

УДК 536.2

К.Б. ИСАЕВ<sup>1</sup>, П.Г. КРУКОВСКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев<sup>2</sup>Институт технической теплофизики НАНУ, Киев, Украина

## ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрено влияние трех факторов на теплопроводность покрытия: скорость нагрева, величина теплопроводности и толщина покрытия. На примере двух покрытий из меди и двуокиси циркония на подложке из нержавеющей стали расчетным путем показано влияние этих факторов на результаты определения теплопроводности покрытия. Для этого была решена прямая нелинейная задача теплопроводности с соответствующими условиями однозначности для двухслойной одномерной тепловой модели – покрытие-подложка. Оценена работоспособность методики определения теплопроводности покрытий на возмущенном температурном поле с 5% погрешностью. Получено удовлетворительное согласование с исходными известными коэффициентами теплопроводности подложки и покрытия.

**Ключевые слова:** покрытие, подложка, коэффициент теплопроводности, температурное поле, обратная задача теплопроводности (ОЗТ), прямая задача теплопроводности (ПЗТ).

### Введение

Для защиты изделий от воздействия агрессивных факторов широкое применение нашли разнообразные покрытия. Они работают в самых различных условиях – высокие температуры, химически агрессивные среды, трение и т.п. Надежная эксплуатация этих покрытий требует знания их различных свойств, в частности коэффициента теплопроводности в широких диапазонах температур и скоростей нагрева.

На результаты определения коэффициента теплопроводности покрытий оказывает влияние большое количество факторов. В данной работе с помощью методики [1] рассмотрено влияние трех факторов: скорость нагрева (~10К/с и ~200К/с), величина коэффициента теплопроводности и толщина покрытия. На примере двух покрытий из меди и двуокиси циркония на подложке из нержавеющей стали расчетным путем показано влияние этих факторов на результаты определения коэффициента теплопроводности покрытия.

### 1. Решение ПЗТ

Получены решения прямой нелинейной задачи теплопроводности для двухслойной одномерной тепловой модели – покрытие-подложка, которые являются бесконечными пластинами.

В качестве граничных условий использовались: условия первого рода на нагреваемой поверхности покрытия, четвертого рода для контакта покрытие-подложка и на «холодном» торце подложки предполагалось равенство нулю теплового потока (рис. 1).

Предполагалось, что температура на поверхности покрытия  $T_w(\tau)$  является ломаной линией рис. 2.

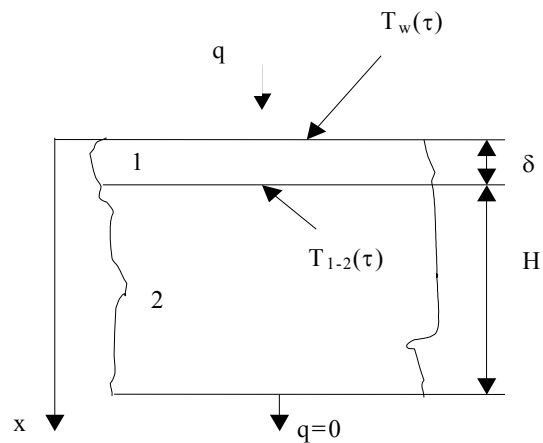


Рис. 1. Тепловая схема системы покрытие-подложка

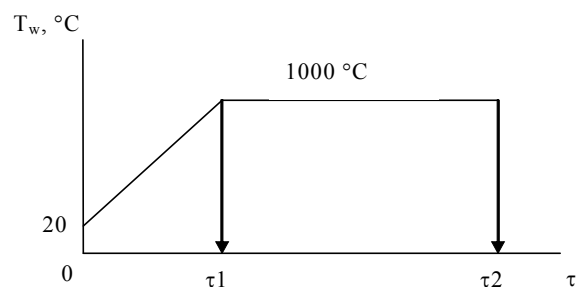


Рис. 2. Изменение температуры поверхности со временем

Сначала она линейно увеличивается до 1000 °C за время  $\tau_1$ , а затем остается постоянной до момента времени  $\tau_2$ . Теплофизические характеристики этих

материалов брали из литературы [2, 3]. Они представлялись линейными функциями температуры и приведены в табл. 1.

В результате решения ПЗТ получали «экспериментальное» температурное поле в покрытии и подложке. Прямая задача теплопроводности решалась численным методом по неявной 6-ти точечной схеме.

Таблица 1  
Теплофизические характеристики материалов

№ п/п	Материал	T, °C	$C_v \cdot 10^{-6}$ , Дж/(м <sup>3</sup> K)	$\lambda$ , Вт/(м K)
1	Сталь 12X18H10T	20	3,64	14,6
		1000	5,09	31,9
2	Медь	20	3,45	401
		1000	4,11	334
3	Диоксид циркония	20	1,78	0,87
		1000	2,52	0,95

В работе рассмотрены 2 варианта расчета:  $\tau_1 = 5$  с ( $\tau_2 = 30$  с) и  $\tau_1 = 100$  с ( $\tau_2 = 150$  с) для двух покрытий – медь и диоксид циркония, при этом  $H = 15$  мм и  $\delta = 1$  мм. Для диоксида циркония также рассмотрены еще 2 варианта толщины покрытия – 0,5 мм и 0,3 мм.

## 2. Методика определения теплопроводности покрытий

Методика [1] основана на использовании граничном условии 4-го рода между покрытием и подложкой и решении обратных задач теплопроводности. Расчетное температурное поле в подложке (изменение температуры во времени в 4-х сечениях) использовалось для решения коэффициентной ОЗТ [4]. В результате получали температурную зависимость коэффициента теплопроводности подложки и температурное поле в ней от первой «термопары»

(глубина заделки 1 мм) до 4-ой. Расстояния между термопарами – 2 мм.

Далее с помощью решения граничной ОЗТ восстанавливали температуру контакта подложка-покрытие как функцию времени. Т.е., для любого момента времени строилась зависимость температуры от координаты в подложке. Аппроксимируя эти расчетные данные с помощью полинома 2÷4-й степени и делая экстраполяцию до поверхности подложки (1-2) получаем температуру контакта ( $T_{1-2}$ ). В результате решения граничной ОЗТ получаем температуру и ее первую производную по пространству на нагреваемой поверхности подложки в любой момент времени. Полученная информация используется для определения теплопроводности покрытия с помощью соотношения

$$\lambda_c(T) = [\lambda_s(T) (dT_s/dx|_{\delta})] / (T_w - T_{1-2}) / \delta, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $T$  – температура;  $x$  – координата;  $\delta$  – толщина покрытия.

Индексы: s – substrate (подложка); c – coating (покрытие); w – нагреваемая поверхность покрытия. Предполагается, что температура в покрытии является линейной функцией координаты.

## 3. Результаты решения ПЗТ и ОЗТ

На рис 3 представлены температурные поля в образцах нержавеющей стали с покрытиями из диоксида циркония (а) и меди (б) для двух скоростей нагрева и температура поверхности покрытия. Температуры контакта, полученные из решения ПЗТ и ОЗТ, для покрытия из диоксида циркония полностью совпали для точных данных. Температура контакта для медного покрытия отличается всего лишь на несколько градусов от температуры поверхности нагрева медного покрытия, что вызвано большой теплопроводностью меди.

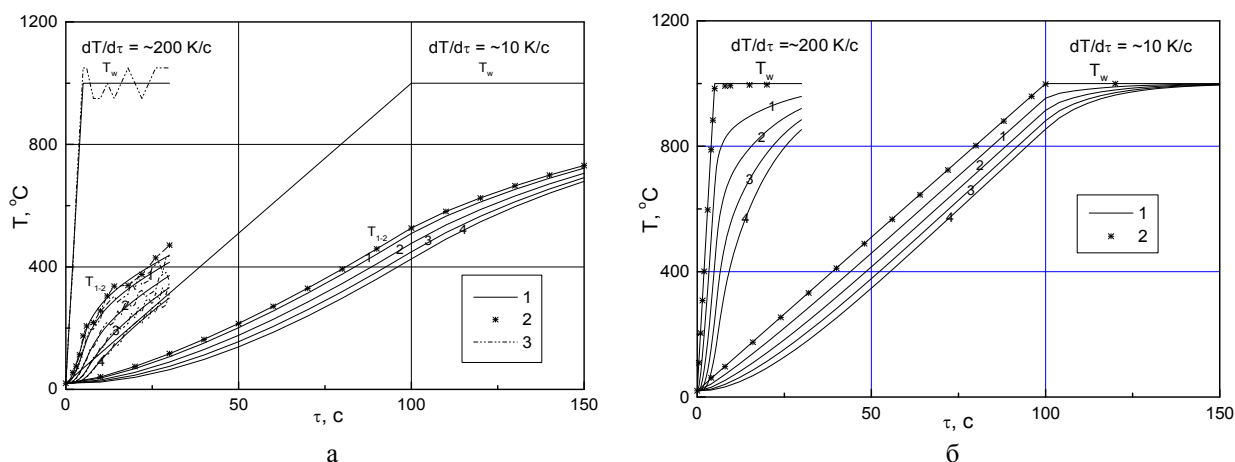


Рис. 3. Изменение температуры во времени в нескольких сечениях образцов стали с покрытием из диоксида циркония (а) и меди (б) при двух скоростях нагрева:

1 – результаты решения ПЗТ; 2 – результаты решения граничной ОЗТ;  
3 – возмущенные данные. 1-4 – «показания 4-х термопар»

В результате решения коэффициентной ОЗТ для точных «экспериментальных» данных получено полное совпадение исходного и восстановленного коэффициентов теплопроводности стальной подложки как для двух покрытий, так и для двух скоростей нагрева.

На рис. 3, а приведены также возмущенные данные – «показания 4-х термодпар», а также результаты восстановления температуры контакта Т1-2. Эти данные получены с использованием результата решения коэффициентной ОЗТ на возмущенных данных.

Информация о температурном поле, полученная при решении коэффициентной ОЗТ, использовалась для определения градиентов температур в подложке и в покрытии при  $x = \delta$ . Результаты этого определения представлены на рис. 4. Как видно из этого рисунка для малых скоростей нагрева (1) производные по пространству при  $x = \delta$ , полученные из решения ПЗТ (это точные данные) и ОЗТ, практически совпадают как для подложки, так и для покры-

тия для двух материалов. Далее они уменьшаются и отличаются незначительно. На стадии нагревания отличие этих производных имеет постоянное значение и может быть учтено при определении теплопроводности покрытия в качестве систематической погрешности.

При высоких скоростях нагрева имеет место существенное расхождение производных для покрытия из диоксида циркония, а для меди – для подложки. Причем, это расхождение имеет место только до времени выхода температуры нагреваемой поверхности покрытия на стационарное значение.

Значения производных больше у покрытия из диоксида циркония (низкая теплопроводность), а для медного (высокая теплопроводность) покрытия наоборот – для подложки (рис. 4).

Уменьшение толщины покрытия из диоксида циркония до 0,3 мм не приводит к изменению отличия производных по координате при  $x = \delta$  для подложки и покрытия. Поэтому они не приведены в работе.

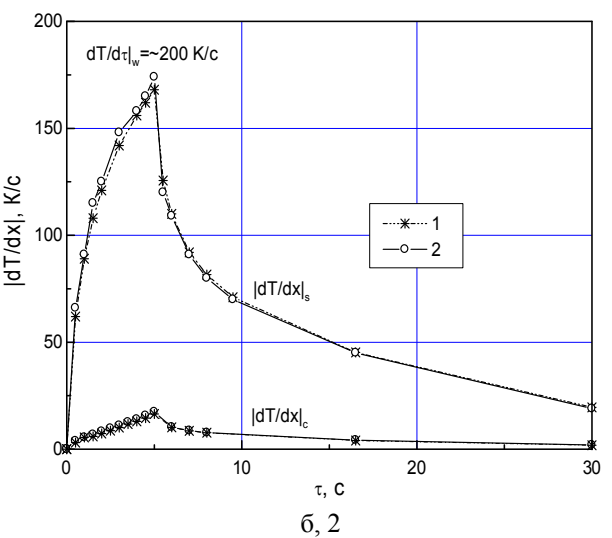
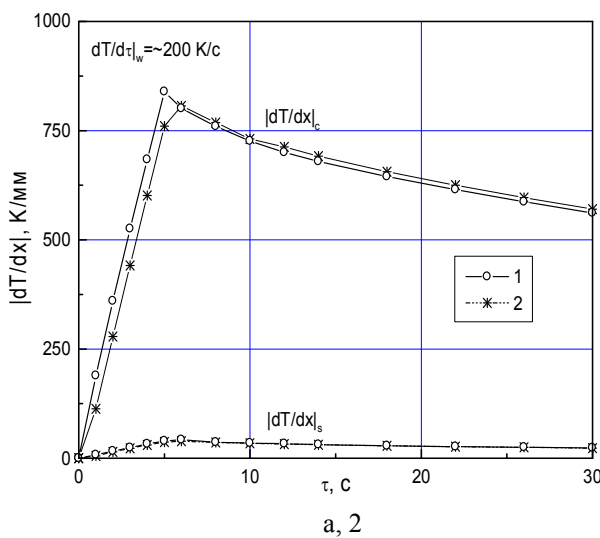
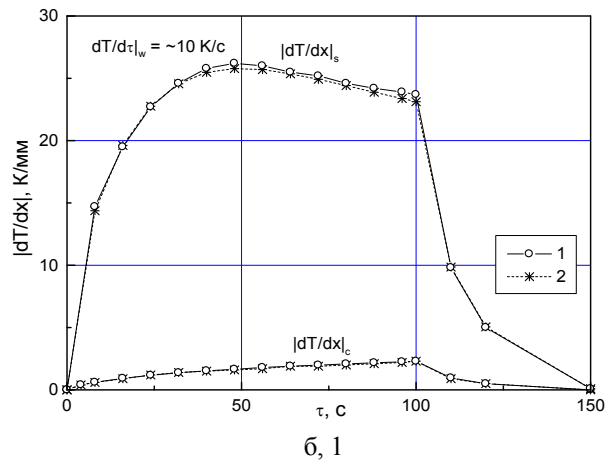
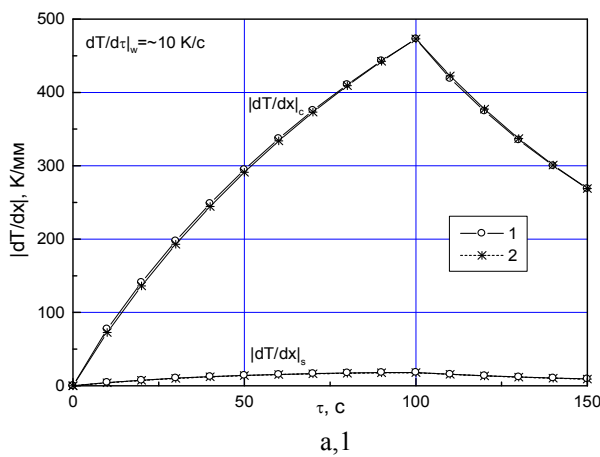


Рис. 4. Градиенты температур при  $x = \delta$  в стальной подложке и покрытиях при малой (1) и большой (2) скоростях нагрева; а – диоксид циркония; б – медь

#### 4. Результаты определения теплопроводности покрытий

Представленные выше данные были использованы для определения коэффициента теплопроводности покрытий. Результаты этого определения представлены на рис. 5. Как видно из этого рисунка, при высокой скорости нагрева при низких температурах имеет место существенное отличие восстановленных значений теплопроводности покрытия от исходных. Это вызвано отличием производных по координате для покрытия из диоксида циркония и подложки для медного покрытия (рис. 4, 2, а и 2, б) установления стационарной температуры поверхности. Далее отличие восстановленных значений теплопроводности покрытий существенно уменьшается и для диоксида циркония составляет несколько про-

центов, а для меди максимальное отклонение – менее 20%. Для низкой скорости нагрева (~10 К/с) отклонение значений восстановленного коэффициента теплопроводности как для диоксида циркония, так и для меди составляет несколько процентов.

Отклонение восстановленных значений теплопроводности покрытия диоксида циркония из возмущенного температурного поля при низких температурах совпадают со значениями этой характеристики, полученных из невозмущенного температурного поля. С ростом температуры отличие значений теплопроводности, полученных из возмущенного температурного поля от исходного коэффициента теплопроводности диоксида циркония, увеличивается по сравнению с данными, полученными из невозмущенного температурного поля, и составляет примерно 10 %. (рис. 5, а).

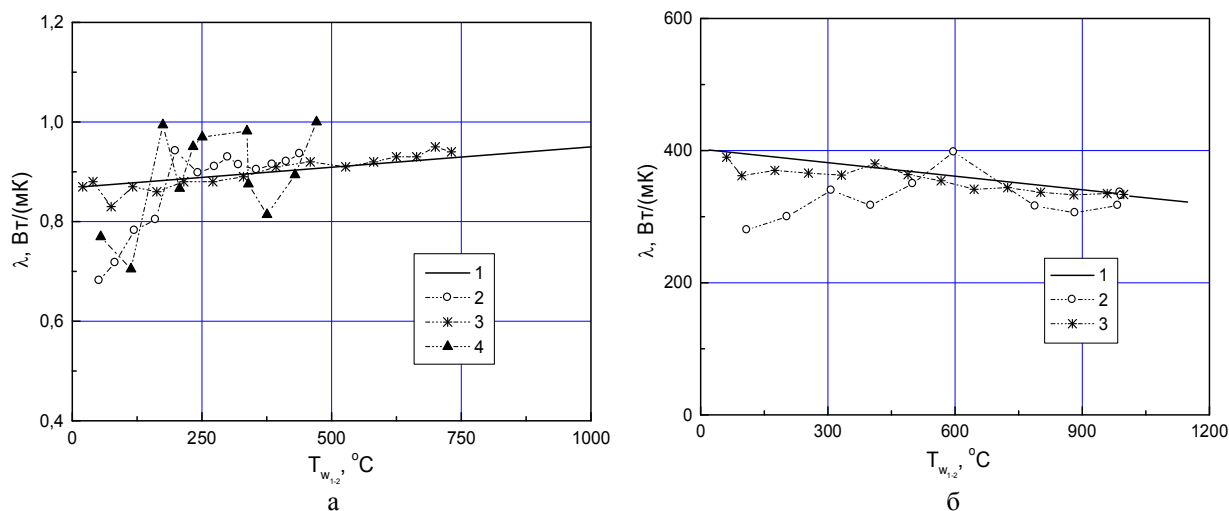


Рис. 5. Температурная зависимость теплопроводности покрытий из диоксида циркония (а) и меди (б) для двух скоростей нагрева:

1 – исходная теплопроводность покрытий; 2, 3 – восстановленная теплопроводность покрытий при 200 К/с и 10 К/с соответственно; 4 – данные  $\lambda_c(T)$  восстановлены из возмущенного температурного поля.

Уменьшение толщины покрытия из диоксида циркония до 0.3 мм не приводит к изменению результатов определения теплопроводности покрытия из диоксида циркония (по точным данным) по сравнению с данными, приведенными на рис. 5, а (данные 2 и 3).

#### Заключение

В работе использована линейная зависимость температуры от координаты в покрытии с целью уменьшения объема экспериментальной информации. Несмотря на такой упрощенный подход методика определения теплопроводности покрытий показала свою работоспособность при различных скоростях нагрева поверхности покрытия, при различных значениях его коэффициента теплопроводности

(отличие составило 400%) и толщин, а также при использовании возмущенного температурного поля.

Если теплофизические характеристики подложки известны с достаточной степенью точности, то нет необходимости решать коэффициентную ОЗТ. Достаточно в подложке заделать две термопары на разной глубине от поверхности контакта и решить нелинейную ПЗТ, используя показания этих термопар в качестве граничных условий. Температура контакта покрытие-подложка и производная по координате при  $x = \delta$  определяются по алгоритму, описанному выше в разделе 2.

Основную ошибку в определении коэффициента теплопроводности покрытий по данной методике вносит отличие производных по координате при  $x = \delta$  для больших скоростей нагрева. Этого, по-

видимому, можно избежать с помощью применения процедуры итерационной идентификации при определении теплопроводности покрытия.

### Литература

1. Методика определения теплопроводности газотермических покрытий [Текст] / С.В. Бучаков, Ю.И. Евдокименко, К.Б. Исаев, В.М. Кисель, В.В. Ремесло, Г. А. Фролов // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 31 – 35.

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

3. Теплопроводность твердых тел [Текст]: справ. / А.С. Охотин и др.; под ред. А. С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

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

Поступила в редакцию 1.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук., с.н.с. В.В. Лукович, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, НАН Украины, Киев, Украина.

### ВПЛИВ ДЕЯКИХ ФАКТОРІВ НА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОКРИТТІВ

*К.Б. Исаев, П.Г. Круковский*

Розглянуто вплив трьох факторів на теплопровідність покриття: швидкість нагріву, величина теплопровідності і товщина покриття. На прикладі двох покриттів з міді і двоокису цирконію на підкладці з нержавіючої сталі розрахунковим шляхом показано вплив цих факторів на результати визначення теплопровідності покриття. Для цього була вирішена пряма нелінійна задача теплопровідності з відповідними умовами однозначності для двошарової одномірної теплової моделі – покриття-підкладка. Оцінена працездатність методики визначення теплопровідності покриттів на збуреному температурному полі з 5% похибкою. Отримано задовільне узгодження з вихідними коефіцієнтами теплопровідності підкладки та покриття.

**Ключові слова:** покриття, підкладка, коефіцієнт теплопровідності, температурне поле, обернена задача теплопровідності, пряма задача теплопровідності.

### INFLUENCE OF SOME FACTORS ON THE DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF COATINGS

*K.B. Isayev, P.G. Krukovsky*

The influence of three factors on the coating thermal conductivity: heating rate, thermal conductivity and thickness of the coating. By the example of two coatings of copper and zirconium oxide on the substrate of stainless steel by means of calculation the influence of these factors on the results of determination of coating thermal conductivity is shown. For solving of this problem the direct nonlinear heat conduction problem with appropriate conditions of uniqueness for a two-layer one-dimensional thermal model – coating-substrate was solved. The efficiency of the method for determination of coating thermal conductivity on the perturbed temperature field with a 5% error was estimated. A satisfactory agreement with the initial thermal conductivity of the substrate and coating was obtained.

**Key words:** coating, substrate, thermal conductivity, temperature field, inverse heat conduction problem, direct heat conduction problem.

**Исаев Константин Борисович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина, e-mail: isayev\_k@gala.net.

**Круковский Павел Григорьевич** – доктор технических наук, профессор, зав. отделом Института технической теплофизики, Киев, Украина, e-mail: kruk@i.kiev.ua.