры в компьютерной модели принята следующая последовательность расчета теплопередачи в материале МФП-92 при программе нагрева, предусматривающей снижение температуры после достижения её пика: в процессе нагрева до достижения температуры тыльной поверхности $T_{wcold} = 125$ °C (температура завершения наиболее мощного эндотермического фазового перехода в фазе A) для расчета по всей толщине материала используются ТФХ фазы A, при больших температурах подложки – ТФХ фазы Б.

На каждом образце последовательно проводили два цикла нагрева с записями температурных полей с полным охлаждением между ними. По первым циклам нагрева определяли ТФХ фазы A, по вторым – фазы Б.

По показаниям пирометров строили кривую температуры горячей поверхности образца, которую затем сглаживали аппроксимацией полиномами (2–5 порядков) для фильтрации и сглаживания пульсаций температуры, вызванных турбулентными пульсациями пламени горелки. По показаниям термопар датчиков теплового потока определяли зависимость от времени интенсивности тепловых потерь с тыльной поверхности образца.

Для расчета использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics, в котором решается прямая задача теплопроводности в плоской пластине в одномерной постановке с краевыми условия первого рода на нагреваемой поверхности (температура на ней в процессе нагрева) и второго рода – на холодной стенке (выходящий тепловой поток). В ходе итерационного процесса попеременно при неизменных значениях температурной зависимости одной из теплофизических характеристик (удельной теплоёмкости или коэффициента теплопроводности) варьировали значения температурной зависимости другой характеристики до совпадения расчетной и экспериментальной температур тыльной поверхности образца с заданной точностью (±5°). Одновременно с температурными зависимостями ТФХ, в расчете определяли величину мощного эндотермического фазового перехода ΔH_{E2} , происходящего при первом цикле нагрева материала МФП-92 в исходном состоянии (фаза А) при температуре около 100 °С, температуру его начала ТЕ2, а также температурный диапазон ΔT_{E2} .

1.2. Определение коэффициента излучения материала МФП-92 в диапазоне температур 1000...1400°С

Запись пирометрами истинной и яркостной температур образца в процессе нагрева при температурах более 1000 °С, позволяет определить коэффициента излучения $\epsilon(\lambda, T)$ материала МФП-92, который для длины волны пирометра ($\lambda = 1,63$ мкм) и данной температуры рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \exp(C_2 / \lambda (T_{H}^{-1} - T_p^{-1})),$$

где T_{μ} и T_{π} – истинная и яркостная температуры, (К); $C_2 = 1,438 \times 10^{-2}$ м К – пирометрическая константа.

1.3. Методика эксперимента для верификации двухфазной модели материала МФП-92 и его ТФХ

Для проверки полученных результатов определения ТФХ материала МФП-92 и испытания штатной системы теплозащиты на его основе в условиях, приближенных к эксплуатационным, «ГП "КБ Южное"» представило 5 образцов трехслойного пакета, состоящего из материала МФП-92 толщиной 7,2±0,03 мм, теплоизоляционного промежуточного слоя (1-1,1 мм) и подложки из стали 45 (2,9 мм). Общая толщина пакета составляла ~11,5 мм, а размеры 50×50 мм.

Верификацию двухфазной модели материала МФП-92 и его ТФХ, полученных по описанной выше методике, проводили на том же оборудовании в условиях нагрева по программе «режима испытаний» (рис. 1). Образцы трехслойных пакетов устанавливали в экспериментальной модели. В процессе испытаний измеряли пирометрами температуру в центре пятна нагрева (центр образца) и термопарами – температуры стальной подложки и двух датчиков теплового потока. Для расчета были использованы результаты измерений температуры нагреваемой поверхности и теплового потока из стальной подложки, теплофизические свойства стали 45, ТФХ промежуточной теплоизоляции и определенные ранее ТФХ материала МФП-92. Расчет проводили на той же компьютерной модели, модифицированной на случай трехслойной пластины. Результатом расчета были температурные поля в теплозащитном пакете, включая температуру подложки, которую сравнивали с записанной в эксперименте. В расчете принималась неизменная плотность материала МФП-92 – 1066 кг/м³. Плотность промежуточной теплоизоляции составляла 725 кг/м³. При температурах до 400 °C её эффективная (с учетом фазовых преобразований в процессе тепловой деградации) удельная теплоемкость составляла 400-2300 Дж/(кг·К), а теплопроводность – 0,08-0,11 Вт/(м·К).

2. Результаты экспериментов

2.1. Результаты определения ТФХ материала МФП-92 при струйном нагреве

Определения ТФХ материала МФП-92 при струйном нагреве проводили на трех образцах с двумя циклами нагрева каждого. На рис. 3 показаны температурные поля № 33 и № 34, полученные в двух циклах нагрева первого образца этой партии. По этим полям были рассчитаны температурные зависимости удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности фаз А и Б материала МФП-92, для фазы А – также величина теплового эффекта ΔH_{100} , температура начала и температурный диапазон, составившие наборы ТФХ по полям 33 и 34, соответственно. Расчет проводили до совпадения экспериментальной температуры тыльной поверхности образца с расчетной со средним квадратическим отклонением, не превышающим 5° (рис. 3).



Рис. 3. Экспериментальные и расчетные температурные поля, полученные в двух циклах нагрева образца № 17: а – темп нагрева 26 К/с; б – 34 К/с

Таким же образом рассчитывали ТФХ материала МФП-92 по температурным полям в обоих циклах нагрева для двух других образцов партии.

Искомые ТФХ материала МФП-92 получали осреднением значений характеристик из наборов ТФХ фаз А и Б отдельных образцов. На рис. 4 приведены полученные температурные зависимости удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплопроводности (б) материала МФП-92.

Средняя величина теплового эффекта составила $\Delta H_{E2} = -190 \text{ кДж/кг}$ (эндотермический); температура начала фазового перехода – $T_{E2} = 110 \text{ °C}$, температурный диапазон фазового перехода $\Delta T_{E2} = 15 \text{ °C}$.

Значения температуры тыльной поверхности в двух циклах нагрева первого образца партии, рассчитанные по средним значениям ТФХ фаз А и Б, показаны на рис. 3.

Средние квадратические отклонения экспериментальной температуры тыльной поверхности образцов от рассчитанной по средним значения в процессе первого цикла нагрева (фаза A) для трех образцов составили 8°, 6° и 11° при максимальных отклонениях, не превышающих 16°, в процессе второго цикла (фаза Б) – 7°, 10°и 14° при максимальных отклонениях менее 20°.



Рис. 4. Зависимости эффективной удельной теплоемкости (а) и эффективного коэффициента теплопроводности (б) материала МФП от температуры

Температурные зависимости ТФХ (температурные зависимости удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности) материала МФП-92 в состоянии фазы А имеют весьма сложный вид, определяемый многокомпонентным составом материала, в котором в различных компонентах при нагреве одновременно происходят свои фазовые превращения с выделением или поглощением тепла. Температурные интервалы отдельных фазовых переходов могут накладываться, в результате чего они проявляются как один эффект.

В фазе А материала МФП-92 могут быть выделены четыре фазовых перехода: 1) фазовый переход E_1 в диапазоне температур 40...80 °C имеет слабый экзотермической эффект; 2) фазовый переход E_2 при 110 °C обладает мощным эндотермическим эффектом, и на протяжении минуты практически блокирует теплоперенос в материале (с 75 с по 135 с на рис. 3, поле 33); 3) фазовый переход E_3 происходит в диапазоне 200...500 °C со значительным экзотермическим эффектом; 4) ряд фазовых переходов E_4 при температурах выше 550 °C со слабым эндотермическим эффектом.

Температурные зависимости удельной теплоемкости и теплопроводности фазы Б имеют значительно более простой вид, характерный для неорганических соединений при отсутствии фазовых превращений.

Коэффициент излучения материала МФП-92 при длине волны $\lambda = 1,63$ мкм, определенный для его фаз A и Б, при температуре 1050 °C равен $\varepsilon = 0,14$ и $\varepsilon = 0,16$, соответственно, при 1200 °C – $\varepsilon = 0,16$ и $\varepsilon = 0,2$, при 1400 °C – $\varepsilon = 0,33 \pm 0,02$ и $\varepsilon = 0,37 \pm 0,02$.

2.2. Результат верификации двухфазной модели материала МФП-92 и его ТФХ

Условия и результаты испытаний четырех образцов пакетов трехслойной системы тепловой защиты, расчетов температуры тыльной поверхности подложки и результаты статистического анализа расхождения с экспериментальной температурой показаны в табл. 1, полученные экспериментальные и расчетные тепловые поля в образцах, включая температуру на границе между слоями материала $M\Phi\Pi$ -92 и промежуточной теплоизоляции – на рис. 5. Отдельно на рис. 6 в сравнении показаны экспериментальные и расчетные температуры тыльной поверхности стальной подложки испытанных образцов.

Во всех случаях достигается хорошее совпадение расчетной температуры тыльной поверхности подложки с экспериментальной – максимальное расхождение составляет менее 13°, максимальное среднее квадратическое отклонение – менее 6,5°.

№ образца	Длительность нагрева, с	Интегральная температура, °C×c	Температура подложки, °С		Отклонение, °C	
			эксперимент	расчет	модуль максимального	среднее квадратическое
1	240	207000	207	200	10	5,1
2	270	248000	224	214	12,5	6,4
3	301	278000	209	202	6,5	3,6
4	180	185000	183	175	8	2,7

Условия и результаты испытаний теплозащитных пакетов

Необходимо отметить, что достигаемая в конце испытаний экспериментальная температура во всех случаях оказывается выше расчетной на 7°... 10°. Источником погрешности может быть как недостаточная точность определения ТФХ, так и невозможность точного определения толщины слоев в образце (толщина теплоизоляционного слоя на одном образце изменяется в пределах 10 %). Кроме того, поверхность покрытия МФП-92 имеет рифленую структуру (высота выступов находится на уровне 0,2...0,3 мм). Как показывают тестовые расчеты на примере образца №4, уменьшение заложенной в расчете толщины МФП-92 на 0,15 мм приводит к повышению максимальной достигнутой температуры подложки на 3 °C, а уменьшение толщины промежуточного слоя на 0,05 мм – к увеличению еще на 5 °С, что практически выравнивает конечные экспериментальную и расчетную температуры образца.

На первый взгляд неожиданным результатом расчетов теплового состояния теплозащитных пакетов является повышение во всех случаях более, чем вдвое, точности получаемой температуры подложки по сравнению с температурой тыльной стороны образцов материала МФП-92, получаемой в процессе определения его ТФХ.

На рис. 5 для примера показаны температурные поля образцов № 1 (стандартная кривая температуры нагрева, рис. 5, а) и № 4 (произвольная кривая температуры нагрева с тремя пиками, рис. 5, б).

Основная задача теплозащитного пакета – обеспечить защиту металлической подложки. Поэтому на рис. 6 показано сравнение расчетных и экспериментальных температур стальной подложки испытанных образцов. Из рисунков и табл. 1 видно их хорошее совпадение, что можно объяснить не только точностью определения ТФХ, но также совместным действием теплоизоляционного слоя и высокой теплоемкости подложки, которые сглаживают ошибку определения температуры на нижней поверхности верхнего слоя пакета, выполненного из материала МФП-92.



Рис. 5. Температурные поля в образцах тепловой защиты на основе МФП-92 при моделировании эксплуатационных условий нагрева:

Т₁, Т₂ – экспериментальные температуры нагреваемой и тыльной поверхностей, соответственно;

Т₃ и Т₄ – расчетные температуры на границе между промежуточным слоем и слоем МФП-92 и тыльной поверхности стальной подложки,

соответственно;

а и б – образцы №1 и №4, соответственно

Таблица 1

Заключение

В рамках двухфазной модели материала МФП-92, испытывающего в процессе нагрева необратимые фазовые превращения, в условиях струйного нагрева с эксплуатационным темпом 20-40 град/с в диапазоне до 1400°С определены его эффективные ТФХ – температурные зависимости удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности в исходном (фаза A) и отожженном (фаза Б) состояниях, а также величина теплового эффекта фазового перехода при 110 °С в фазе A.



Рис. 6. Экспериментальные и расчетные температуры тыльной поверхности стальной подложки в образцах трехслойной системы тепловой защиты на основе МФП-92 в условиях струйного нагрева: а – образцы № 1 и № 4; б – образцы № 2 и № 3

В процессе испытаний трехслойных пакетов тепловой защиты «материал МФП-92-теплоизоляция-стальная подложка» в условиях нагрева по программам, моделирующим эксплуатационный режим, проведена верификация методики определения ТФХ материалов, деградирующих в процессе нагрева, и полученных значений ТФХ материала МФП-92, подтвердившая их адекватность.

Среднее квадратичное отклонение расчетной температуры тыльной поверхности подложки теплозащитного пакета от её экспериментальных значений за время испытаний для четырех испытанных образцов составляет менее 6,5 °C, а разница температур в момент завершения испытаний не превышает 10 °C.

Литература

1. Исаев, К. Б. Теплофизические характеристики материалов в широких диапазонах температур и скоростей нагрева [Текст] / К. Б. Исаев. – К. : Куприянова. – 2008. – 240 с.

 Круковский, П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) [Текст] /П. Г. Круковский. – К. : ИТТФ НАНУ, 1998. – 224 с.

3. Просунцов, П. В. Определение теплофизических свойств полупрозрачных материалов [Текст] / П. В. Просунцов, С. В. Резник // Инж.-физ. журн. – 1985. – Т. 49, № 6. – С. 977-982.

References

1. Isayev, K. B. *Teplofizicheskiye kharakteristikimaterialov v shirokikh diapazonakh temperatur i skorostey nagreva* [Thermophysical characteristics of materials in a wide range of temperatures and heating rates]. Kiyev, Kupriyanova Publ., 2008. 240 p.

2. Krukovskiy, P. G. Obratnyye zadachi teplomassoperenosa (obshchiy inzhenernyy podkhod) [Inverse problems of heat and mass transfer (general engineering approach)]. Kiyev, ITTF NANU Publ., 1998. 224 p.

3. Prosuntsov, P. V., Reznik, S. V. Opredeleniye teplofizicheskikh svoystv poluprozrachnykh materialov [Determination of thermophysical properties of semitransparent materials]. *Inzh.-fiz. Zhurn.*, 1985, vol. 49, no. 6, pp. 977-982.

Поступила в редакцию 08.06.2021, рассмотрена на редколлегии 16.08.2021

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЗАХИСНОГО ПАКЕТУ КОРПУСУ РАКЕТНОГО ДВИГУНА ПРИ ПРОГРАМОВАНОМУ НАГРІВІ

Ю. І. Євдокименко, І. О. Гусарова, Г. О. Фролов, В. М. Кисіль,

Д. В. Боровик, С. В. Бучаков

Проведено експериментальне визначення температурних залежностей теплофізичних характеристик багатофункціонального покриття МФП-92 у робочому діапазоні температур при тепловому навантаженні, яке імітує штатні умови польоту. Нагрівання здійснювали струменем промислового кисень-пропанового пальника, встановленого на штативі з можливістю варіювання відстані до поверхні зразка. Програми експлуатаційних режимів роботи матеріалу включають два піки нагрівання до температури ~1400 °C с темпом нагрівання та охолодження 20 – 40 град/с. В таких умовах відбувається термічна деградація матеріалу МФП-92, яка змінює його фазовий склад, структуру та, відповідно, теплофізичні характеристики (ТФХ). Основні перетворення в матеріалі МФП-92 відбуваються в діапазоні температур до 1000 °С, тому теплопередача в ньому при заданих програмах нагрівання може бути описана за допомогою спрощеної моделі ТФХ. Ця модель припускає існування матеріалу в двох станах – вихідному (фаза А) та відпаленому з повністю завершеними процесами перетворень (фаза Б), кожному з яких приписується свій набір ТФХ. Для визначення ТФХ матеріалу МФП-92 в його зразках в процесі теплових випробувань реєстрували температурні поля, які потім оброблювали з використанням методики рішення на комп'ютерній моделі зворотної (коефіцієнтної) задачі теплопровідності (ЗЗТ). В результаті отримували температурні залежності питомої теплоємності та коефіцієнту теплопровідності фаз А и Б, а також величину найбільш потужного теплового ефекту фазового переходу при 110 °C в фазі А. Інші фазові переходи враховували відповідними змінами питомої теплоємності. При випробуваннях матеріалу також визначено коефіцієнт випромінювання матеріалу. За температурними полями, отриманими при теплових випробуваннях зразків тришарового пакету теплового захисту «матеріал МФП-92-теплозахист-сталева підкладка» в умовах нагрівання за програмою експлуатаційного режиму була проведена верифікація двофазної моделі матеріалу МФП-92 та отриманих значень його ТФХ, яка підтвердила їх адекватність.

Ключові слова: багатофункціональне покриття; теплофізичні характеристики; вихідний та відпалений стани; високотемпературні випробування; моделювання.

THERMAL CHARACTERISTICS OF THE HEAT PROTECTION PACKAGE OF THE ENGINE BODY AT PROGRAMMED HEATING

Yu. Evdokimenko, I. Gusarova, G. Frolov, V. Kisel, D. Borovik, S. Buchakov

An experimental determination of the temperature dependences of the thermophysical characteristics of the MFP-92 multifunctional coating in the operating temperature range under thermal loading, simulating standard flight conditions, has been carried out. Heating was carried out with a jet of an industrial oxygen-propane burner mounted on a tripod with the possibility of varying the distance to the surface of the sample. The programs of the material operating modes include two peaks of heating to a temperature of ~1400 ° C with a heating and cooling rate of 20 - 40 deg / s. Under such conditions, thermal degradation of the MFP-92 material occurs, which changes its phase composition, structure, and, accordingly, thermophysical characteristics (TPC). The main transformations in the MFP-92 material occur in the temperature range up to 1000 °C, therefore, the heat transfer in it for given heating programs can be described using a simplified TPC model. This model assumes the existence of material in two states - initial (phase A) and annealed with completely completed transformation processes (phase B), each of which is assigned its own set of TPC. To determine the TPC of the MFP-92 material in its samples during thermal testing, temperature fields were recorded, which were then processed using the method of solving the inverse (coefficient) problem of thermal conductivity on a computer model. As a result, the temperature dependences of the specific heat and the coefficient of thermal conductivity of phases A and B were obtained, as well as the value of the most powerful thermal effect of the phase transition at 110 °C in phase A. The remaining phase transitions were taken into account by the corresponding changes in the specific heat. During material testing, the emissive of the material is also determined. Verification of the two-phase model of the MFP-92 material and the obtained values of its TPC was carried out based on the temperature fields obtained during the thermal tests of the samples of the three-layer thermal protection package "MFP-92 material-thermal insulation-steel substrate" under heating conditions according to the operating mode program confirmed their adequacy.

Keywords: multifunctional coating; thermophysical characteristics; initial and annealed states; high-temperature tests; modeling.

Евдокименко Юрий Игоревич – научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина.

Гусарова Ирина Александровна – канд. тех. наук, начальник отдела Государственного предприятия КБ «Южное», Днепр, Украина.

Фролов Геннадий Александрович – д-р техн. наук, зав. отделом Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина.

Кисель Вячеслав Михайлович – старший научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина.

Боровик Дмитрий Валериевич – младший научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина.

Бучаков Сергей Васильевич – младший научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина.

Yuri Yevdokimenko – researcher of Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: yevd@meta.ua, ORCID: 0000-0002-3344-798X.

Irina Gusarova - candidate of technical sciences, head of department of Yuzhnoye State Design Office named after M. K. Yangel, e-mail: iragusarova58@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6117-6953.

Gannadii Frolov – doctor of technical sciences, head of department of Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: g_frolov@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7045-310X; Scopus Author ID: 7006474853; https://scholar.google.com/citations?user=oxKC_dcAAAAJ.

Viacheslav Kysil – senior researcher of Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: vyacheslav.kysil@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5762-9227.

Dmitry Borovik –junior researcher of Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: dmitry_list@list.ru, ORCID: 0000-0003-4668-3778.

Sergiy Buchakov – junior researcher of Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: buchakovff.s@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5117-4823.