

К. т. н. **Н. В. Титов**¹ (✉), д. т. н. **А. В. Коломейченко**², к. т. н. **Р. Ю. Соловьев**²,
к. т. н. **П. В. Чумаков**³

¹ ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина», г. Орел, Россия

² ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Россия

³ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева», г. Саранск, Россия

УДК 621.1.016

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРОЧНЯЮЩИХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Приведены результаты исследования влияния температуры на теплофизические характеристики металлокерамических покрытий, сформированных карбовибродуговым упрочнением (КВДУ). Установлено, что при увеличении температуры от 25 до 970 °С коэффициент теплопроводности λ покрытий изменяется в диапазоне от 18,1 до 24,0 Вт/(м·К), удельная теплоемкость c покрытий в диапазоне от 560 до 895 Дж/(кг·К), а коэффициент температуропроводности a практически не изменяется, его среднее значение составляет $5,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при моделировании формирования металлокерамических покрытий высокого качества способом КВДУ.

Ключевые слова: металлокерамическое покрытие, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности, карбовибродуговое упрочнение (КВДУ).

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в машиностроении связаны с созданием упрочняющих покрытий на основе новых композиционных металлокерамических материалов, способных значительно повышать эксплуатационные характеристики машин и механизмов за счет использования инновационных ресурсосберегающих технологий при их формировании [1–8].

Из числа известных способов создания упрочняющих металлокерамических покрытий на рабочих поверхностях изделий машиностроения значительный интерес в настоящее время представляет способ карбовибродугового упрочнения (КВДУ) [9–15]. Первый этап КВДУ основан на формировании на упрочняемой поверхности равномерного слоя многокомпонентной пасты. После полимеризации пасты осуществляется ее расплав с применением вибрирующего угольного электрода. Процесс формирования

металлокерамического покрытия с высокими физико-механическими свойствами и триботехническими параметрами осуществляется за счет горения электрической дуги. Основным преимуществом способа КВДУ является стабильное горение электрической дуги между материалом электрода и поверхностью упрочняемой детали.

На данный момент всесторонние исследования теплофизических параметров упрочняющих металлокерамических покрытий, получаемых методом КВДУ, не проводились. Недостаток данных по теплофизическим параметрам КВДУ делает невозможным проведение полномасштабного математического моделирования процесса зажигания и устойчивого горения электрической дуги.

Цель настоящей работы — определение коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности a , а также удельной теплоемкости c упрочняющих металлокерамических покрытий, формируемых способом КВДУ.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При формировании упрочняющих металлокерамических покрытий использовали многоком-



Н. В. Титов

E-mail: ogau@mail.ru

понентную пасту, содержащую 60 % порошка ПР-НХ17СР4, 30 % карбида бора, остальное — криолит. В связи с широким использованием водного раствора клея ПВА в процессах формирования покрытий способом КВДУ указанный раствор выбран в качестве связующего вещества [9–11, 13–15]. Процесс формирования упрочняющих металлокерамических покрытий осуществляли на установке ВДГУ-2, он состоял из двух этапов: равномерного нанесения пасты на образцы, изготовленные из легированной стали 65Г (толщина слоя 2 мм), и сушки образцов при 80–85 °С.

Теплофизические характеристики исследуемых покрытий определяли с применением Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method (ASTM E 1461) [16–19].

Исследования проводили в среде аргона с помощью измерителя теплофизических параметров твердых тел LFA457 MicroFlash компании NETZSCH при 25–970 °С. Метод наименьших квадратов применяли для получения регрессионных уравнений [20, 21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании теплопроводности металлокерамических покрытий, сформированных при КВДУ, установлено, что с увеличением температуры λ также увеличивается (см. таблицу). Так, при 25 °С среднее значение λ покрытия составляет 18,1 Вт/(м·К), а при 970 °С — 24,0 Вт/(м·К). Таким образом, с повышением температуры до наибольшей λ возрастает в среднем на 33 %.

Полученные результаты позволяют условно описать влияние температуры на λ металлокерамического покрытия в виде линейной зависимости:

$$\lambda = \lambda_0 + k_\lambda \cdot t, \quad (1)$$

где λ_0 и k_λ — коэффициенты уравнения регрессии, определяемые с использованием следующих зависимостей:

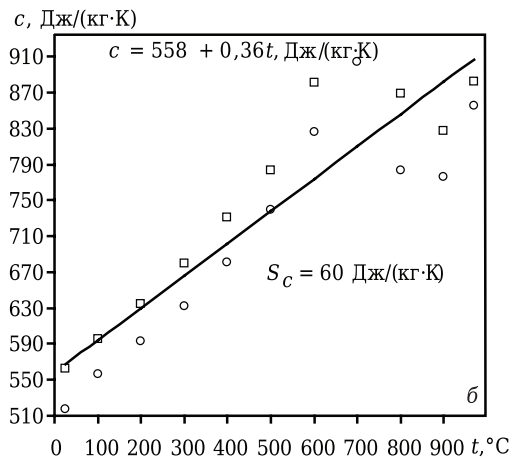
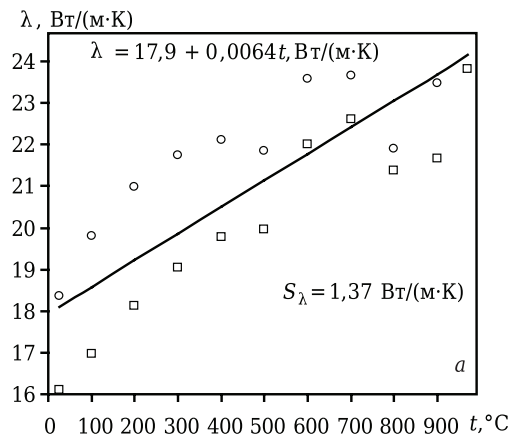
$$\lambda_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i - k_\lambda \sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (2)$$

$$k_\lambda = \frac{n \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n t_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}. \quad (3)$$

Выполнив расчеты с использованием соотношений (2) и (3), получаем следующую зависимость:

$$\lambda = 17,9 + 0,0064t.$$

Графическая зависимость λ от температуры показана на рисунке, а.



Графическая зависимость λ (а) и c (б) покрытия от температуры

Результаты исследования теплофизических параметров металлокерамических покрытий

Температура, °С	λ , Вт/(м·К), образцов		c , Дж/(кг·К), образцов		a , 10^{-6} м ² /с, образцов	
	1	2	1	2	1	2
25	16,10	18,36	562	517	4,97	6,18
100	16,96	19,81	595	557	4,95	6,21
200	18,13	20,98	635	593	4,98	6,15
300	19,04	21,75	680	632	4,87	5,98
400	19,78	22,12	731	681	4,72	5,66
500	19,97	21,85	783	739	4,43	5,14
600	22,02	23,57	881	826	4,34	4,98
700	22,61	23,67	972	904	4,06	4,55
800	21,38	21,91	869	784	4,28	4,87
900	21,66	23,49	827	776	4,57	5,26
970	23,82	26,18	882	856	4,71	5,51

Адекватность гипотезы об однородности дисперсий параллельных испытаний доказана проведенной оценкой однородности дисперсий параллельных опытов образцов с применением критерия Кохрена [20, 21] и уровнем значимости $\alpha = 0,05$. Низкое значение коэффициента вариации (не более 6,5 %) значений теплопроводности говорит о незначительном разбросе полученных значений данного параметра исследуемых покрытий.

При исследовании с металлокерамических покрытий, сформированных при КВДУ, было установлено, что с увеличением температуры она также значительно увеличивается (см. таблицу). Так, среднее значение c покрытия при 25 °С составляет 560 Дж/(кг·К), а при 150 °С — 895 Дж/(кг·К). Таким образом, с возрастанием температуры до наибольшей с покрытия увеличивается в среднем на 60 %.

Анализ полученных данных показал, что зависимость c покрытия от температуры, как и для λ , может быть принята линейной, описываемой следующим соотношением:

$$c = c_0 + c_\lambda \cdot t, \quad (4)$$

где c_0 и c_λ — коэффициенты уравнения регрессии, определяемые по выражениям, аналогичным выражениям (2) и (3).

Окончательно влияние температуры на c металлокерамического покрытия, сформированного при КВДУ, представим в виде зависимости

$$c = 558 + 0,36t.$$

Графическое изображение представленной зависимости показано на рисунке, б.

Библиографический список

1. **Гольшев, А. А.** Формирование металлокерамических покрытий $V_4C-Ti-6Al-4V$ методом SLM / А. А. Гольшев, А. М. Оришч, А. А. Филиппов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2020. — Т. 785, № 11. — С. 39–43.
2. **Фомин, В. М.** Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и V_4C с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления / В. М. Фомин, А. А. Гольшев, В. Ф. Косарев [и др.] // Физическая мезомеханика. — 2019. — Т. 22, № 4. — С. 5–15.
3. **Stolin, A. M.** Deposition of protective coatings by electric arc cladding with SHS electrodes / A. M. Stolin, P. M. Bazhin, M. V. Mikheyev [et al.] // Welding International. — 2015. — Vol. 29, № 8. — P. 657–660.
4. **Леонтьев, Л. Б.** Управление формированием композиционных износостойких металлокерамических покрытий на поверхностях трения деталей / Л. Б. Леонтьев, Н. П. Шапкин, А. Л. Леонтьев [и др.] // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 11-3. — С. 630–635.
5. **Дорохов, А. С.** Повышение износостойкости покрытий, полученных при ТВЧ-борировании с модификацией интерметаллидами систем Fe–Al и Ni–Al / А. С.

Адекватность гипотезы об однородности дисперсий параллельных испытаний доказана проведенной оценкой однородности дисперсий параллельных опытов образцов с применением критерия Кохрена [20, 21] и уровнем значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициент вариации удельной теплоемкости c в рассматриваемом диапазоне температур составляет в среднем 8,1 %, т. е. данный параметр достаточно стабилен.

Из анализа полученных результатов исследования следует, что a , в отличие от остальных его теплофизических характеристик, почти не зависит от температуры (см. таблицу).

Адекватность гипотезы об однородности дисперсий параллельных испытаний доказана проведенной оценкой однородности дисперсий параллельных опытов образцов с применением критерия Кохрена [20, 21] и уровнем значимости $\alpha = 0,05$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диапазон температур исследования теплофизических характеристик металлокерамических покрытий, формируемых способом КВДУ, составил 25–970 °С. Установлено, что при увеличении температуры до наибольшей λ покрытий возрастает от 18,1 до 24,0 Вт/(м·К), c покрытий также возрастает от 560 до 895 Дж/(кг·К); a изменяется незначительно, его среднее значение составляет $5,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Полученные зависимости основных теплофизических характеристик покрытий от температуры могут быть использованы при моделировании процессов формирования металлокерамических покрытий высокого качества способом КВДУ.

- Дорохов, В. Ф. Аулов, В. П. Лялякин [и др.] // Технология машиностроения. — 2020. — № 2. — С. 23–33.
6. **Руденская, Н. А.** Эффекты упрочнения металлокерамических покрытий в процессе их формирования / Н. А. Руденская, Г. П. Швейкин, В. А. Гулецкий // Доклады Академии наук. — 2010. — Т. 433, № 6. — С. 776–779.
7. **Гальченко, Н. К.** Особенности формирования структуры и свойства металлокерамических покрытий, полученных нитридо-плазменной технологией / Н. К. Гальченко, В. П. Самарцев, С. И. Белюк [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2010. — № 1. — С. 60–64.
8. **Сухочев, Г. А.** Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой / Г. А. Сухочев, О. Н. Кириллов, Д. М. Небольсин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2010. — Т. 68, № 8. — С. 39–44.
9. **Kolomeychenko, A. V.** The microstructure of composite cermet coatings produced by carbo-vibroarc surfacing / A. V. Kolomeychenko, N.V. Titov, V.V. Vinogradov [et al.] // Welding International. — 2017. — Vol. 31, № 9. — P. 739–742. <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1318494>.
10. **Sharifullin, S. N.** Surface hardening of cutting elements agricultural machinery vibro arc plasma / S. N.

Sharifullin, N. R. Adigamov, N. N. Adigamov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 669, № 1. — Article № 012049.

11. **Щицын, В. Ю.** Технология вибродугового упрочнения с использованием ферродобавок применительно к условиям Республики Куба / В. Ю. Щицын, Э. С. Э. Кастелл, А. А. Волков // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В. П. Горюхина». — 2018. — № 5. — С. 35–39.

12. **Шарифуллин, С. Н.** Трибологические исследования поверхностей деталей из стали 65Г, упрочненных плазменными методами / С. Н. Шарифуллин, Н. Р. Адигамов, Е. Ю. Кудряшова [и др.] // Технический сервис машин. — 2019. — Т. 136, № 3. — С. 120–127.

13. **Titov, N. V.** Investigation of the hardness and wear resistance of working sections of machines hardened by vibroarc surfacing using cermet materials / N. V. Titov, A. V. Kolomeichenko, V. N. Logachev [et al.] // Welding International. — 2015. — Vol. 29, № 9. — P. 737–739.

14. **Титов, Н. В.** Особенности строения композиционных металлокерамических покрытий, формируемых с использованием многокомпонентных паст на железной основе / Н. В. Титов, А. В. Коломейченко, П. М. Бажин [и др.] // Композиты и наноструктуры. — 2019. — Т. 11, № 2. — С. 64–68.

15. **Коломейченко, А. В.** Повышение износостойкости металлокерамических покрытий, нанесенных методом карбовибродугового упрочнения / А. В. Коломейченко, И. Н. Кравченко, М. Н. Ерофеев [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2019. — № 4. — С. 69–74.

16. **Байков, В. И.** Теплофизика. Термодинамика, статистическая физика, физическая кинетика. Т. 1. / В. И. Байков, Н. В. Павлюкевич, А. К. Федотов [и др.]; под ред. О. Г. Пенязькова. — Минск : Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2013. — 400 с.

17. **Пономарев, С. В.** Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин ; в 2-х кн. Кн. 1. — Тамбов : Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2006. — 204 с.

18. **Вакулин, А. А.** Теплофизика и теоретическая теплотехника : уч. пособие / А. А. Вакулин. — Тюмень : Изд-во Тюменского государственного университета, 2019. — 196 с.

19. **Титов, Н. В.** Теплофизические характеристики многокомпонентных паст для нанесения упрочняющих покрытий / Н. В. Титов, А. В. Коломейченко, В. Л. Басинюк [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. — 2020. — № 12. — С. 2–7. DOI: 10.31044/1813-7008-2020-0-12-2-7.

20. **Ивченко, Г. И.** Математическая статистика : учебник / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. — М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. — 352 с.

21. **Горяинов, В. Б.** Математическая статистика / В. Б. Горяинов, И. В. Павлов, Г. М. Цветкова [и др.]. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 424 с. ■

Получено 22.03.21

© Н. В. Титов, А. В. Коломейченко,
Р. Ю. Соловьев, П. В. Чумаков, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

NANOTECH 2021 — Всемирный конгресс по нанотехнологиям и материаловедению

26—27 июля 2021 г.,

Дубай, ОАЭ



Тематика конгресса:

- Передовые наноматериалы, наночастицы, материаловедение и нанотехнологии
- Молекулярные нанотехнологии и передовые биоматериалы и биоустройства
- 2D- и 3D-материалы, «умные материалы»
- Полимеры и аналитическая химия
- Применение нанотехнологий в науке и в разных отраслях, в защите окружающей среды
- Наноструктуры, наноустройства и наносенсоры
- Материаловедение и химия материалов, нанофизика, наука и инженерия полимеров
- Нанотехнологический риск и безопасность
- Материалы для экологически чистых технологий и передовой керамики, композитные материалы

www.nanotechnologyexpo.conferenceseries.com