

УДК 621.793.1(620.18+536.2)

Аналитическое определение эффективной теплопроводности гетерофазных поверхностных слоев, покрытий и тонких пленок в тяжело нагруженных трибосистемах

В.И. Колесников¹, О.В. Кудряков², И.В. Колесников¹, В.Н. Варавка², Л.П. Арефьева²,
А.И. Воропаев¹, Е.С. Новиков¹

¹Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону 344038, Россия

²Донской государственный технический университет (ДГТУ),
пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону 344000, Россия

Поступила в редакцию 01.11.2022.

После доработки 15.12.2022.

Принята к публикации 15.12.2022.

Предложена методика для расчёта теплопроводности тонкого поверхностного слоя или покрытия, существенно отличающегося от основного металла по структуре, фазовому составу и теплофизическим свойствам. Методика базируется на экспериментальном измерении контактной разности потенциалов (КРП) на границе «слой/покрытие—подложка» с последующим расчётом работы выхода электронов и энергии уровня Ферми. Показано, что характеристики микроструктуры, фазового состава и пористости слоя/покрытия, которые учитываются в расчётной модели, существенно влияют на конечный результат определения эффективной теплопроводности. Расчётно-экспериментальная апробация идеи реализована в процессе исследования лопаток экспериментального газотурбинного локомотивного двигателя с гетерофазным термобарьерным покрытием системы Nb–Ti–Al. Покрытия толщиной около 80 мкм наносились по технологии вакуумного ионно-плазменного напыления. При отработке методики расчёта теплопроводности экспериментальные данные КРП были получены путём инструментальных измерений по специально разработанной лабораторной процедуре. Полученные результаты модельных расчётов теплопроводности как основного металла подложки (лопатки турбины) Inconel 713LC, так и термобарьерного покрытия Nb–Ti–Al показали высокое соответствие экспериментальным и справочным данным. Технология имеет высокий потенциал применения в тяжело нагруженных узлах трения различных областей народного хозяйства, таких как вертолётостроение, самолётостроение, космонавтика, железнодорожный транспорт, судостроение, сфера обороны.

Ключевые слова: вакуумная ионно-плазменная технология, микроструктура покрытий, электронная микроскопия, теплопроводность, расчётно-аналитическая методика.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-575-582

Адрес для переписки:

О.В. Кудряков
Донской государственный технический университет (ДГТУ),
пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону 344000, Россия
e-mail: kudryakov@mail.ru

Address for correspondence:

O.V. Kudryakov
Don State Technical University (DSTU),
Gagarin square 1, Rostov-on-Don 344000, Russia
e-mail: kudryakov@mail.ru

Для цитирования:

В.И. Колесников, О.В. Кудряков, И.В. Колесников, В.Н. Варавка,
Л.П. Арефьева, А.И. Воропаев, Е.С. Новиков.

Аналитическое определение эффективной теплопроводности гетерофазных поверхностных слоев, покрытий и тонких пленок в тяжело нагруженных трибосистемах.

Трение и износ.

2022. — Т. 43, № 6. — С. 575—582.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-575-582

For citation:

V.I. Kolesnikov, O.V. Kudryakov, I.V. Kolesnikov, V.N. Varavka,
L.P. Aref'eva, A.I. Voropaev, and E.S. Novikov.

[Analytical Determination of the Effective Thermal Conductivity of Heterophase Surface Layers, Coatings and Thin Films in Heavy-Loaded Tribosystems].

Trenie i Iznos.

2022, vol. 43, no. 6, pp. 575—582 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-575-582

Analytical Determination of the Effective Thermal Conductivity of Heterophase Surface Layers, Coatings and Thin Films in Heavy-Loaded Tribosystems

V.I. Kolesnikov¹, O.V. Kudryakov², I.V. Kolesnikov¹, V.N. Varavka², L.P. Aref'eva²,
A.I. Voropaev¹, and E.S. Novikov¹

¹Rostov State Transport University (RSTU),
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don 344038, Russia

²Don State Technical University (DSTU),
Gagarin square 1, Rostov-on-Don 344000, Russia

Received 01.11.2022.

Revised 15.12.2022.

Accepted 15.12.2022.

Abstract

The aim of the work was to create a technique for calculating the thermal conductivity of a thin surface layer or coating, which differs significantly from the base metal in structure, phase composition, and thermal properties. The technique is based on the experimental measurement of the contact potential difference (CDP) at the layer/coating—substrate interface, followed by the calculation of the electron work function and the energy of the Fermi level. Distinctive features of the developed methodological apparatus are the characteristics of the microstructure, phase composition and porosity of the layer/coating, which are taken into account in the calculation model and significantly affect the final result of determining the effective thermal conductivity. The calculation and experimental approbation of the idea was implemented in the process of studying the blades of an experimental gas turbine locomotive engine with a heterophase thermal barrier coating of the Nb–Ti–Al system. The material of the blades is Inconel 713LC cast chromium-nickel superalloy. Coatings with a thickness of about 80 μm were deposited using the vacuum ion-plasma technology. During the development of the methodology for calculating the thermal conductivity, the experimental data of the CDP were obtained by instrumental measurements according to a specially developed laboratory procedure. Data on the morphology of the structure of coatings, their phase composition and porosity were studied by traditional metal-physical methods and integrated into the calculation part of the technique. The results of model calculations of the thermal conductivity of both the base metal of the substrate (turbine blades) Inconel 713LC and the Nb–Ti–Al thermal barrier coating showed a high agreement with experimental and reference data. The technology has a high potential for application in heavily loaded friction units in various areas of the national economy, such as helicopter construction, aircraft construction, aerospace, railway transport, shipbuilding, and defense.

Keywords: vacuum ion-plasma technology, microstructure of coatings, electron microscopy, thermal conductivity, computational model.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-575-582

Адрес для переписки:

О.В. Кудряков
Донской государственный технический университет (ДГТУ),
пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону 344000, Россия
e-mail: kudryakov@mail.ru

Для цитирования:

В.И. Колесников, О.В. Кудряков, И.В. Колесников, В.Н. Варавка,
Л.П. Арефьева, А.И. Воропаев, Е.С. Новиков.
Аналитическое определение эффективной теплопроводности
гетерофазных поверхностных слоев, покрытий и тонких пленок в
тяжелонагруженных трибосистемах.

Трение и износ.

2022. — Т. 43, № 6. — С. 575—582.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-575-582

Address for correspondence:

O.V. Kudryakov
Don State Technical University (DSTU),
Gagarin square 1, Rostov-on-Don 344000, Russia
e-mail: kudryakov@mail.ru

For citation:

V.I. Kolesnikov, O.V. Kudryakov, I.V. Kolesnikov, V.N. Varavka,
L.P. Aref'eva, A.I. Voropaev, and E.S. Novikov.
[Analytical Determination of the Effective Thermal Conductivity of
Heterophase Surface Layers, Coatings and Thin Films in Heavy-
Loaded Tribosystems].

Trenie i Iznos.

2022, vol. 43, no. 6, pp. 575—582 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-575-582

Список использованных источников

1. **Padtare et al.** Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Engine Applications // Science. — 2002 (296), 280—284
2. **Luo L., Zhou M., Chen Y., Shan X., Lu J., and Zhao X.** Progress Update on Extending the Durability of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings // Ceramics International. — 2022 (48), no. 13, 18021—18034
3. **Qiu S.-Y., Ma Y., Guo H.-B., Wu C.-W., and Huang C.-G.** Microstructure Dependence of Effective Thermal Conductivity of EB-PVD TBCS // Materials. — 2021 (14), no. 8
4. **Колесников И.В.** Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения. — М.: ВИНТИ РАН. — 2017
5. **Roy M.** Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear. — Wien: Springer-Verlag. — 2013
6. **Ellahi R.** Recent Trends in Coatings and Thin Film: Modeling and Application // Coatings. — 2020 (10), no. 8, 777
7. **Колесников В.И., Кудряков О.В., Варавка В.Н., Сукиязов А.Г., Арефьева Л.П., Забияка И.Ю., Новиков Е.С., Воропаев А.И.** Оценка теплопроводности термобарьерных покрытий на основе измеряемых электронных и структурных характеристик // Физическая мезомеханика. — 2022 (25), № 1, 5—25
8. **Banerjee D.A.** A New Ordered Orthorhombic Phase in Ti₃Al-Nb Alloy // Acta Metallurgica. — 1988 (36), 871—872
9. **Chaumat V., Ressouche E., Ouladdiaf B., Desre P., and Moret F.** Experimental Study of Phase Equilibria in the Nb-Ti-Al System // Scripta Materialia. — 1999 (40), no. 8, 905—911
10. **Maniar R. and Bhattacharyay A.** Random Walk Model for Coordinate-Dependent Diffusion in a Force Field // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2021 (584), 126348.
11. **Пчелинцев А.Н., Шишин В.А.** Время релаксации электронов проводимости в металле // Вестник ТГТУ. — 2003 (9), № 3, 464—468
12. **Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю.** Оценка методом самосогласования эффективной теплопроводности трансверсального изотропного композита с изотропными эллипсоидальными включениями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». — 2015, № 3, 99—109
13. **Carslaw H.S. and Jaeger J.C.** Conduction of Heat in Solids. — USA, Oxford University Press. — 1959 (Русскоязычный перевод: Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука. — 1964)
14. **Колесников В.И., Кудряков О.В., Забияка И.Ю., Новиков Е.С., Мантуров Д.С.** Структурные аспекты износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий // Физическая мезомеханика. — 2020 (23), № 1, 62—77
15. **Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.** — М.: Энергоатомиздат. — 1991

References

1. **Padtare et al.** Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Engine Applications // Science. — 2002 (296) 280—284
2. **Luo L., Zhou M., Chen Y., Shan X., Lu J., and Zhao X.** Progress update on extending the durability of air plasma sprayed thermal barrier coatings // Ceramics International. — 2022 (48), no. 13, 18021—18034
3. **Qiu S.-Y., Ma Y., Guo H.-B., Wu C.-W., and Huang C.-G.** Microstructure Dependence of Effective Thermal Conductivity of EB-PVD TBCS // Materials. — 2021 (14), no. 8
4. **Kolesnikov I.V.** Sistemnyi analys i sintez processov, proishodyash'ih v metallopolimernyh uzлах treniya frikcionnogo I antifrikcionnogo naznacheniya. — M.: VINITI RAN. — 2017 (in Russian)
5. **Roy M.** Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear. — Wien: Springer-Verlag. — 2013
6. **Ellahi R.** Recent Trends in Coatings and Thin Film: Modeling and Application // Coatings. — 2020 (10), no. 8, 777
7. **Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Varavka V.N., Sukiyazov A.G., Aref'eva L.P., Zabiya I.Yu., Novikov E.S., and Voropaev A.I.** Estimation of Thermal Conductivity of Thermal Barrier Coatings through Measured Electronic and Structural Characteristics // Physical Mesomechanics. — 2022 (25), no. 3, 195—213
8. **Banerjee D.A.** A New Ordered Orthorhombic Phase in Ti₃Al-Nb Alloy // Acta Metallurgica. — 1988 (36), 871—872
9. **Chaumat V., Ressouche E., Ouladdiaf B., Desre P., and Moret F.** Experimental Study of Phase Equilibria in the Nb-Ti-Al System // Scripta Materialia. — 1999 (40), no. 8, 905—911
10. **Maniar R. and Bhattacharyay A.** Random Walk Model for Coordinate-Dependent Diffusion in a Force Field // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2021 (584), 126348
11. **Pchelintsev A.N., Shishin V.A.** Vremya relaksatsii elektronov provodimosti v metalle // Vest. Tambov. Gos. Tekh. Univ. — 2003 (9), no. 3, 464—468 (in Russian)
12. **Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savelyeva I.Yu.** Otsenka metodom samosoglasovaniya effektivnoy teploprovodnosti transversal'nogo izotropnogo kompozita s izotropnymi ellipsoidal'nymi vklucheniymi // Vest. Mosk. Gos. Tekh. Univ. Bauman. Estest. Nauki. — 2015 (60), no. 3, 99—109 (in Russian)
13. **Carslaw H.S. and Jaeger J.C.** Conduction of Heat in Solids. — Oxford University Press. — 1959

14. **Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabiayaka I.Yu., Novikov E.S., and Manturov D.S.**
Structural Aspects of Wear Resistance of Coatings
Deposited by Physical Vapor Deposition // Physical

- Mesomechanics. — 2020 (**23**), 570—583
15. **Fizicheskie velichiny:** spravochnik / Pod red.
I.S. Grigorjev, E.Z. Meilikhov. — Moscow: Energoatomizdat. — 1991 (in Russian)

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11
Full text of articles can be purchased from the editorial office.
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11
E-mail: FWJ@tut.by