

A METHOD FOR DETERMINING THE CREEP THRESHOLD OF A PISTON MATERIAL TO EVALUATE THE PARAMETRIC RELIABILITY OF ITS SIDE SURFACE

O.U. Linkov, V.V. Pylyov, S.V. Lykov, V.O. Pylyov

The constant increase in the specific power of engines leads to the work of the materials that form the combustion chamber, on the verge of their strength and reduce the physical reliability of engine designs. The prediction of reliable operation of engine structural elements is becoming increasingly important and requires the availability of appropriate methods for such an assessment. The piston is taken as the most significant element of the combustion chamber. It works under large thermal loads and it is its surfaces that can work on the verge of reliability. The analysis of publications showed the relevance of the task due to the recorded cases of loss of the parametric reliability of the piston due to a number of reasons. To ensure the parametric reliability of the piston side surface, an additional criterion must be applied during design, which should take into account the value of the creep threshold of the material during operation. The work noted the specificity of aluminum alloys - a small duration of the first stage of creep. The study considers the scheme of deformation of the critical zone of the piston skirt when determining the creep threshold of the material according to the traditional method and taking into account the fact of the presence of the creep stage of the initial strengthening of the material. In the course of the study, differences in the results were established when taking into account the properties of non-hardened and hardened piston aluminum alloy AK12M2MgN due to creep. It is shown that the results of studies on the creep threshold of an unhardened aluminum alloy should be taken into account in assessing the parametric reliability of the side surface of pistons in forced engines. It is for this zone that the creep limit of the material differs most of all for the hardened and non-hardened material. The further direction of research is related to the determination of the creep threshold of other materials and the application of the obtained data in the criterion of parametric reliability.

Key words: internal combustion engine; piston; aluminum alloys; reliability; modeling; deformations; creep.

УДК 539.413

DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.11

Г.А. Фролов, Н.А. Ефимов, В.М. Кисель, Ю.И. Евдокименко, Д.В. Боровик, С.В. Бучаков

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ HVAF-ПОКРЫТИЯ ИЗ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Cu-Fe

В статье представлены результаты определения коэффициента теплопроводности квазикристаллических покрытий системы Al-Cu-Fe в диапазоне температур до 900 °С. Квазикристаллический сплав Al-Cu-Fe приобрел большой интерес для практического использования как материал для получения защитных покрытий. Сплав Al-Cu-Fe применяется для получения термобарьерных покрытий в двигателях внутреннего сгорания, антипригарных покрытий на оборудовании химического синтеза и пищевой промышленности, а также для предотвращения обледенения в авиации. Квазикристаллы системы Al-Cu-Fe имеют низкую плотность, высокую твердость, высокий модуль упругости, высокие значения коррозионностойкости и износостойкости, низкий коэффициент трения, пониженную адгезию, низкую теплопроводность в сочетании с коэффициентом теплового расширения, который близок по своей величине к некоторым металлам. Для напыления использовали порошок состава $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ дисперсностью +40/-63 мкм, полученный распылением расплава водой высокого давления и имеющий содержание квазикристаллической фазы около 60 вес. %. Покрытия наносили на торец цилиндрической подложки из стали 45 (диаметр – 25 мм, высота – 10 мм), который перед напылением подвергали струйно-абразивной обработке порошком корунда с определяющим размером частиц 1 мм при давлении распыляющего воздуха 0,5 МПа. Покрытие Al-Cu-Fe толщиной более 0,8 мм было нанесено методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления (high-velocity air-fuel (HVAF) spraying) с использованием горелки ГВО-РВ12 при следующем режиме напыления: давление в камере сгорания горелки 1,0 МПа; коэффициент избытка окислителя $\alpha \approx 1,2$, дистанция напыления – 270 мм. Образцы устанавливали на боковой поверхности барабана (диаметр 120 мм), вращающегося со скоростью 2,0 об/с (скорость перемещения пятна напыления – 0,8 м/с). Напыление производили в три захода по 10 секунд каждый и с выдержкой для охлаждения по 30 секунд между ними. Определение температурной зависимости теплопроводности покрытия проводили путем решения обратной задачи теплопроводности по одномерным полям температуры в образцах, полученных односторонним струйным нагревом промышленным факелом горячего воздуха (при температурах поверхности до 450 °С) и кислородно-пропановой сварочной горелки (при температуре выше 450 °С). Показано, что значения коэффициента теплопроводности квазикристаллических покрытий и Al-Cu-Fe в диапазоне 20 °С...900 °С изменяются в пределах $\lambda = 1,9 - 2,31$ Вт/(м·К).

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности; квазикристаллическое покрытие; тепловая защита; напыление.

Введение

Квазикристаллы (КК) – твердые тела со стопкой атомов, характеризующейся совершенным дальним порядком при отсутствии трансляционной симметрии и наличии вращательной симметрии с 5-, 8-,

10- или 12-кратными осями, запрещенными в кристаллическом веществе [1]. В настоящее время КК-фазы встречаются более чем в 100 системах, большинство из них - сплавы на основе алюминия.

Необычная упаковка атомов в ряде случаев

обеспечивает уникальное сочетание физических и химических свойств этих материалов. Часть КК были получены путем быстрой кристаллизации и оказались метастабильными, но существует ряд стабильных КК-фаз, например, в системе Al-Cu-Fe.

Квазикристаллический сплав Al-Cu-Fe приобрел большой интерес и для практического использования из-за сочетания свойств (низкая плотность, высокая твердость, высокий модуль упругости, высокие коррозионная и износостойкость, низкий коэффициент трения, пониженная адгезия, низкая теплопроводность в сочетании с высоким коэффициентом теплового расширения), которые близки по своему значению к некоторым металлам [2, 3].

КК фаза обладает электронными свойствами, наиболее близкими к кристаллическим материалам, и тепловыми свойствами, характерными для аморфных материалов [4]. В отличие от металлов, с повышением температуры электровосприимчивость КК капли растет. Для КК-фазы сплава Al-Cu-Fe характерны значения отношения плотности $\rho_{4K}/\rho_{300K} \sim 2-3$ [5]. Теплопроводность КК-сплава Al-Cu-Fe при комнатной температуре находится на уровне теплопроводности оксидной керамики ZrO_2 . Теплопроводность сплава Al-Cu-Fe изучали, как при низких [6], так и при высоких температурах [7]. Как было показано, теплопроводность этого сплава увеличивается с повышением температуры.

Таким образом, особенности электронной структуры определяют низкую электро- и теплопроводность квазикристаллов, что в сочетании с высокой твердостью позволяет использовать их в качестве тепловых барьеров.

Теплофизические свойства КК фазы системы Al-Cu-Fe: плотность $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$; предельная температура существования КК-фазы $T_{\max} \approx 880 \text{ }^\circ\text{C}$; значения коэффициента теплопроводности (КТп) в диапазоне $20 \text{ }^\circ\text{C} \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$ находится в диапазоне $1,6 - 8,6 \text{ Вт/(м К)}$; высокая твердость и низкая пластичность ($H_V = 10 \text{ ГПа}$ и $\epsilon < 2,5 \%$ соответственно при $20 \text{ }^\circ\text{C}$) сохраняются до $600 \text{ }^\circ\text{C}$; коэффициент термического расширения в диапазоне $20 \text{ }^\circ\text{C} \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$ изменяется в пределах $\alpha = (14 \dots 41) \cdot 10^{-6}$, что вызывает интенсивное растрескивание при охлаждении после литья или напыления [7].

В сложном сплаве КК-фазы энергии активации движения дислокаций очень велики (порядка нескольких эВ [8]), а температурная зависимость предела текучести в них очень сильная. Поэтому КК при низких температурах (Al-Cu-Fe ниже $600 \text{ }^\circ\text{C}$) не проявляют макропластичности. Благодаря указанным выше свойствам квазикристаллы весьма перспективны для применения в виде покрытий.

Перспективные области применения: теплозащитные покрытия для двигателей внутреннего сгорания, антипригарные покрытия на оборудовании химического синтеза и пищевой промышленности, антиобледенительные покрытия в авиации. Перспективность применения КК-покрытий в технических задачах, связанных с теплопереносом, определяется коэффициентом теплопроводности. В отличие от других теплофизических свойств, теплопроводность газотермических покрытий всегда ниже в разы или даже на порядок таковой монолитного материала из-за наличия в них множества внутренних границ (между отдельными нанесенными частицами и между напыленными слоями).

Материалы, образцы и технология нанесения покрытия

Для напыления использовали порошок КК-сплава состава $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ дисперсностью $+40/-63 \text{ мкм}$, полученный распылением расплава водой высокого давления и имеющий содержание КК-фазы около 60% .

Покрытия наносили на торец цилиндрической подложки из стали 45 (диаметр – 25 мм , высота – 10 мм), который перед напылением подвергали струйно-абразивной обработке порошком корунда с определяющим размером частиц 1 мм при давлении распыляющего воздуха $0,5 \text{ МПа}$.

Напыление производили методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления (ВВТН, HVAF-spraying) горелкой ГВО-РВ12, разработанной в Институте проблем материаловедения НАН Украины [9]. Воздушно-охлаждаемая горелка с расходом управлением параметрами двухфазного потока имеет газодинамический тракт общей длиной 310 мм (сверхзвуковая часть – 140 мм), диаметр сверхзвукового сопла 12 мм и использует в качестве горючего керосин.

Режим напыления: давление в камере сгорания горелки $1,0 \text{ МПа}$; коэффициент избытка окислителя $\alpha \approx 1,2$, дистанция напыления – 270 мм . Образцы устанавливали на боковой поверхности барабана (диаметр 120 мм), вращающегося со скоростью $2,0 \text{ об/с}$ (скорость перемещения пятна напыления – $0,8 \text{ м/с}$). Напыление производили в три захода по 10 секунд каждый и с выдержкой для охлаждения по 30 секунд между ними.

Для определения температурной зависимости КТп покрытия были подготовлены пять образцов, средняя толщина покрытия составила 820 мкм , средняя пористость – 4% . Покрытия имеют плотное прилегание к подложке, характерную для ВВТН-покрытий микроструктуру с небольшим количеством дефектов в виде разнонаправленных трещин длиной до 80 мкм . Содержание КК-фазы в покры-

тии, измеренное методом рентгенофазового анализа, составляет $(70 \pm 2)\%$. Адгезионная прочность покрытий, определённая клеевым методом $-(18 \pm 3)$ МПа.

Методика определения температурной зависимости коэффициента теплопроводности

Методика определения температурной зависимости КТп материалов газотермических покрытий основана на использовании математической модели процесса теплопереноса в плоской пластине при одностороннем нагреве, представляющей собой однородное одномерное уравнение теплопроводности. Модель реализована компьютерной программой «WarmingUp» для решения уравнения методом конечных элементов, которая позволяет по заданным зависимостям от времени температуры её нагреваемой поверхности $T_{\text{hot}}(\tau)$ и удельного теплового потока из тыльной («холодной») поверхности $q'_{\text{out}}(\tau)$, а также толщине пластины и её теплофизическим свойствам (плотности и температурным зависимостям удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности) определить зависимость от времени температуры её тыльной поверхности $T_{\text{cold}}(\tau)$.

В решаемой задаче Коши для уравнения теплопроводности исходная температура образца T_0 является начальным условием, температура $T_{\text{hot}}(\tau)$ и тепловой поток $q'_{\text{out}}(\tau)$ – граничными условиями 1-го и 2-го рода, соответственно.

При известной (экспериментально определенной или рассчитанной иным способом) температуре тыльной поверхности пластины $T_{\text{coldex}}(\tau)$ путем итерационного расчета программой «WarmingUp» можно определить любой неизвестный параметр из задаваемых в расчёте. Для этого он перед началом вычислений задается произвольной величиной, например, константой, затем рассчитанная по нему температура $T_{\text{cold}}(\tau)$ сравнивается с известной температурой $T_{\text{coldex}}(\tau)$ и производится коррекция определяемого параметра для достижения их совпадения. Процесс последовательных итераций при уточняемых на каждом шаге значениями неизвестного параметра продолжается до совпадения температур $T_{\text{cold}}(\tau)$ и $T_{\text{coldex}}(\tau)$ с заданной точностью на протяжении всего времени нагрева. Среднее квадратичное отклонение этих температур на уровне $3 - 5$ °C является вполне достаточным, т. к. оно соответствует точности измерения самих температур.

Итерационный процесс определения любого из задаваемых в программе «WarmingUp» неизвестного параметра проводится автоматически специальной управляющей программой, и занимает не более 10 минут.

Определение таким образом искомой температурной зависимости КТп материала пластины (функции $\lambda(T)$) является вариантом широко приме-

няемого метода её определения путем решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ).

В образцах покрытий на подложках технически сложно экспериментально определить температуру на границе между ними, поэтому расчет проводится в два этапа: на первом определяются тепловые условия на границе покрытие-подложка, на втором методом решения ОЗТ находится искомая температурная зависимость КТп покрытия – функции $\lambda_{\text{coat}}(T)$.

Задачей первого этапа расчета является определение температуры границы «покрытие-подложка» $T_{\text{cold2}}(\tau) = T_{\text{hot1}}(\tau)$ в процессе нагрева (далее индекс 1 относится к подложке, индекс 2 – к покрытию) и удельного теплового потока через неё $q'_{\text{out2}}(\tau)$. Исходными данными для неё являются определенные экспериментально удельный тепловой поток из тыльного торца подложки $q'_{\text{out1}}(\tau)$ (граничное условие) и температура $T_{\text{coldlex}}(\tau)$, с которой производится сравнение расчетной температуры $T_{\text{cold1}}(\tau)$. Теплофизические свойства материала подложки (стали 45) – плотность и температурные зависимости удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности – взяты из электронного «Матрицы сталей и сплавов» [10].

Перед началом расчета искомая температура $T_{\text{hot1}}(\tau)$ задается произвольной кривой, возрастающей от начального значения T_0 , и по ней рассчитывается температура тыльной поверхности подложки $T_{\text{cold1}}(\tau)$, которая сравнивается с экспериментально измеренной температурой $T_{\text{coldlex}}(\tau)$. В дальнейшем итерационном процессе проводится корректировка зависимости $T_{\text{hot1}}(\tau)$ до совпадения сравниваемых температур с заданной точностью. В последней итерации определяется удельный тепловой поток в подложку $q'_{\text{out2}}(\tau)$.

Задачей второго этапа расчета является определение температурной зависимости КТп материала КК-покрытия $\lambda_{\text{coat}}(T)$, являющейся корректируемым в итерационном процессе параметром. Граничным условием на нагреваемой поверхности покрытия является экспериментально определенная температура $T_{\text{hot2ex}}(\tau)$, определенные на первом этапе удельный тепловой поток через границу покрытия с подложкой $q'_{\text{out2}}(\tau)$ и температура на ней $T_{\text{hot1}}(\tau) = T_{\text{hot2ex}}(\tau)$ являются, соответственно, граничным условием на тыльной стороне покрытия и функцией, сравниваемой с расчётной в итерационном процессе.

В данном исследовании экспериментальные температурные поля в образце получали при одностороннем нагреве струей промышленного фена (компания «Bosch», ФРГ) с температурой воздушного потока 660 °C и диаметром сопла 22 мм (при температурах поверхности до 450 °C) и факелом сва-

рочной кислородно-пропановой горелки (при более высоких температурах). Необходимость использования двух источников нагрева вызвана засветкой пирометров факелом горелки при температурах менее 450 °С, что вызывает невозможность точного определения температуры поверхности на начальном этапе нагрева.

Конструктивная схема экспериментальной модели с образцом и внешний вид её нагреваемой поверхности показаны на рис. 1, а и б, соответственно.

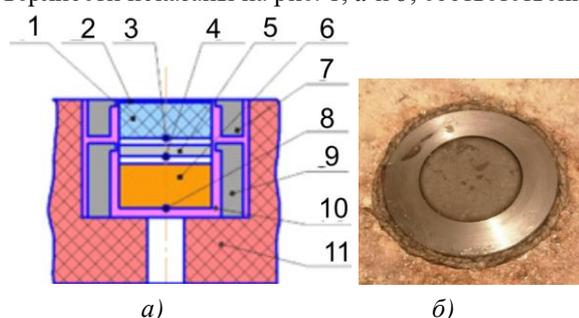


Рис. 1. Конструктивная схема экспериментальной модели (а): 1 – подложка образца, 2 – покрытие на образце, 3 – ТЭП образца, 4 – теплоприёмник №1, 5 – ТЭП теплоприёмника №1; 6 – теплоприёмник №2; 7 – ТЭП теплоприёмника №2, 8 – обойма образца, 9 – обойма датчика, 10 – теплоизоляция; 11 – шамотный корпус; внешний вид нагреваемой поверхности (без зачернения поверхности) (б)

Удельный тепловой поток из тыльной поверхности образца измеряется двухслойным датчиком теплового потока, состоящим из двух теплоприемников, последовательно установленных с воздушным зазором между ними. Диаметр теплоприёмников 25 мм; теплоприёмник №1 изготовлен из стали 12Х18Н9Т (высота 3 мм); теплоприёмник №2 – из меди М1 (высота 12 мм) В центре тыльной поверхности каждого датчика зачеканены спаи термоэлектрических преобразователей (ТЭП) – термопар типа К (диаметр проволоки 0,2 мм). Такой же ТЭП устанавливался в центре тыльного торца подложки образца. Одномерная модель, используемая в расчете, предполагает равномерный нагрев поверхности образца и отсутствие теплообмена через его боковые поверхности. Для ограничения теплопередачи в радиальном направлении образец и датчик теплового потока помещали в обоймы из нержавеющей стали, которую теплоизолировали асбестовой нитью, и всю экспериментальную модель размещали в корпусе из высокопористого шамота.

Экспериментальную модель с образцом устанавливали соосно под феном или горелкой на расстоянии, обеспечивающем требуемый уровень стабилизации температуры поверхности – 35 мм и 180 мм, соответственно.

В процессе экспериментов температуру в центре нагреваемого торца образца измеряли двумя пирометрами, установленными на расстоянии 1,4 м от поверхности под углом 20° к нормали. Характеристики пирометра № 1 – INFRATHERM Converter IGA 100 (IMPAC Electronic Gmb, ФРГ): диапазон измеряемых температур 350...1800 °С; длина волны $\lambda = 1,45...1,8$ мкм; возможный коэффициент излучения $\epsilon = 0,2...1,0$; ошибка измерений при температурах до 1500 °С не превышает 0,3 %. Характеристики пирометра № 2 – пирометр-регистратор USB FLUS IR-863U (КНР): рабочий диапазон -50 ~ 1650 °С; отношение расстояния до объекта к ширине пучка (D:S) – 50:1; максимальная частота измерений – 4 Гц; точность измерений в диапазоне до 500 °С – 1,0 % ±1 °С, в диапазоне 500 ~ 1650 °С – 1,5 % ±2 °С.

Нагреваемую поверхность образцов покрытий зачерняли сажей и принимали её коэффициент излучения равным $\epsilon = 0,93$.

Перед началом эксперимента нагреваемую поверхность экспериментальной модели надежно теплоизолировали тепловым экраном, после выхода источника нагрева на рабочий режим экран быстро убирали, фиксируя время начала нагрева образца.

Запись показаний пирометров и ТЭП производилась на персональный компьютер с частотой измерений 1 Гц, во втором случае – специальной программой обработки данных через аналоговый преобразователь АКОН-Т.

Из записей показаний пирометров получали функцию зависимости температуры поверхности от времени $T_{hot2ex}(\tau)$, которую сглаживали аппроксимацией полиномом до 9-ой степени, используя программный пакет для численного анализа данных и научной графики «Origin».

Кривые температур датчиков также аппроксимировали полиномами для сглаживания их производных, определяющих значения и динамику тепловых потоков в них и, соответственно, теплового потока из образца. На основании сглаженных кривых температур датчиков $T_{dat1}(\tau)$ и $T_{dat2}(\tau)$ рассчитывались удельные тепловые потоки:

$$q'_{dat i} = T'_{dat i}(\tau) m_i C_{pi}(T) / S_i,$$

где индекс i – номер теплоприемника; m_i , $C_{pi}(T)$, S_i – масса, удельная теплоемкость и площадь нагреваемой поверхности датчика, соответственно. Общий тепловой поток из тыльной стороны подложки находился по формуле:

$$q'_{outlex} = q'_{dat 1} + q'_{dat 2}$$

Температурную зависимость удельной теплоёмкости $C_{pec}(T)$ КК – сплава состава Al-Cu-Fe, необходимую для расчета КТп, в диапазоне температур 20 – 500 °С определяли прибором ИТ-с-400 [11],

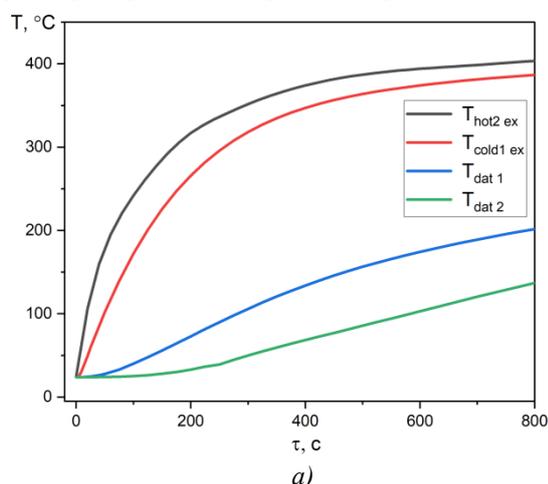
полученную функцию аппроксимировали полиномом. Эта зависимость приведена в табл. 1.

Таблица 1. Принятая в расчёте зависимость удельной теплоёмкости КК-сплава от температуры

Температура, °С	20	100	300	500	700	850
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)	676	702	762	811	851	874

С учетом пористости покрытия 4 % его плотность принималась равной $\rho_{cc} = 4,32 \text{ г/см}^3$.

На каждом образце проводили по два цикла струйного нагрева: в первом поверхность покрытия нагревали до 400 °С струёй воздуха с температурой 650 °С из промышленного фена, во втором – до 850 °С факелом сварочной кислород-пропановой горелки. По температурному полю, записанному в первом цикле, по описанной методике определяли КТп покрытия в диапазоне от комнатной температуры до 400 °С. Во втором цикле из-за засветки пирометров факелом сварочной горелки эту темпера-



туру в диапазоне до 400 °С определяли по уже известным значениям коэффициента теплопроводности, температуры границы покрытия с подложкой и теплового потока через эту границу.

В последующих итерациях значения КТп варируют таким образом, чтобы обеспечить максимально «гладкую» стыковку рассчитываемой температуры с записанной в эксперименте при $T_{\text{hot2ex}}(\tau) > 500 \text{ °С}$. После этого по описанной выше методике определяли значения $\lambda_{\text{coat}}(T)$ при температурах выше 500 °С.

Результаты экспериментального определения температурной зависимости КТп квазикристаллических покрытий состава Al-Cu-Fe

На трёх образцах покрытий (образцы № 1, № 2, № 3) были проведены по два измерения (цикла нагрева) – при низкотемпературном нагреве феном (рис. 2, а) и при высокотемпературном нагреве кислород-пропановой горелкой (рис. 2, б)

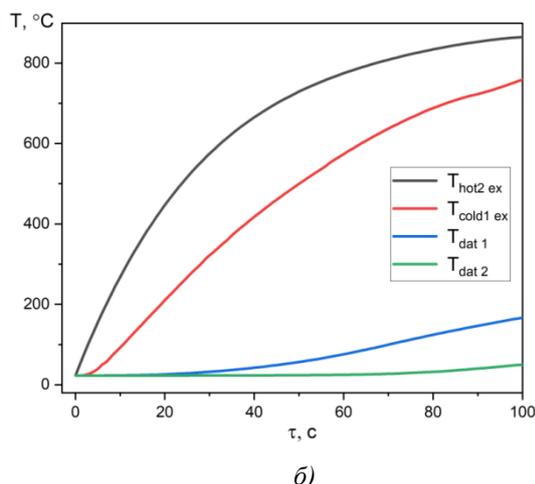


Рис. 2. Температурные поля в экспериментальной модели (образец № 1): а – нагрев феном; б – нагрев горелкой

На рисунке 2 показаны приготовленные для расчета температурные поля, полученные на образце № 1 при низкотемпературном (а) и высокотемпературном (б) видах нагрева.

На графиках представлены зависимости от времени температур нагреваемой поверхности $T_{\text{hotex2}}(\tau)$, тыльной поверхности подложки $T_{\text{coldex1}}(\tau)$, а также температуры датчиков теплового потока $T_{\text{dat1}}(\tau)$ и $T_{\text{dat2}}(\tau)$. Рассчитанные по ним величины удельных тепловых потоков из образца показаны на рис. 3.

Определенные по всем шести полученным температурным полям (по две для каждого образца) температурные зависимости коэффициента теплопроводности покрытий $\lambda_{\text{coat}m}(T)$, где m – номер образца, n – номер цикла нагрев образца, показаны на

рис. 4. Там же показана средняя по всем полученным зависимостям $\lambda_{\text{coat}}(T)$, принимаемая за искомую температурную зависимость КТп квазикристаллического покрытия состава Al-Cu-Fe. Значения этой зависимости приведены в табл. 2.

Таблица 2. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности HVAF-покрытия из КК-сплава состава Al-Cu-Fe

Температура, °С		20	100	300	500	700	850
КТп, Вт/(м ⁻¹ К ⁻¹)	Среднее	1,89	1,91	1,96	2,03	2,09	2,15
	макс. зн.						

При высокотемпературном нагреве в интервале температур до 400 °С расхождение температурных

зависимостей КТп имеет тот же характер, хотя и несколько большую величину (до 11 %). С дальнейшим ростом температуры разброс значений КТп покрытий на различных образцах увеличивается (до 27 % при 850 °С), при этом при температурах более

650 °С зависимости имеют различный вид: значения КТп покрытия образца № 1 начинают снижаться; покрытий образцов № 2 и № 3 растут с различной интенсивностью.

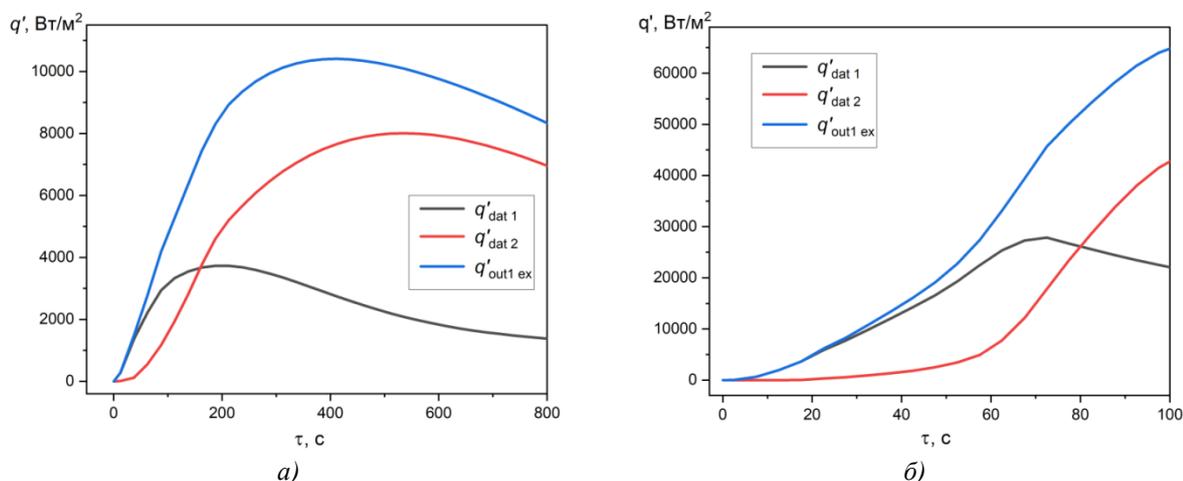


Рис. 3. Тепловые потоки датчиков № 1 и № 2 (q'_{dat1} и q'_{dat2} , соответственно) и тепловой поток с тыльной стороны подложки $q'_{out1 ex}$: а – нагрев феном; б – горелкой

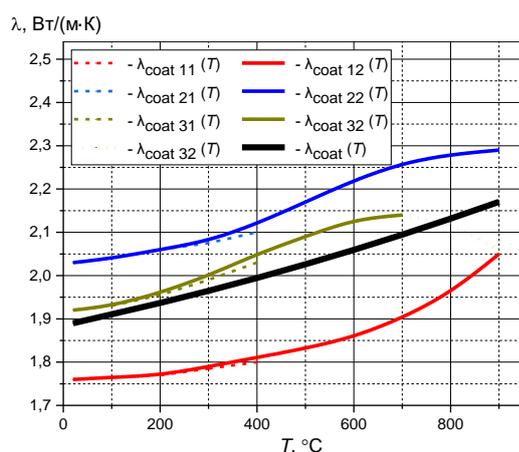


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента теплопроводности покрытий образцов № 1 - № 3 при различных видах нагрева и усредняющая их зависимость $\lambda_{coat}(T)$

Учитывая частичное отслоение покрытия № 1 от подложки в процессе дальнейшего охлаждения, можно предположить, что снижение его КТп вызывается ослаблением контакта покрытия с подложкой в результате растрескивания под воздействием термомеханических напряжений в следствие разности их коэффициентов термического расширения. Различие значений КТп, полученных на различных образцах, вероятно, вызвано различным количеством дефектов в покрытии и на границе «покрытие-подложка»: чем их больше, тем ниже определяемое значение КТп. Таким образом, значения

коэффициента теплопроводности собственно самого покрытия в наибольшей степени характеризуются максимальными значениями, полученными на отдельных образцах.

Выводы

1. Разработана методика определения температурной зависимости коэффициента теплопроводности газотермических покрытий, основанная на решении обратной задачи теплопроводности в условиях одностороннего нагрева.

2. По этой методике определена температурная зависимость коэффициента теплопроводности HVOF-покрытия из сплава состава $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$, с содержанием квазикристаллической ψ фазы (70 ± 2) %. В диапазоне температур 20...850 °С средние значения КТп КК-покрытия, определенные по трём образцам, монотонно возрастают от $\lambda_{coat} = 1,9$ $W/(m \cdot K)$ до $\lambda_{coat} = 2,05$ $W/(m \cdot K)$.

3. Значения коэффициента теплопроводности, полученные на различных образцах, значительно отличаются друг от друга (до 25 %), что можно объяснить неоднородностью структуры покрытий и различным качеством контакта покрытия с подложкой.

Список литературы:

1. Dubois J.-M. Introduction to Quasicrystals. – Berlin: Springer Verlag, 1998. – 392 p.
2. Sordelet D.J. Effect of starting powders on the control of microstructural development of Al-Cu-Fe quasicrystalline plasma-sprayed coatings /

D.J. Sordelet, M.J. Kramer, O. Unal // *J. Thermal Spray Techn.* – 1995. – 4, No. 3. – P. 235-244. 3. Dubois J.-M. Quasicrystalline coatings with reduced adhesion for cookware / J.-M. Dubois., A. Proner., B. Bucaille et al // *Ann. Chim. Fr.* – 1994. – 19. – P. 3-25. 4. Pope, A.L., Tritt, T.M. (2004). *Thermal Conductivity of Quasicrystalline Materials*. In: Tritt, T.M. (eds) *Thermal Conductivity. Physics of Solids and Liquids*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-26017-X_11. 5. Berger C. “Anti” metallic properties of quasicrystals / C. Berger, D. Mayou, F. Cyrot-Lackmann // C. Janot, R. Mosseri (Eds.), *Proc. Of the 5th Internat. Conf. on Quasicrystals*, Singapore: World Scientific. – 1996. – P. 423-430. 6. Bilušić, A. *Thermal and thermoelectric properties of icosahedral Al₆₂Cu_{25,5}Fe_{12,5} quasicrystal* / A. Bilušić, A. Smontara, J.C. Lasjaunias, J. Ivkov, Y. Calvayrac. *Materials Science and Engineering* 294–296 (2000) 711–714. 7. Dubois J.-M. *Useful Quasicrystals*. World Scientific / J.-M. Dubois, – 2005. – 482 p. 8. Feuerbacher M., *The plasticity of icosahedral quasicrystals* / M. Feuerbacher, C. Metzmacher, M. Wollgarten et al. // *Mater. Sci and Eng.* – 1997. – A233, P. 103-110. 9. Evdokimenko Yu. *Burner for High-Velocity Air-Fuel Spraying of ZrB₂ Based Coatings for Aerospace Technics* / Yu. Evdokimenko, V. Kysel, G. Frolov et al. // “Space Research In Ukraine 2014-2016” Report to COSPAR. Scientific Editor O. Fedorov. – Kyiv. – Akadempereodyka. – 2016. – P.114-117. 10. Марочник стали и сплавов. Электронный справочник / www.splav-kharkov.com/. 11. Волков, Д.П. Приборы и методы для измерения теплофизических свойств веществ / Д.П. Вол-

ков, В.А. Кораблев, Ю.П. Заричняк: метод. Указ. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 66 с.

Bibliography (transliterated):

1. Dubois, J.-M. (1998) “Introduction to Quasicrystals”, Springer Verlag Berlin, 392 p. 2. Sordelet D.J., Kramer M.J, Unal O. (1995) “Effect of starting powders on the control of microstructural development of Al-Cu-Fe quasicrystalline plasma-sprayed coatings”, *J. Thermal Spray Techn.*, No. 3-4, pp. 235-244. 3. Dubois J.-M., Proner A., Bucaille B. Et al (1994) “Quasicrystalline coatings with reduced adhesion for cookware”, *Ann. Chim. Fr.*, No. 19, pp. 3-25. 4. Pope, A.L., Tritt, T.M. (2004) “Thermal Conductivity of Quasicrystalline Materials”, *Thermal Conductivity. Physics of Solids and Liquids*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-26017-X_11. 5. Berger C. D., Mayou F. Cyrot-Lackmann (1996) “Anti” metallic properties of quasicrystals”, *Proc. Of the 5th Internat. Conf. on Quasicrystals*, Singapore: World Scientific, pp. 423-430. 6. Bilušić, A., A. Smontara, J.C. Lasjaunias, J. Ivkov, Y. Calvayrac (2000) “Thermal and thermoelectric properties of icosahedral Al₆₂Cu_{25,5}Fe_{12,5} quasicrystal”, *Materials Science and Engineering* 294–296, pp. 711–714. 7. Dubois J.-M. (2005) “Useful Quasicrystals”, World Scientific, 482p. 8. Feuerbacher M., Metzmacher C., Wollgarten M. et al. (1997) “The plasticity of icosahedral quasicrystals”, *Mater. Sci and Eng.*, A233, pp. 103-110. 9. Evdokimenko Yu, Kysel V., Frolov G. et al. (2016) “Burner for High-Velocity Air-Fuel Spraying of ZrB₂ Based Coatings for Aerospace Technics”, *Space Research In Ukraine 2014-2016, Report to COSPAR. Scientific Editor O. Fedorov*, pp. 114-117. 10. *Marochnik stali i splovov. Elektronnyy spravochnik* / www.splav-kharkov.com/. 11. Volkov D.P., Korablev V.A., Zarichnyak YU.P. (2006) *Devices and methods for measuring the thermophysical properties of substances [Pribory i metody dlya izmereniya teplofizicheskikh svoystv veshchestv]*, metod. ukaz., 66 p.

Поступила в редакцію 10.06.2022 г.

Фролов Геннадий Александрович – доктор технических наук, зав. отделом Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: g_frolov@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0001-7045-310X>.

Ефимов Николай Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий отделом Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: n.efimov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4866-1321>.

Кисель Вячеслав Михайлович – старший научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: vyacheslav.kysil@gmail.com; <http://orsid.org/0000-0002-5762-9227>

Евдокименко Юрий Игоревич – научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: yevd@meta.ua; <http://orsid.org/0000-0002-3344-798X>.

Боровик Дмитрий Валериевич научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: dmitry_list@list.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4668-3778>.

Бучаков Сергей Васильевич – научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: buchakovff.s@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-5117-4823>.

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ HVAF-ПОКРИТТЯ З КВАЗИКРИСТАЛІЧНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Al-Cu-Fe

Г.О. Фролов, М.О. Єфімов, В.М Кисель, Ю.І. Євдокименко, Д.В. Боровик, С.В. Бучаков

У статті наведено результати визначення коефіцієнта теплопровідності квазікристалічних покриттів системи Al-Cu-Fe в діапазоні температур до 900 °С. Квазікристалічний сплав Al-Cu-Fe набув великого інтересу для практичного використання як матеріал для отримання захисних покриттів. Сплав Al-Cu-Fe застосовується для отримання термобар'єрних покриттів у двигунах внутрішнього згорання, антипригарних покриттів на обладнанні хімічного синтезу та харчової промисловості, а також для запобігання зледеніння в авіації. Квазікристали системи Al-Cu-Fe мають низьку щільність, високу твердість, високий модуль пружності, високі значення корозійної стійкості та зносостійкості, низький коефіцієнт тертя, знижену адгезію, низьку теплопровідність у поєднанні з коефіцієнтом теплового розширення, який близький за своєю величиною до деяких металів. Для наплення використовували порошок сплаву складу Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂ дисперсною +40/-63 мкм, отриманий розпиленням розплаву водою високого тиску і вміст квазікристалічної фази близько 60 ваг. %. Покриття наносили на торець циліндричної підкладки зі сталі 45 (діаметр – 25 мм, висота – 10 мм), який перед напилуванням піддавали струминно-абразивної обробки порошком корунду з визначальним розміром частинок 1 мм при тиску повітря, що розпилює, 0,5 МПа. Покриття Al-Cu-Fe товщиною понад 0,8 мм було нанесено методом високошвидкісного повітряно-паливного наплення (high-velocityair-fuel (HVAF) spraying) з використанням пальника ГВО-РВ12 при наступному режимі наплення: тиск у камері згорання пальника 1,0 МПа; коефіцієнт надлишку окислювача α ≈ 1,2, дистанція наплення – 270 мм. Зразки встановлювали на бічній поверхні барабана (діаметр 120 мм), що обертається зі швидкістю 2,0 об/с (швидкість переміщення плями наплення – 0,8 м/с). Наплення виконували в три заходи по 10 се-

кунд кожен і з витримкою для охолодження по 30 секунд між ними. Визначення температурної залежності теплопровідності покриття проводили шляхом вирішення зворотного завдання теплопровідності за одновірними полями температури у зразках, отриманих одностороннім струминним нагріванням промисловим факелом гарячого повітря (при температурах поверхні до 450 °C) і киснево-пропанового зварювального пальника (при температурі вище). Показано, що значення коефіцієнта теплопровідності квазікристалічних покриттів Al-Cu-Fe в діапазоні 20 °C...900°C змінюються в межах $\lambda=1,9-2,31$ Вт/(м·К).

Ключові слова: коефіцієнт теплопровідності; квазікристалічне покриття; тепловий захист; напильнення

ТHERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE HVOF COATING FROM QUASICRYSTALLINE ALLOY OF THE Al-Cu-Fe SYSTEM

G.A. Frolov, M.O. Iefimov, V.M. Kisel, Yu.I. Evdokimenko, D.V. Borovik, S.V. Buchakov

The article deals with the results of determining the thermal conductivity coefficient from quasicrystalline coatings of the Al-Cu-Fe system in the temperature range up to 900 °C. The Al-Cu-Fe quasicrystalline alloy acquires a great interest for practical use as a material for protective coatings. The Al-Cu-Fe alloy is used to produce thermal barrier coatings in internal combustion engines, non-stick coatings on chemical synthesis equipment and in the food industry and to prevent the icing in aviation. The Al-Cu-Fe quasicrystals have low density, high hardness, high elasticity modulus, high values of corrosion resistance and wear resistance, low coefficient of friction, lowered adhesion, low thermal conductivity in combination with the coefficient of thermal expansion, which is close by its value to some metals. The water atomized $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ powder with a dispersion of +40/-63 μ m that has a content of the quasicrystalline phase of about 60 wt. % was used for spraying. The coating was sprayed to the butt of a cylindrical substrate from steel 45 (diameter – 25 mm, height – 10 mm), which before spraying was subjected to jet-abrasive treatment by corundum powder with a determining particle size of 1 mm at air pressure of spraying of 0.5 MPa. The Al-Cu-Fe coating with a thickness of more than 0.8 mm was made by high-speed air-fuel (HVOF) spraying using a burner GVO-RV12 with the following spraying mode: the pressure in the combustion chamber of the burner is 1.0 MPa; the oxidant excess coefficient $\alpha \approx 1.2$, the spraying distance is 270 mm. The samples were installed on the side surface of the drum (diameter 120 mm), which rotates at a speed of 2.0 rev/s (the speed of movement of the sputtering spot is 0.8 m/s). Spraying was done in three steps of 10 seconds each with a 30 second cooling time between them. Determination of the temperature dependence of the thermal conductivity of the coating was carried out by solving the inverse problem of thermal conductivity by one-dimensional temperature fields in samples obtained by single-sided jet heating with an industrial hot air torch (at surface temperatures up to 450 °C) and an oxygen-propane welding torch (at temperatures above 450 °C). It is shown that the values of the thermal conductivity coefficient of Al-Cu-Fe quasicrystalline coatings in the range of 20 °C...900 °C vary within $\lambda = 1.9 - 2.31$ W/(m·K).

Key words: thermal conductivity coefficient; quasicrystalline coating; thermal protection; spraying.