

УДК 629.113.004.67: 621.793

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. В.М. КОНСТАНТИНОВ, А.С. ГУБАНОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Выполнен анализ тепловых потоков при теплопередаче в газотермических металлических покрытиях. Рассмотрены пути повышения теплопроводности покрытий. Предложена физическая модель теплопроводности газотермического металлического покрытия.

Введение. Теплофизические свойства газотермических покрытий (ГТП) в ряде случаев определяют их работоспособность. Для одних условий эксплуатации требуется большая теплопроводность материала покрытий, для других – малая. Получение теплоизоляционных покрытий благодаря специфике их структуры, как правило, не составляет трудностей, поэтому керамические теплоизоляционные покрытия нашли широкое применение [1]. Однако достижение высокой теплопроводности металлических ГТП является сложной задачей. Ламелярная микроструктура ГТП обуславливает более низкую их теплопроводность по сравнению с теплопроводностью плотных твердых тел. Так, например, теплопроводность компактного материала из молибдена при температуре 500 °С составляет 130 Вт/м·К, а теплопроводность ГТП на его основе 25 Вт/м·К при такой же температуре [2, 3]. Высокое тепловое сопротивление указанных покрытий существенно ограничивает их использование в узлах трения с тепловыделением, например, на поверхностях коренных опор блоков цилиндров, кривошипной головки шатуна, на поверхностях отверстий под подшипники в корпусных деталях и др. Применение для этих целей металлов с высокой теплопроводности (Cu, Al) ограничено их высокой стоимостью. Материалом конкурентного ГТП с низким тепловым сопротивлением должно быть железо с рядом легирующих элементов. Создание указанных покрытий является сложной материаловедческой и технологической задачей, требующей учета множества факторов.

Цель работы – анализ возможностей повышения теплопроводности ГТП путем оценки тепловых потоков в различных его структурных составляющих при теплопередаче, а также разработка физической модели теплопроводности покрытия.

Анализ тепловых потоков при теплопередаче в газотермическом покрытии. Газотермические покрытия представляет собой многофазное дисперсное тело, фазы которого имеют прочную взаимную связь. В число фаз входят ламелеобразные фрагменты различных исходных сплавов, пленки оксидов и воздушные поры (рис. 1). Сферические частицы исходного материала при нанесении покрытия покрываются пленками оксидов и при ударе о восстанавливаемую поверхность принимают расплюснутую форму.

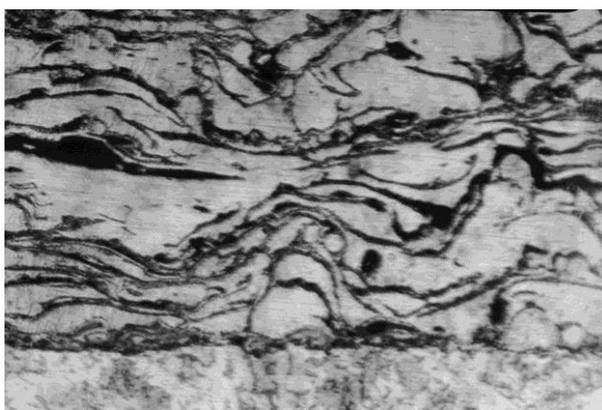


Рис. 1. Покрытие, полученное электродуговым напылением алитированной стальной проволоки (× 300)

В общем случае перенос тепла в покрытии происходит посредством теплопроводности самих ламелей сплава; теплопроводности оксидных пленок, окружающих ламели; молекулярной теплопроводности газа, заполняющего поры покрытия; молекулярной теплопроводности газового микрозазора в контакте между ламелями; теплопроводностью от одной ламели к другой в местах их соприкосновения (контактной теплопроводностью); конвекцией газа, находящегося между ламелями; излучением от одного металлического фрагмента к другому [4].

Анализ составляющих теплового потока в ГТП показывает, что эффективная теплопроводность покрытия является сложной функцией температуры, давления газа, химического состава материала и газа, пористости, размеров и формы ламелей и пор, степени черноты и температуры граничных поверхностей, коэффициента аккомодации поверхности ламелей по отношению к газу-наполнителю и многих других факторов. Следовательно, теплопроводность покрытия определяется формой, количественным соотношением и способами контактирования структурных составляющих, их свойствами и относительным расположением.

Более низкая эффективная теплопроводность ГТП по отношению к теплопроводности чистых металлов объясняется дискретной структурой покрытия, а следовательно, малой действительной поверхностью непосредственного теплового контакта как между покрытием и основой, так и между отдельными его фрагментами; уменьшением электронного переноса энергии в малых объемах металла, размеры которых сравнимы с длиной свободного пробега электронов; пористостью покрытия – перенос энергии в порах излучением и теплопроводностью газа значительно меньше, чем в сплошном металле; наличием оксидных пленок, окружающих ламели покрытия, теплопроводность которых низка.

В основе теории переноса в твердых частицах и молекулярной теплопроводности газа лежит представление о «квазичастицах» – носителях тепла, которые в процессе диффузии переносят обусловленный градиентом температуры избыток тепловой энергии. Основная доля тепловой энергии в металлах переносится электронами проводимости, небольшая часть энергии передается с помощью упругих волн. Перенос тепла в газах происходит посредством межмолекулярного взаимодействия при двойных, а также тройных столкновениях молекул. В слоях оксидов теплопроводность обусловлена распространением тепловых колебаний частиц в виде упругих волн [5].

Классическая теория теплопроводности рассматривает процесс распространения тепла только с количественной стороны безотносительно к механизму процесса переноса. Тепловой поток q может быть определен по формуле Фурье

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности Вт/м·К; T – температура, К.

Термическое сопротивление материала R определим по формуле:

$$R = b/\lambda F, \text{ Вт}^{-1} \text{ К}, \quad (2)$$

где b и F – толщина и площадь теплопроводящего слоя, м.

В зернистом слое часть тепла может передаваться путем конвекции. Вынужденная конвекция, вызванная продуванием газа через пористое тело, в анализируемом случае отсутствует. Естественная или свободная конвекция возникает в порах материала под действием температурного градиента и различия в плотностях газа, заполняющего промежутки между частицами. Возникновение конвекционных токов тепла в порах покрытия возможно при условии [5, 6]:

$$Gr Pr > 680, \quad (3)$$

где Gr и Pr – критерии Грасгофа и Прандтля, принимающие значения, соответственно

$$Gr = \frac{qx^3}{\nu^2} \frac{\Delta T}{T} + \frac{\beta_o \Delta T g d_{\text{экв}}^2 \rho^2}{\mu^2}; \quad Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda_2} = \frac{\nu C_p}{\lambda_2},$$

где ΔT – разность температур на границах открытого с обеих сторон слоя материала высотой x , К; λ_2 – теплопроводность газа, Вт/м·К; C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/кг·К; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентная толщина слоя, м, зависящая от пористости материала и поверхностной площади зерен в единице объема.

Расчеты по формуле (3) свидетельствуют, что для возникновения конвекции необходимо, чтобы вещество обладало крупными порами и находилось под действием сравнительно высоких температурных перепадов. Для материала с зернами (для ГТП – это ламели) размером до 3 мм конвективным теплообменом в порах можно пренебречь.

При расчете количества тепла, передаваемого излучением от частицы к частице, используют формулу теплового потока q_u между двумя параллельными пластинками, имеющими те же температуры, что и частицы:

$$q_u = 0,01 \sigma' S (T_1^4 - T_2^4), \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – температуры стенок излучаемой поры, К; S – площадь излучаемой поверхности, м²; σ' – приведенный коэффициент лучеиспускания, связанный с коэффициентом лучеиспускания обеих поверхностей и абсолютно черного тела соотношением $1/\sigma' = 1/\sigma_1 + 1/\sigma_2 - 1/\sigma_3$.

При малой разнице температур на границах слоя толщиной x коэффициент радиационной теплопроводности составляет [6]

$$\lambda_p = 0,04x\sigma (0,01T)^3, \text{ Вт/м}\cdot\text{К.} \quad (5)$$

Сравнивая результаты, рассчитанные по формулам [4] и [5], с общим значением эффективной теплопроводности, получаем, что при рабочей температуре покрытия на деталях (до 150 °С) коэффициент радиационной теплопроводности на три порядка меньше общего коэффициента теплопроводности покрытия, следовательно, долей тепла, переносимого в покрытие излучением, можно пренебречь.

Очевидно, что преобладающая часть тепла в дисперсном материале передается через места контактов твердых частиц [7, 8]. Температуры соприкасающихся поверхностей частиц, через которые проходит тепловой поток, могут быть одинаковыми в случае идеального контакта, когда поверхности касаются друг друга всеми своими точками.

В действительности контакт между твердыми телами всегда дискретный. Тепловой поток разделяется в области микроконтактов. Большая доля его идет через фактические контакты, а меньшая – в среде между выступами неровностей.

В силу большой проводимости пятен контактов происходит стягивание к ним линий теплового потока. Расстояния между изотермическими поверхностями уменьшаются. Контактное термическое сопротивление обуславливается искривлением линий потока при прохождении тепла через пятна металлического контакта, а также низкой теплопроводностью газа при прохождении тепла через газовый зазор.

Хорошие результаты при расчете контактной теплопроводности λ_k дает применение формулы Римана – Зебера [7]:

$$\lambda_k = \lambda_c \left(\frac{d}{2r} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{d}{r} \right), \text{ Вт/м}\cdot\text{К,} \quad (6)$$

где λ_c – теплопроводность материала контактирующих частиц, Вт/м·К; d и r – диаметр частиц и радиус контактного пятна, м.

Таким образом, тепловое сопротивление металлических ГТП обусловлено дискретностью и малыми размерами металлического контакта ламелей покрытия между собой и с подложкой. Оксидные включения и поры в ГТП, имея теплопроводность в несколько раз меньшую, чем металлические ламели, увеличивают тепловое сопротивление ГТП.

Модель покрытия и расчет его теплопроводности. Применительно к расчету эффективной теплопроводности порошковых покрытий наиболее подходит, по нашей оценке, принцип обобщенной проводимости, предложенный Максвеллом [9], который впервые рассчитал электрическое поле системы, в сплошную массу которой были вкраплены частицы сферической формы.

Электрические и тепловые явления формально объединяет аналогия между дифференциальными уравнениями стационарного потока тепла, электрического поля, электрической и магнитной проницаемости, потока массы. Такая аналогия позволяет использовать для расчета тепловой проводимости основные соотношения электростатики и электродинамики.

В качестве модели покрытия для расчета теплопроводности дисперсных тел предложено рассматривать гетерогенные системы, твердые фазы которых состоят из плоских чередующихся слоев твердого тела. При этом слои могут располагаться как параллельно, так и перпендикулярно потоку тепла гладких сферических частиц с плотной и рыхлой упаковкой, шероховатых сферических частиц с плотной упаковкой, эллипсоидных, параболических и гиперболических частиц.

Все названные модели весьма отдаленно напоминают реальную структуру восстановительных металлических ГП, поэтому была предложена модель ГП из плоского слоя металлических цилиндров, сравнительно малой высоты, покрытых пленками оксидов.

Эта модель наиболее полно соответствует строению покрытия (см. рис. 1). Контактное взаимодействие между образующими цилиндры происходит через пленки оксидов, а между торцами цилиндров – через оксиды и ювенильные площадки металла. Укладка частиц плотная. Слои частиц расположены таким образом, что воздушные поры находятся между торцами частиц несмежных слоев, т.е. поры закрытые.

На рисунке 2 показана расчетная элементарная ячейка покрытия. Структуру всего покрытия составляют, составляя его из элементарных ячеек.

Элементарная ячейка имеет вид шестиугольной призмы и ориентирована таким образом, что поверхности ее основания перпендикулярны направлению теплового потока и являются изотермическими, а поверхности боковых граней – параллельны направлению потока и являются адиабатическими.

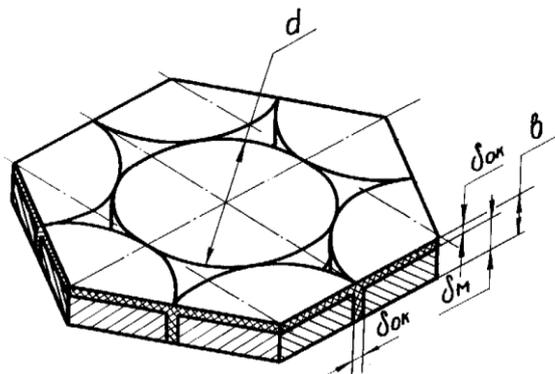


Рис. 2. Элементарная ячейка покрытия из порошкового материала (модель), принятая для исследования его эффективной теплопроводности

Размеры частиц элементарной ячейки были рассчитаны из равенства объемов исходной и деформированной частиц порошкообразного материала. Степень деформирования частиц как отношение их наибольших и наименьших линейных размеров определяли металлографическим анализом. Толщину оксидной пленки определяли линейным микрорентгеноспектральным анализом.

Схема соединений тепловых сопротивлений принятой элементарной ячейки приведена на рисунке 3.

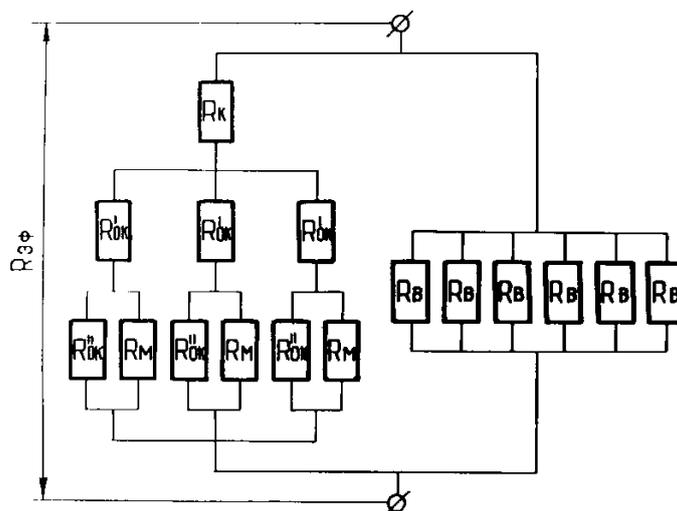


Рис. 3. Схема соединений тепловых сопротивлений элементарной ячейки покрытия

Полное эффективное тепловое сопротивление $R_{эф}$ всей элементарной ячейки выражается зависимостью:

$$R_{эф} = \frac{b}{\frac{3\sqrt{3}}{2} \lambda_{эф} d^2}, \text{ Вт}^{-1} \text{ К.} \quad (7)$$

Тепловое сопротивление составляющих: металлической частицы R_m , оксида на торце металлической частицы $R'_{ок}$, оксида на цилиндрической поверхности частицы $R''_{ок}$, воздушной прослойки $R_в$ и контакта между частицами $R_к$ определяли по формулам, соответственно:

$$R_m = \frac{4\delta_m}{\lambda_m \pi d^2} \text{ Вт}^{-1} \text{ К}; \quad R'_{ок} = \frac{4\delta_{ок}}{\lambda_{ок} \pi d^2}, \text{ Вт}^{-1} \text{ К}; \quad R''_{ок} = \frac{b}{\lambda_{ок} \pi d \delta_{ок}}, \text{ Вт}^{-1} \text{ К};$$

$$R_в = \frac{b}{\lambda_в F_в}, \text{ Вт}^{-1} \text{ К}; \quad R_к = \frac{1}{\lambda_к d}, \text{ Вт}^{-1} \text{ К}, \quad (8-12)$$

где λ_m , $\lambda_{ок}$, $\lambda_в$ – теплопроводности соответственно материала частиц, оксида и газа в порах, Вт/м·К; $F_в$ – площадь пор элементарной ячейки в направлении, перпендикулярном направлению теплового потока, м².

При расчете контактного сопротивления отношение диаметра частицы к диаметру контактного пятна $d/2r$ определяли при металлографическом исследовании строения покрытия.

В соответствии со схемой соединения тепловых соединений имеем

$$R_{эф} = \frac{R_g \left[\frac{R'_{ок}}{3} + \frac{R''_{ок} R_M}{3(R_M + R''_{ок})} + R_K \right]}{\frac{R'_{ок}}{3} + \frac{R''_{ок} R_M}{3(R_M + R''_{ок})} + R_K + \frac{R_g}{6}}, \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{К.} \quad (13)$$

Подставляя значения и решая полученное уравнение относительно $\lambda_{эф}$, получаем

$$\lambda_{эф} = \frac{2b}{3\sqrt{3}d^2} \left[\frac{6\lambda_g F_B}{b} + \left(\frac{4\delta_{ок}}{3\lambda_{ок} \pi d^2} + \frac{4b\delta_M \lambda_M}{\pi \lambda_M d (12\lambda_{ок} \delta_{ок} \delta_M \pi d + b\lambda_M)} + \frac{\pi d + 2r \ln d/r}{6r\pi d \lambda_M} \right)^{-1} \right], \text{ Вт/м} \cdot \text{К.} \quad (14)$$

Используя формулу (14) для принятой расчетной модели металлического ГТП и подставляя геометрические и теплофизические характеристики структурных составляющих, можно аналитически определить эффективную теплопроводность.

П р и м е р подобного расчета следующий. Имеем покрытие (% по массе): Cu – 4,8 %; Al – 1,2 %; Fe – остальное. Средневзвешенная теплопроводность металлических lamелей покрытия с учетом содержания составляющих $\lambda_M = 63,5$ Вт/м·К. Принятая рабочая температура – 150 °С.

Теплопроводность воздуха в порах покрытия с учетом содержания составляющих $\lambda_v = 0,0356$ Вт/м·К. Геометрические характеристики металлических фрагментов ГТП (по данным металлографического анализа) $d_M = 245$ мкм, $\delta_M = 25$ мкм. Толщина оксидной пленки $\delta_{ок} = 10$ мкм. Теплопроводность оксидной пленки $\lambda_{ок} = 1,05$ Вт/м·К. Площадь воздушных пор элементарной ячейки $F_B = 16900$ мкм².

Результаты расчета теплопроводности по формуле (14) $\lambda_{эф} = 1,49$ Вт/м·К. Экспериментальное значение эффективной теплопроводности ГТП, измеренное сравнительным методом, составило $\lambda_{эф} = 1,40$ Вт/м·К.

Выводы. Анализ тепловых потоков при теплопередаче в ГТП свидетельствует о целесообразности повышения теплопроводности ГТП за счет снижения пористости, уменьшения толщины пленок на поверхности lamелей покрытия и повышения теплопроводности металлических lamелей. Технологические ограничения процесса нанесения покрытия лимитируют пористость, количество и толщину оксидов в ГТП. Наиболее эффективным представляется повышение теплопроводности металлических фрагментов покрытия.

Предложенная физическая модель позволяет адекватно рассчитывать эффективную теплопроводность металлического порошка ГТП, учитывая как геометрические, так и теплофизические характеристики его структурных составляющих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хокинг М., Васантасри В., Садки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение: Пер. с англ. – М: Мир, 2000. – 518 с.
2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением // Теория, технология, оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
3. Ильюшенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов – Мн.: Бестпринт, 2005. – 253 с.
4. Смирнов Е.В., Ионин В.Е. Виды переноса тепловой энергии в металлических плазменно напыленных покрытиях и некоторая качественная оценка их теплопроводности // Инженерно-физический журнал. – 1970. – Т. 18, № 4. – С. 17 – 20.
5. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 479 с.
6. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Физматгиздат, 1962. – 456 с.
7. Миллер В.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. – Киев: Наукова думка, 1966. – 163 с.
8. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.
9. Maxwell С. Treatise on Electricity and Magnetism. – 1873.