

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 7. С. 313–320
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 7, pp. 313–320

Научная статья

УДК 536.2

URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185841>

EDN: <https://www.elibrary.ru/FMFXP0>

Исследование теплопроводности оксидного покрытия, сформированного на материале подложки AlSiMg

А.Д. Ежов^{1✉}, М.С. Шилов², В.П. Киселев³, М.С. Еремкина⁴, Е.В. Светличная⁵

^{1,2,3,4,5}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация

¹ezzhov@gmail.com✉

Аннотация. В данной работе описаны экспериментальная установка, методы обработки данных для исследования теплопроводности керамического покрытия на основе оксида алюминия, выращенного на подложке из алюминиевого сплава AlSiMg методом микродугового оксидирования. Подробно описана математическая модель, лежащая в основе обработки данных, получаемых в ходе эксперимента. Были рассмотрены допущения модели на предмет их корректности по отношению к точности получаемого результата. Затронута тема контактного термического сопротивления, возникающего при контакте образца с элементами установки. Приведены результаты значений теплопроводности как оксидного покрытия, так и подложки из сплава AlSiMg.

Ключевые слова: керамика на основе оксида алюминия, твердый оксид алюминия, теплопроводность, сплав AlSiMg

Для цитирования. Ежов А.Д., Шилов М.С., Киселев В.П., Еремкина М.С., Светличная Е.В. Исследование теплопроводности оксидного покрытия, сформированного на материале подложки AlSiMg // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 7. С. 313–320. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185841>

Original article

Study of thermal conductivity of oxide coating formed on AlSiMg substrate material

A.D. Ezhov^{1✉}, M.S. Shilov², V.P. Kiselev³, M.S. Eremkina⁴, E.V. Svetlichnaya⁵

^{1,2,3,4,5}Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

¹ezzhov@gmail.com✉

Abstract. This paper describes the experimental setup and data processing methods for studying the thermal conductivity of a ceramic coating based on aluminum oxide grown on an aluminum alloy AlSiMg substrate using the microarc oxidation method. The mathematical model underlying the processing of data obtained during the experiment is described in detail. The model assumptions were considered for their correctness in relation to the accuracy of the result obtained. The topic of contact ther-

mal resistance arising when the sample contacts the elements of the setup is touched upon. The results of the thermal conductivity values of both the oxide coating and the AlSiMg alloy substrate are presented.

Keywords: alumina ceramics, solid alumina, thermal conductivity, AlSiMg alloy

For citation. Ezhov A.D., Shilov M.S., Kiselev V.P., Eremkina M.S., Svetlichnaya E.V. Study of thermal conductivity of oxide coating formed on AlSiMg substrate material. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 7, pp. 313–320. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185841>

Введение

Нанесение на рабочую поверхность изделий покрытия является одним из наиболее эффективных технологических способов повышения надежности и производительности конструкции. Покрытия характеризуются конечной толщиной, структурно-фазовым состоянием и химическим составом [1]. Технологии поверхностной инженерии и покрытий сосредоточены на удовлетворении проектных целей, надежность покрытия определяется долговечностью и ремонтопригодностью. Интерес представляют многофункциональные покрытия, которые помимо выполнения одной задачи, например защиты изделия от коррозии или воздействия ионизирующего излучения, повышают различные характеристики механизма.

В настоящее время остается актуальным использование многофункциональных покрытий в качестве пассивных методов тепловой защиты. Такие термобарьерные покрытия (ТБП) изготавливаются из низкотеплопроводных керамик. В работе [2] изучается влияние толщины термобарьерного покрытия из цирконата лантана с теплопроводностью 1,2 Вт/м, нанесенного на головку цилиндра дизельного поршневого ДВС. Опыты на двигателе YC6K показали, что при толщине покрытия 1 мм разница температур составляет порядка 300 °C (см. рис. 1). Авторы работы приходят к выводам, что нанесение ТБП не только защищает от высокотемпературной коррозии, но и увеличивает производительность двигателя

В качестве ТБП можно использовать керамику на основе оксида алюминия, наносимую на детали, изготовленные из алюминиевых сплавов AlSiMg, с использованием метода микродугового оксидирования [3, 4]. Обрабатываемая поверхность помещается в электролит, в котором с помощью серии электрических импульсов формируется покрытие из элементов материала

поверхности и элементов, содержащихся в электролите. На рис. 2 представлен срез оксидного покрытия, полученный в работе [5] путем фотографирования с микроскопа.

Для проектирования термобарьерных покрытия на основе керамики в связи с существенным различием в значениях теплопроводности и коэффициента термического расширения необходим термо-прочностной расчет пары деталь-покрытие [6]. При этом даже оценочный расчет требует знаний теплофизических свойств наносимого оксидного покрытия.

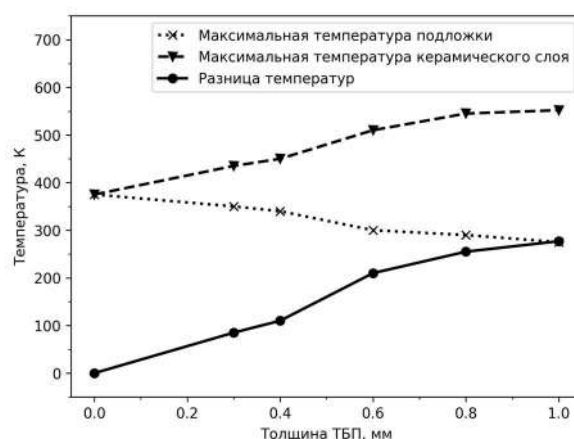


Рис. 1. Расчеты температуры для покрытия на ДВС [2]

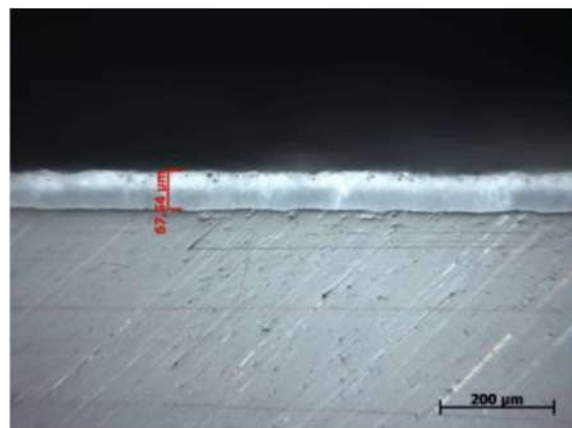


Рис. 2. Микрофотография поперечного среза покрытия [5]

Экспериментальный стенд

Конструктивная схема экспериментального стенда для измерения теплопроводности представлена на рис. 3 а. Стенд состоит из силовой рамы 1, механической нагрузки 2, электрической нагревательной катушки 3, намотанной на медный нагреватель 4, изоляции 5 из стекловаты, образца 6, медного холодильника 7, закрепленного в теплоизолированную пластину 8 и охлаждаемого жидкостным охлаждением 9, а также из тензодатчика 10. Теплота от холодильника отводится жидкостными трубами и в дальнейшем снимается вентиляторами.

Для уменьшения термического контактного сопротивления в процессе измерений, между нагревателем, холодильником и образцом используется теплопроводящая паста (термопаста) «КПТ-8» [7]. Образцы представляют из себя цилиндры из исследуемого материала, на один из которых нанесено керамическое покрытие. Фотографии образцов представлены на рис. 4 а – подложки (без покрытия), 4 б – с покрытием.

В качестве датчиков температуры используются термопары типа К (хромель-алюмель) [8], холодные спаи которых прикреплены к водяному охлаждению. На стенде имеются 10 термопар, отмеченные на рис. 3 а. как «ТПi». Датчик давления – тензодатчик К-Б-10А (К1102660) 50kg [9].

Функциональная схема стенда представлена на рис. 3 б. Электрический ток через блок питания БП распределяется между силовой частью стенда и контролирующей и вычислительной аппаратурой. Через выключатель запитываются насос Н для прокачки жидкого теплоносителя, а также вентиляторы для съема тепла с жидкости. Электрический обогрев нагревателя регулируется с помощью потенциометра. Показания с термопар через аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) поступают через микроконтроллер на базе процессора «АТmega328», в ЭВМ. Показания с датчика давления таким же образом поступает на ЭВМ. Микроконтроллер передает показания с термопар в виде температур горячего $T_{гр, i}^{спай}$ и холодного $T_{хол, i}^{спай}$ спаев. ЭВМ фиксирует зависимость температуры спаев от времени для всех 10 установленных термопар.

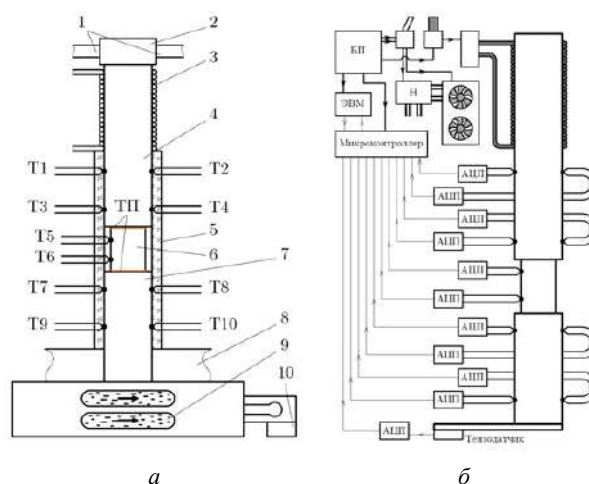


Рис. 3. а – Конструктивная схема экспериментального стенда. б – Функциональная схема экспериментальной установки



Рис. 4. а – Фотография образца подложки, б – фотография образца с покрытием

Микрорельеф поверхности исследуется с использованием профилометра «SurfTest Mitutoyo» [10]. В результате имеем профилограмму исследуемой поверхности и расчетные значения шероховатости R_a [11]:

$$R_a = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |y_i|,$$

где y_i – отклонение профиля от средней линии, N – количество расчетных точек на базовой длине. Результаты расчета R_a сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Данные о шероховатости поверхности

Образец	Обработка поверхности	R_a , мкм	ε_{R_a} , %
Подложка	–	0,5	1,8
Подложка	Шлифовка	0,14	6,4
Керамика	–	9,5	0,1
Керамика	Шлифовка	6	0,15

Обработка данных

Для определения теплопроводности рассматривается распределение температуры в экспериментальном участке для стационарного случая. Для этого выделялся стационарный участок

на диаграмме зависимости показаний термопар от времени, по времени равный ≈ 200 с. Будем обозначать размером h – высоту образца, l_1 и l_2 – расстоянием установки 5-й и 6-й термопар соответственно от краев образца. Размеры $\Delta_{ip}^{\text{нагр}}$ и $\Delta_{ip}^{\text{хол}}$ – расстояния между термопарами на нагревателе и холодильника соответственно:

$$\Delta_{ip}^{\text{нагр}} = \Delta_{ip}^{\text{хол}} = \Delta_{ip} = 25 \text{ мм.}$$

Размеры $d_{\text{обр}}$ – диаметр образца, $d_{\text{нагр}}$ и $d_{\text{хол}}$ – диаметры нагревателя и холодильника соответственно:

$$d_{\text{нагр}} = d_{\text{хол}} = d = 30 \text{ мм.}$$

Теплопроводность образца без покрытия определяется в приближении однослойной плоской стенки, так как боковые поверхности изолированы, что исключает существенное отклонение градиента температуры от прямолинейного направления. Тогда теплопроводность образца λ :

$$\lambda(\bar{T}_{ip}) = \frac{q}{(T_{ip,1}^{\text{обр}} - T_{ip,2}^{\text{обр}})} \times \Delta_{ip}^{\text{обр}}, \quad (1)$$

где $T_{ip,1}^{\text{обр}}$, $T_{ip,2}^{\text{обр}}$ – показания 5-й и 6-й термопар (см. рис. 2 а), $\Delta_{ip}^{\text{обр}} = h - l_1 - l_2$ – расстояние между креплениями соответствующих термопар. Тепловой поток q рассчитывается по температурному перепаду на нагревателе и холодильнике:

$$q = \frac{1}{2d_{\text{обр}}^2} \left[\frac{\bar{\lambda}_{\text{нагр}} \times (T_{ip,1}^{\text{нагр}} - T_{ip,2}^{\text{нагр}}) d_{\text{нагр}}^2}{\Delta_{ip}^{\text{нагр}}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{хол}} \times (T_{ip,1}^{\text{хол}} - T_{ip,2}^{\text{хол}}) d_{\text{хол}}^2}{\Delta_{ip}^{\text{хол}}} \right],$$

где $T_{ip,1}^{\text{нагр}}$, $T_{ip,2}^{\text{нагр}}$ и $T_{ip,1}^{\text{хол}}$, $T_{ip,2}^{\text{хол}}$ – показания термопар на нагревателе и холодильнике соответственно. Значения теплопроводности материалов нагревателя и холодильника $\bar{\lambda}_{\text{нагр}}$ и $\bar{\lambda}_{\text{хол}}$ берутся как функции от средней температуры в точках установки термопар из справочника [12].

Для увеличения точности измерений обработка показаний с каждой термопары, указанной на рис. 2 а. проводилось по следующей методике. Усреднялись показания по всем холодным спаям 10 термопар для всего стационарного участка:

$$\tilde{T}^{\text{хол.спай}} = \frac{1}{10N_\tau} \times \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{N_\tau} (T_{ip,i}^{\text{хол.спай}})_j,$$

где N_τ – количество измерений температуры на стационарном участке. Выравнивались показания горячих спаев на разницу подогрева холодного спаев:

$$\tilde{T}_{ip,i} = \tilde{T}^{\text{хол.спай}} + (T_{ip,i}^{\text{гор.спай}} - T_{ip,i}^{\text{хол.спай}}).$$

Для стационарного участка усреднялись скорректированные значения температуры горячей спая $\tilde{T}_{ip,i}$:

$$T_{ip,i} = \frac{1}{N_\tau} \times \sum_{j=0}^{N_\tau} (\tilde{T}_{ip,i})_j.$$

Для нагревателя и холодильника дополнительно усреднялись показания с эквивалентных термопар. Получаемое значение теплопроводности $\lambda(\bar{T}_{ip})$ считается теплопроводностью материала при средней температуре между термопарами на образце: $\bar{T}_{\text{обр}} = (T_{ip,1}^{\text{обр}} + T_{ip,2}^{\text{обр}})/2$.

Из теории теплопроводности твердого тела известно [12], что в области температур $T = 300 \div 1000$ К теплопроводность проводников λ_σ зависит от температуры линейно, а диэлектриков λ_D – обратно пропорционально температуре:

$$\lambda_\sigma(T) = \lambda_0 + \beta_\lambda T;$$

$$\lambda_D(T) = \frac{\gamma_\lambda}{T}.$$

В таком случае тепловой поток – есть нелинейная функция от температурного перепада: $q \neq k \times \Delta T$. Однако дополнительные численные эксперименты демонстрируют пренебрежимо малое различие методик с учетом температурной зависимости теплопроводности и без нее.

Для проводников пренебрежимо малую погрешность можно доказать аналитически. Поскольку температурная зависимость для проводников линейная, распределение температуры в пространстве будет представлять собой кривую второго порядка:

$$x = AT^2 + BT + C;$$

$$A = -\frac{\beta_\lambda}{2q}; B = -\frac{\lambda_0}{q}; C = \frac{\lambda_0}{q} T_{\text{нач}} + \frac{\beta_\lambda}{2q} T_{\text{нач}}^2.$$

А поскольку теплопроводность по определению:

$$\lambda = \left| \frac{q}{dT/dx} \right| \sim \frac{dx}{dT},$$

комплекс $\Delta_{tp}^{обр}/(T_{tp,1}^{обр} - T_{tp,2}^{обр})$ в формуле (1) является ничем иным, как конечно-разностной аппроксимацией производной dx/dT :

$$\frac{dx}{dT}(T_{cp}) = \frac{x(T_{cp} + \Delta T) - x(T_{cp} - \Delta T)}{2\Delta T},$$

которая для квадратичной функции строго:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dT}(T_{cp}) &= \\ &= \frac{A[(T_{cp} + \Delta T)^2 - (T_{cp} - \Delta T)^2] + 2BT_{cp}}{2\Delta T} = \\ &= 2AT_{cp} + B. \end{aligned}$$

Что можно интерпретировать как строгую точность упрощенной методики – без учета зависимости $\lambda(T)$, для любого материала, подчиняющегося линейной зависимости $\lambda(T)$. А поскольку для большинства проводников последующие члены в полиноме по степеням температуры $\lambda = P_n(T)$ значительно меньше предыдущих можно предполагать, что упрощенная методика корректна для проводников с достаточной точностью.

Оценка погрешности упрощенной методики для диэлектриков проводилась по следующему алгоритму. Для заданного теплового потока и температуры горячей термопары на нагревателе, рассчитывалось распределение температуры в экспериментальном участке с учетом зависимости $\lambda(T)$, а затем анализировалась теплопроводность λ_y упрощенной методикой, и сравнивалась с заранее известной. Геометрические размеры, задавались близкие к значениям в эксперименте. Относительная погрешность $\varepsilon_\lambda = |\lambda - \lambda_y|/\lambda$ для условий: $T_1^{нагр} = 500$ К, $q^{нагр} = 25$ кВт/м² составила $\varepsilon_\lambda < 1\%$ для диапазона $\gamma_\lambda = [8000; 13000]$.

Теперь рассмотрим измерение теплопроводности образца с покрытием. Также, как и в предыдущем случае используется приближение многослойной плоской стенки и стационарный режим. Схематичное распределение температуры в экспериментальном участке для образца с керамическим покрытием указано на рис. 5. Тер-

мопары измеряют температуру в точках 1, 2, 10 и 11. При известной теплопроводности материала нагревателя, холодильника и подложки образца с покрытием возможно восстановить распределения температур на прямых 1–3, 5–8 и 9–10.

При контактировании твердых тел различных электрических свойств проявляется контактное сопротивление даже в случае геометрически идеального контакта. Это связано с различной преобладающей проводимостью в различных материалах. Так, например, для контакта проводника с диэлектриком, чем и представляется точка 5, в проводнике повышена концентрация одних переносчиков теплоты – свободных электронов, а в диэлектрике других – фононов. Разрыв концентраций переносчиков ведет к появлению температурного перепада, а значит и к термическому сопротивлению. Однако, как отмечается в работе [13], данное термическое сопротивление является малой величиной, которой в дальнейшем будем пренебрегать. В таком случае:

$$\Delta T_{45} = (T_3 - qR_{KTC}^{нагр}) - T_5,$$

где температуры T_3 и T_5 :

$$T_3 = T_{tp,2}^{нагр} - \frac{2,5 \text{ мм}}{\Delta_{tp}^{нагр}} \times (T_{tp,1}^{нагр} - T_{tp,2}^{нагр});$$

$$T_5 = T_{tp,1}^{обр} + \frac{l_1 - h_{\text{без покрытия}}}{\Delta_{tp}^{обр}} (T_{tp,1}^{обр} - T_{tp,2}^{обр}).$$

Теплопроводность керамики:

$$\lambda_{\text{покр}} = \frac{q}{\Delta T_{45}} \times (h - h_{\text{без покрытия}}),$$

где тепловой поток q определяется по формуле (1).

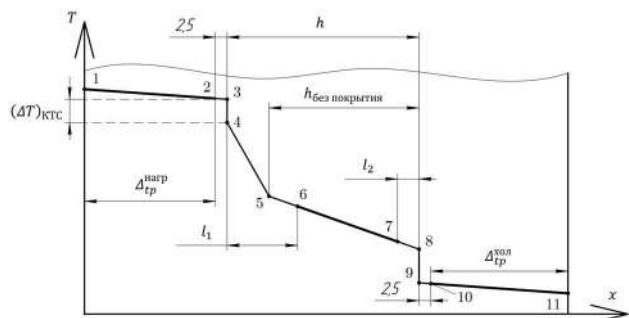


Рис. 5. Распределение температуры в экспериментальном участке с образцом с керамическим покрытием

Величину термического контактного сопротивления (КТС) можно определить с помощью из следующих соображений. В зоне контакта среда с теплопроводностью $\lambda_{ТП} = 0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [6]. Проводимость среды в зоне контакта можно оценить как $\alpha_{ср} = \lambda_{ТП}/l_{хар}$, где характерный размер прослойки из среды $l_{хар} \sim 1 \text{ мкм}$. Тогда $\alpha_{ср} = 3 \times 10^5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. С учетом проводимости контактных пятен $\alpha_{к.п}$, суммарная проводимость контакта:

$$\alpha_{к,теор} = \alpha_{ср} + \alpha_{к.п} > \alpha_{ср}.$$

Для дальнейших рассуждений примем величину КТС между образцом без покрытия и нагревателем из эксперимента $R_{КТС}^{нагр, без покр.} \approx 4,7 \times 10^{-5} \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$. Тогда можно видеть:

$$\alpha_{к,эксп} = 2 \times 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}} \approx \frac{1}{10} \times \alpha_{к,теор}.$$

То есть теоретические оценки проводимости контакта по формуле (16) в предположении об отсутствии КТС на границе среда-поверхность сильно завышены. Следовательно термическое контактное сопротивление в зоне контакта образца с нагревателем и холодильником по большей части обуславливается контактным сопротивлением между термопастой и поверхностями нагревателя и образца. Это также подтверждается соответствием по порядку величины экспериментальных значений КТС и значений указываемых производителями термопаст [14]. В таком случае, вводя допущение о соответствии контактного взаимодействия термопасты с поверхностями подложки и покрытия, можно считать, что:

$$R_{КТС}^{нагр} = R_{КТС}^{гор, без покр.}.$$

Для образца без покрытия экспериментальное значение КТС определяется по формуле:

$$R_{КТС}^{нагр, без покр.} = \frac{q}{\Delta T_{нагр}};$$

$$\Delta T_{нагр} = \left[T_{tp,1}^{обр} + \frac{l_1}{\Delta_{tp}^{обр}} \times (T_{tp,1}^{обр} - T_{tp,2}^{обр}) \right] - \left[T_{tp,1}^{нагр} - \frac{2,5 \text{ мм}}{\Delta_{tp}^{нагр}} \times (T_{tp,1}^{нагр} - T_{tp,2}^{нагр}) \right].$$

Важно отметить, что по технологическим причинам в образце с покрытием присутствует отверстие, которое может внести изменение в линейное распределение температуры в образце. Для оценки влияния отверстия было проведено моделирование методом конечных элементов в программной среде ANSYS [15]. Граничные условия были установлены соответственно эксперименту: на одном основании цилиндра $T_w = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, на другом – $q = 290 \text{ кВт/м}^2$. Геометрические размеры также были заданы соответственно эксперименту.

Относительное отклонение от линейного распределения $\varepsilon = (T_{с отверстием} - T_{лин})/T_{лин}$, полученное в результате моделирования, не превысило 1 %.

Результаты и обсуждение

График полученной зависимости теплопроводности материала подложки от температуры в интервале от 340 К до 430 К приведен на рис. 6. Данные эксперимента по теплопроводности материала подложки можно аппроксимировать линейной зависимостью:

$$\lambda_{подл} = 226,36 + 0,0117 \times T;$$

$$[\lambda_{подл}] = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$$

с относительной точностью, совпадающей с погрешностью эксперимента. Интересно отметить, что коэффициент $\beta_\lambda > 0$, при этом по абсолютному значению в 2 раза меньше, чем у чистого алюминия.

График распределения $\lambda_{покр}$ от температуры приведен на рис. 7. Можно видеть существенный разброс в значениях теплопроводности $\lambda_{покр} = 1 \pm 0,45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что объясняется неточным определением КТС.

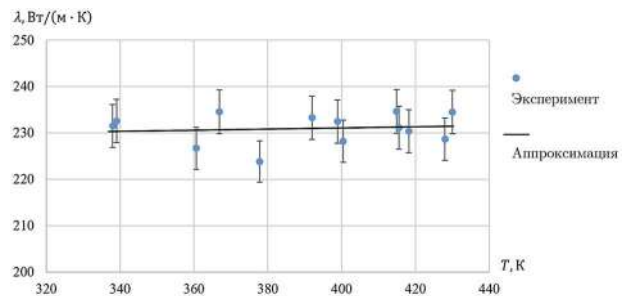


Рис. 6. Полученная зависимость теплопроводности материала подложки от температуры

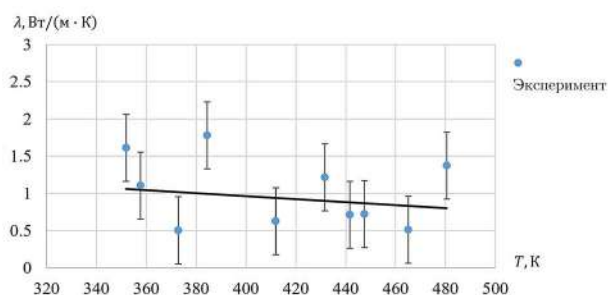


Рис. 7. Распределение теплопроводности материала покрытия от температуры

Заключение

Описаны конструкция и функциональная схема экспериментальной установки, с указанием датчиков и других составляющих элементов. Подробно описана математическая модель в виде набора уравнений, с использованием которых рассчитывалась теплопроводность на основе получаемых данных с датчиков температур на образце и элементах конструкции. Были рассмотрены допущения модели, такие, как предположение о линейном распределении температуры в образце в стационарном состоянии и влияние технологического отверстия в образце на линейное распределение.

Затронута тема контактного термического сопротивления, возникающего при контакте образца с элементами установки. Показано, что при использовании теплопроводящей пасты контактное термическое сопротивление обуславливается сопротивлением на границе паста-материал, то есть корректно рассматривать контактную зону как 3 различные среды, контактирующие по 2-м границам, а не как контакт поверхностей с межконтактной средой в виде пасты.

Для оксидного покрытия значения теплопроводности составили $\lambda_{\text{покр}} = 1 \pm 0,45 \text{ Вт/(м} \times \text{К)}$. Для материала подложки из сплава AlSiMg была получена температурная зависимость теплопроводности, выражающаяся в виде линейной функции $\lambda_{\text{подл}} = 226,36 + 0,0117 \times T$; $[\lambda_{\text{подл}}] = 1 \text{ Вт/(м} \times \text{К)}$ с погрешностью 2 %.

Список источников

1. Халтурин О.А. Повышение долговечности резьбовых соединений буровых труб на основе моделирования и выбора рационального момента затяжки при сборке: Дисс. ... канд. тех. наук. Пермь, 2023. 134 с.

2. Chunguang F., Tong L., Zuoqin Q., Zihao S. Piston Thermal Analysis of Heavy Commercial Vehicle Diesel Engine Using Lanthanum Zirconate Thermal-Barrier Coating // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 22. DOI: 10.3390/en15124225
3. Чавдаров А.В., Денисов В.А. Перспективы использования технологии МДО для двигателей внутреннего сгорания // *Агроинженерия*. 2020. № 5. С. 38–42. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-38-42
4. Криштал М.М., Ивашин П.В., Павлов Д.А. и др. О теплопроводности оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, на силумине АК9ПЧ // *Вектор науки ТГУ*. 2012. № 4 (22). С. 169–172.
5. Орлова Д.В., Трушкина Т.В., Вахтеев Е.В. и т.д. Исследование пористости оксидных покрытий на алюминиевых сплавах // *Труды МАИ*. № 68. 2013.
6. Бычков Н.Г., Ножницкий Ю.А., Першин А.В. Разработка экспериментальных методов определения прочностных и теплофизических свойств отдельных, имеющих реальную толщину, слоев теплозащитных покрытий при рабочих температурах // *Вестник УГАТУ*. 2015. Т. 19. № 3 (69). С. 15–20.
7. ГОСТ 19783-74. Паста кремнийорганическая теплопроводная. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов. 1996. 9 с.
8. ГОСТ Р 8.585-2001. Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования. М.: ИПК Издательство стандартов. СТАНДАРТИНФОРМ, 2010. 81 с.
9. Одноточечный тензодатчики К-Б-10А // *Вектор-ПМ*. Пермь.
10. Surftest SG-210 series // *Mitutoyo. Bulletin* № 2194(2).
11. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975.
12. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989.
13. Меснянкин С. Ю., Викулов А. Г., Викулов Д. Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел // *Успехи Физических Наук*. 2009. Т. 179. № 9. С. 945–970.
14. Термопаста КПТД-3 // *НОМАКОН*.
15. Ansys manual // *Innovationspace*.

References

1. Khalturin O.A. *Improving the durability of threaded drill pipe connections based on modeling and choosing a rational tightening torque during assembly*. PhD. thesis. Perm. 2023. 134 p. (In Russ.).
2. Chunguang F, Tong L, Zuoqin Q et al. Piston Thermal Analysis of Heavy Commercial Vehicle Diesel Engine Using Lanthanum Zirconate Thermal-Barrier Coating. *Energies*. 2022;15(22). DOI: 10.3390/en15124225
3. Chavdarov AV, Denisov VA. Prospects of using MDO technology for internal combustion engines. *Agroin-*

- zheneriya. 2020;(5):38–42. (In Russ.). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-38-42
4. Krishtal MM, Ivashin PV, Pavlov DA et al. On the thermal conductivity of oxide coatings obtained by microarc oxidation on AK9PCh silumin. *Vektor nauki TGU*. 2012;(4 (22)):169–172. (In Russ.).
5. Orlova DV, Trushkina TV, Vakhteev EV et al. Investigation of porosity of oxide coatings on aluminum alloys. *Trudy MAI*. 2013;(68). (In Russ.).
6. Bychkov NG, Nozhnitskii YuA, Pershin AV. Development of experimental methods for determining the strength and thermophysical properties of individual layers of thermal protective coatings with real thickness at operating temperatures. *Vestnik UGATU*. 2015; 19(3 (69)):15–20. (In Russ.).
7. *Organosilicon thermal conductive paste. Technical specifications. State Standart R 19783-74*. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov; 1996. 9 p. (In Russ.).
8. *Thermocouples. Nominal static conversion characteristics. State Standart R 8.585-2001*. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov. STANDARTINFORM; 2010. 81 p. (In Russ.).
9. *Single point load cells K-B-10A*. Vektor-PM. Perm (In Russ.).
10. *Surfist SG-210 series*. Mitutuyo. Bulletin № 2194(2).
11. Khusu AP, Vitenberg YuR, Pal'mov VA. *Surface roughness (probability-theoretic approach)*. Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.).
12. Zinov'ev VE. *Thermophysical properties of metals at high temperatures*. Moscow: Metallurgiya; 1989. (In Russ.).
13. Mesnyankin SYu, Vikulov AG, Vikulov DG. A modern view on the problems of thermal contact of solids. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2009;179(9):945–970. (In Russ.).
14. *Thermal paste KPTD-3*. NOMAKON. (In Russ.).
15. *Ansys manual*. Innovationspace.