

УДК 536.212.2; 621.762

Экспериментальное исследование теплофизических свойств спеченных фрикционных материалов на основе оловянистой бронзы

Канд. техн. наук А. В. ЛЕШОК¹, А. А. КИЛЯШОВ^{2*}, д-р техн. наук И. В. БАРАНОВ²,
А. В. АСАЧ², В. А. КРЫЛОВ²

¹Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа»

²Университет ИТМО

*E-mail: artemy.kiliashov@gmail.com

Спеченные порошковые фрикционные материалы на основе оловянистых бронз широко используются в тяжело нагруженных тормозных системах и устройствах передачи крутящего момента. Однако чистая спеченная бронза не подходит для использования в качестве фрикционного материала. Для придания бронзе требуемых свойств используются добавки различного функционального назначения. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния добавок порошков графита и железа на теплофизические свойства спеченного фрикционного материала на основе 12 % оловянистой бронзы (BrO12) в диапазоне температур от 20 °C до 140 °C. Для испытания теплофизических свойств образцы фрикционных материалов были изготовлены методом порошковой металлургии. Удельная теплоемкость измерялась на установке DSC 204 Phoenix F1 методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Коэффициент температуропроводности определялся методом лазерной вспышки на автоматизированной установке LFA 457 Microflash. Плотность образцов при комнатной температуре определялась методом гидростатического взвешивания. Теплопроводность определялась расчетным способом. В результате получены температурные зависимости удельной теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности исследуемых образцов. Установлено, что наличие графитсодержащих компонентов и железа в составе порошкового фрикционного материала на основе бронзы BrO12 приводит к увеличению его удельной теплоемкости, а также к снижению температуропроводности и теплопроводности. В случае добавления литейного кокса теплопроводность достигает наименьшего значения, что связано с его аморфным строением. При добавлении порошков ГК-1 и ГЭ-1 вклад в теплопроводность вносит дисперсность исходных компонентов. В случае добавления мелкодисперсного графита теплопроводность получается выше, что может быть связано с более равномерным пространственным распределением частиц графита в металлической матрице.

Ключевые слова: трибология, фрикционный материал, теплопроводность, удельная теплоемкость, температуропроводность, дифференциальная сканирующая калориметрия, метод лазерной вспышки.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 13.06.2024, одобрена после рецензирования 10.09.2024, принята к печати 20.09.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-65-71

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Лешок А. В., Килиашов А. А., Баранов И. В., Асач А. В., Крылов В. А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств спеченных фрикционных материалов на основе оловянистой бронзы. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 65–71. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-65-71

Thermophysical properties of sintered friction materials based on tin bronze

Ph. D. A. V. LIASHOK¹, A. A. KILIASHOV^{2*}, D. Sc. I. V. BARANOV², A. V. ASACH², V. A. KRYLOV²

¹State Scientific Institution «Powder Metallurgy Institute»

²ITMO University

*E-mail: artemy.kiliashov@gmail.com

Sintered powder friction materials based on tin bronze are widely used in heavy duty braking systems and torque transmission devices. However, pure sintered bronze is not suitable for use as a friction material. To give bronze the required properties, additives of various functional purposes are used. The purpose of the present work is to experimentally investigate the effect of additives of graphite and iron powders on the thermophysical properties of sintered friction material based on 12 % tin bronze (BrO12) in the temperature range from 20 °C to 140 °C. To test the thermophysical properties, samples of friction materials were produced by powder metallurgy. Specific heat capacity was measured on a DSC 204 Phoenix F1 unit by

differential scanning calorimetry. The diffusivity was determined by laser flash method on an automated LFA 457 Microflash machine. The density of samples at room temperature was determined by hydrostatic weighing method. Thermal conductivity was determined by calculation method. As a result, temperature dependencies of specific heat capacity, thermal diffusivity, and thermal conductivity of the studied samples were obtained. It is established that the presence of graphite-containing components and iron in the composition of powder friction material based on bronze BrO12 leads to an increase in its specific heat capacity, as well as to a decrease in thermal diffusivity and thermal conductivity. In the case of adding foundry coke, thermal conductivity reaches the lowest value, which is due to its amorphous structure. In case of addition of GK-1 and GE-1 powders, the dispersity of initial components contributes to thermal conductivity. In the case of addition of finely dispersed graphite, the thermal conductivity is higher, which may be due to a more uniform spatial distribution of graphite particles in the metal matrix.

Keywords: tribology, friction material, thermal conductivity, specific heat capacity, thermal diffusivity, differential scanning calorimetry, laser flash method.

Article info:

Received 13/06/2024, approved after reviewing 10/09/2024, accepted 20/09/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-65-71

Article in Russian

For citation:

Liashok A. V., Kiliashov A. A., Baranov I. V., Asach A. V., Krylov V. A. Thermophysical properties of sintered friction materials based on tin bronze. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 4. p. 65-71. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-65-71

Введение

Для обеспечения функционирования тормозных систем транспортных средств, устройств передачи крутящего момента, муфт сцепления необходимо применение фрикционных материалов [1]-[3]. Поскольку фрикционные материалы применяют в критически важных узлах трения к ним предъявляются определенные требования, а именно стабильность коэффициента трения, плавность хода в заданном диапазоне эксплуатационных условий, высокая теплопроводность и износостойчивость [4, 5].

В настоящее время производство фрикционных материалов, предназначенных для работы в тяжело нагруженных узлах трения, осуществляется методами порошковой металлургии, которая позволяет получать изделия сложной геометрической формы, а также за счет варьирования химическим составом материала создавать материалы со сложной композиционной структурой из металлических и неметаллических компонентов [6]-[8]. Примером таких изделий могут служить тормозные диски, представляющие собой слой спеченного фрикционного материала, расположенного на стальной подложке. В качестве материала основы спеченных фрикционных материалов широко распространены железо и медь. Материалы на основе железа применяются в узлах сухого трения, а на основе меди — в условиях трения со смазкой [8]-[10].

Медь обладает высокой теплопроводностью, коррозионной стойкостью и износостойкостью. Однако чистая медь не наделена требуемым коэффициентом трения и прочностью, что необходимо для стабильной работы фрикционного механизма, поэтому для получения требуемых механических свойств используются добавки различного функционального назначения [11]-[17]. Легирование медной основы оловом в количестве 6–12 об.% применяется для достижения требуемой прочности и твердости фрикционного материала [18]. Порошки искусственного или природного графита различной дисперсности способствуют приданию необходимых три-

бологических характеристик (коэффициента трения, интенсивности изнашивания) [19]-[23].

Спецификой эксплуатации фрикционных материалов является замыкание пар трения при высоких скоростях скольжения, что сопровождается интенсивным выделением теплоты. Это вызывает повышение температуры как на поверхности материала (до 400 °C и выше), так и в его объеме [24]-[26], что провоцирует повышение скорости износа материала из-за возникновения термических напряжений. В результате происходит разрушение поверхностного слоя материала и, как следствие, снижение ресурса работы всего механизма. Чтобы снизить влияние данного фактора и обеспечить эффективный отвод теплоты из зоны трения, фрикционный материал должен обладать высокой теплопроводностью.

Знание теплофизических свойств является необходимым звеном для прогнозирования срока службы и эффективности работы фрикционного материала. Они требуются для проведения моделирования и анализа тепловых полей (в том числе нестационарных), возникающих в процессе контактного взаимодействия фрикционных систем при заданных эксплуатационных условиях [26, 27]. Для аналитической оценки теплофизических свойств композиционных материалов существует ряд методик [28, 29]. С их помощью можно определить эффективную теплопроводность композита, если известны входящие в его состав компоненты и их теплопроводность. Однако из-за сложной композиционной структуры спеченного фрикционного материала, на его тепловые свойства сильное влияние оказывает пространственная ориентация частиц в матрице, гранулометрический состав исходных порошков и их микроструктура, которые могут приводить к анизотропии тепловых характеристик [27]. Кроме этого, теплофизические свойства большинства материалов могут иметь значительные отличия в зависимости от температуры, что также необходимо учитывать. В связи с этим обстоятельством, далеко не всегда можно определить свойства порошкового композита теоретическим

путем с требуемой точностью. Поэтому в подавляющем большинстве случаев наиболее достоверным источником данных является эксперимент.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния добавок порошка железа, а также порошков природного графита, кокса литейного на теплофизические свойства (удельная теплоемкость, температуропроводность и теплопроводность) спеченного фрикционного материала на основе бронзы с 12 % олова (БрО12) в диапазоне температур от 20 °С до 140 °С.

Материалы и методы

Для получения основы фрикционного материала использовались порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960–2009) со средним размером частиц 80 мкм (рис. 1, а) и олова марки ПО-1 (ГОСТ 9723–73) со средним размером частиц 30 мкм (рис. 1, б). Затем к полученной смеси добавлялись порошки графита элементного марки ГЭ-1 с размером частиц 70...110 мкм, графита карандашного марки ГК-1 со средним размером частиц 7–10 мкм (рис. 1, в), кокса литейного со средним размером частиц 60 мкм (рис. 1, г), порошка железа марки ПЖРВ 3.200. Для получения шихты порошки смешивались в течение 45 мин в лопастном смесителе.

Для испытаний теплофизических свойств фрикционных материалов образцы изготавливали следующим образом: смесь исходных порошков прессовалась в специальной технологической оснастке, позволяющей получить образцы в форме диска диаметром 25±0,5 мм и толщиной

2,5±0,5 мм. Спекание образцов осуществлялось при температуре 840 °С в защитно-восстановительной атмосфере диссоциированного аммиака в течение 50 мин.

Плотность исследуемых образцов при комнатной температуре определялась с помощью метода гидростатического взвешивания. Для измерений массы образцов использовались аналитические весы AND GR-202 (Япония, точность — 0,01 мг). Объем определялся через погружение образцов в дистиллированную воду, плотность которой составляет 998 кг/м³ при температуре 20 °С. Условные номера исследуемых образцов, их составы и плотность приведены в табл. 1.

Экспериментальное измерение удельной теплоемкости исследуемых составов фрикционных материалов проводилось методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на автоматизированном оборудовании Netzsch DSC 204 Phoenix F1 (Германия). Прибор оснащен двумя тиглями с термопарами, в одном из которых располагается исследуемый образец, а в другом — эталонный материал с известной теплоемкостью. В ходе эксперимента фиксируется разность тепловых потоков в зависимости от температуры между образцом и эталонным материалом при их одновременном нагреве или охлаждении с одинаковой скоростью [30, 31]. Достоинством данного метода является быстрота и высокая точность (предел допускаемой относительной погрешности измерения удельной теплоемкости ±2,5%). Эксперимент проводился в режиме монотонного нагрева с шагом 1 °С в интервале температур от 20 °С до 140 °С. Скорость нагрева составляла 10 К/мин.

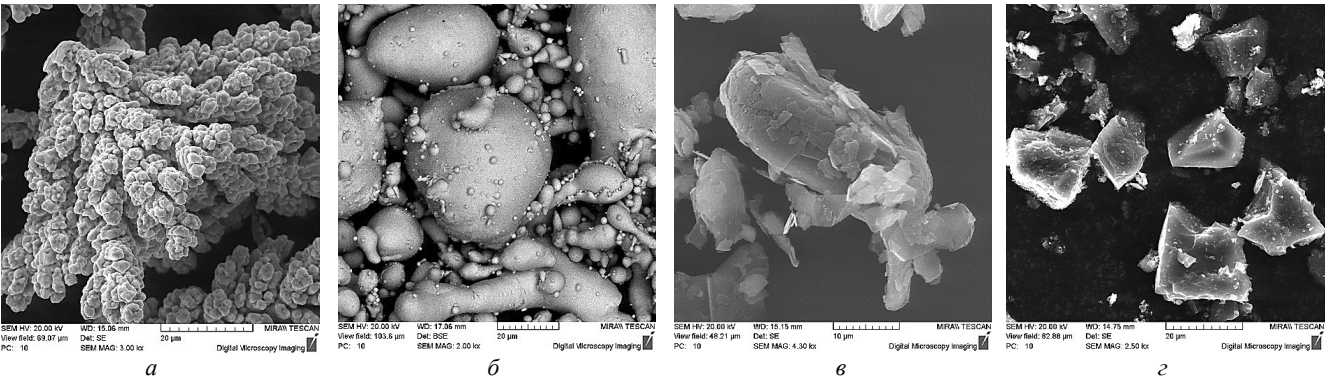


Рис. 1. Изображения частиц исходных порошков, используемых для получения фрикционного материала:
а — ПМС-1; б — ПО-1; в — ГК-1; г — литейный кокс
Fig. 1. Particles of original powders used to obtain friction material: а — PMS-1; б — PO-1; в — GK-1; г — foundry coke

Таблица 1
Составы и плотность исследуемых образцов спеченных фрикционных материалов

Table 1

Compositions and density of the studied samples of sintered friction materials

№ образца	Состав	Плотность, кг/м³
1	100 об.% — 12 % оловянистая бронза	7106
2	70 об.% — 12 % оловянистая бронза; 30 об.% — графит элементный марки ГЭ–1 (70–110 мкм)	6179
3	70 об.% — 12 % оловянистая бронза; 30 об.% — графит карандашный марки ГК–1 (7–10 мкм)	6080
4	70 об.% — 12 % оловянистая бронза; 30 об.% — порошок кокса литейного (< 63 мкм)	5144
5	70 мас.% — медь; 9 мас.% — олово; 9 мас.% — свинец; 4 мас.% — железо; 7 мас.% — графит	6429
6	35–36 об.% –12% оловянистая бронза; 30 об. % — порошок железа; 35–34 об.% — графит элементный марки ГЭ–1 (70–110 мкм)	5564

В качестве продувочного и защитного газа использовался газообразный азот с расходом 20 и 50 мл/мин, соответственно. В качестве эталонного образца использовался сапфир. Для измерений были использованы специальные образцы диаметром 4 мм, толщиной 1 мм.

Исследование температуропроводности образцов проводилось методом лазерной вспышки на автоматизированном оборудовании Netzsch LFA 457 (Германия). Исследуемый образец в форме цилиндра размещается в специальном держателе прибора. Одна из его торцевых сторон облучается коротким лазерным импульсом, в результате воздействия которого происходит нагрев образца. Вызванное лазерным лучом изменение температуры фиксируется на противоположной торцевой поверхности образца в зависимости от времени с помощью инфракрасного детектора, который охлаждается жидким азотом [32]. Измерения выполнены с шагом 20 °С в интервале температур от 20 °С до 140 °С, на каждом из которых проводилось не менее 3-х измерений при термостатировании образцов в течение 5 мин между каждым опытом. Для повышения поглощательной способности образцов на их торцевые поверхности наносился тонкий слой графита.

Используя полученные результаты измерений удельной теплоемкости, коэффициента температуропроводности и плотности образцов, с помощью известного расчетного соотношения определялся их коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho, \tag{1}$$

где λ — коэффициент теплопроводности; a — коэффициент температуропроводности; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность.

Результаты и их обсуждение

Температурные зависимости теплофизических характеристик в диапазоне от 20 °С до 140 °С представлены на рис. 2–4. Ранее авторами были опубликованы тепловые свойства образцов № 3 и 4 в диапазоне температур от 20 °С до 100 °С [33].

График на рис. 2 показывает, что образец 1, представляющий собой чистую спеченную бронзу БрО12, имеет наименьшее значение удельной теплоемкости среди всех исследованных образцов. Включение в состав фрикционного материала графитсодержащих порошков, независимо от их марки, ведет к увеличению удельной теплоемкости от 4 % до 23 %. Это происходит потому, что графит является более теплоемким, чем медь и олово. Максимальное значение удельной теплоемкости (от 22 % до 33 %) фиксируется в случае добавления в состав фрикционного материала порошков 30 об.% графита и 35 об.% железа. Это обусловлено тем, что доля бронзы в объеме материала уменьшается и замещается более теплоемким компонентом — железом. Также зависимость удельной теплоемкости от температуры $c(t)$ является более выраженной во всех образцах с добавками по сравнению с чистой бронзой.

На представленном графике (рис. 3) видно, что температуропроводность чистой спеченной оловянистой бронзы БрО12 проявляет значительную зависимость от температуры. Введение графитовых примесей в фрикционном материале снижает ее. На данном графике также можно наблюдать, что коэффициент температуропроводности образцов 5 и 6 снижается с повышением их температуры. Можно предположить, что присутствие железа в составе фрикционного материала способствует уменьшению температуропроводности с ростом температуры. При этом чем выше объемное содержание железа, тем значительнонее снижается температуропроводность от температуры. Так, в диапазоне температуры от 20 °С до 140 °С в случае наличия 4 об.% порошка железа (образец 5) температуропроводность падает приблизительно на 4,5%, а в случае 30 об.% — на 16,5%.

Самое высокое значение теплопроводности (рис. 4) наблюдается также у образца 1 — чистой оловянистой бронзы БрО12, поскольку в его составе преобладает порошок высокотеплопроводной меди. Модифицирование спеченной бронзы легковесными графитсодержащими добавками снижает плотность фрикционного материала

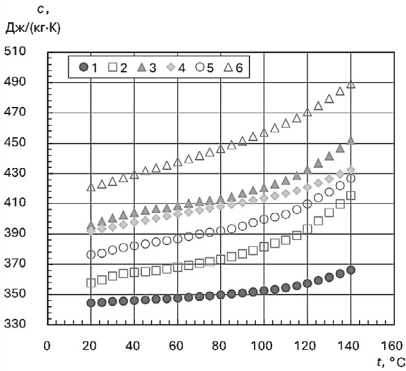


Рис. 2. Температурная зависимость удельной теплоемкости $c(t)$ исследованных фрикционных материалов
Fig. 2. Temperature dependency of specific heat capacity $c(t)$ of the studied friction materials

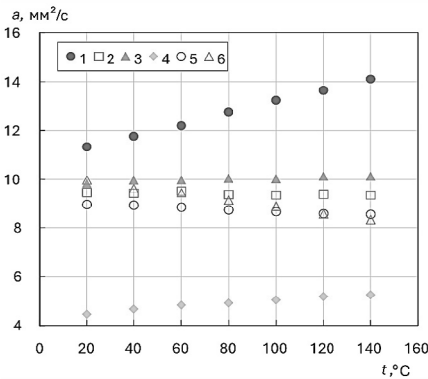


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента температуропроводности $a(t)$ исследованных фрикционных материалов
Fig. 3. Temperature dependency of the thermal diffusivity coefficient $a(t)$ of the studied friction materials

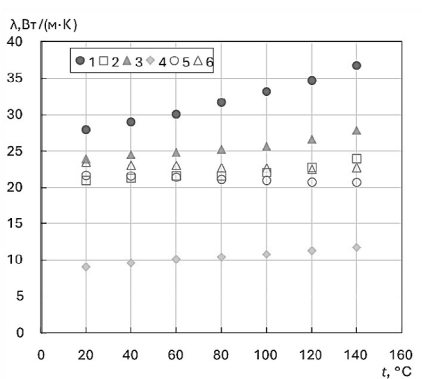


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности $\lambda(t)$ исследованных фрикционных материалов
Fig. 4. Temperature dependency of the thermal conductivity coefficient $\lambda(t)$ of the studied friction materials

(табл. 1), которая оказывает влияние на его теплопроводность.

Наиболее значительное снижение теплопроводности фрикционного материала наблюдается в случае добавления порошка кокса литейного (в среднем на 67 %). Такое снижение теплопроводности, вероятно, обусловлено тем, что кокс имеет аморфную микроструктуру. Напротив, структура порошков графита марок ГЭ–1, ГК–1 является кристаллической, в связи с чем теплопроводность образцов 2 и 3 имеет большее (более высокое) значение.

Также на теплопроводность порошкового фрикционного материала оказывает влияние гранулометрический состав исходных компонентов. Так, коэффициент теплопроводности образца 3 включающего в себя мелкозернистый порошок графита ГК–1 (7–10 мкм) выше на 14–16%, чем образца 2 с маркой графита ГЭ–1 с более крупным размером частиц исходного порошка. Известно, что теплопроводность углерода может иметь различные значения в продольном и поперечном направлениях относительно базисных плоскостей. Вероятно, мелкодисперсный графит обеспечивает более равномерную пространственную ориентацию своих частиц вдоль главных осей кристаллов между частицами металлической матрицы, что в результате обеспечивает более высокую теплопроводность фрикционного материала.

Теплопроводность образцов 2 и 6 с добавками к медной основе только графита, а также графита вместе с железом, соответственно, имеет близкие значения. В данном случае стоит отметить, что образец 2 имеет более высокую плотность, чем образец 6, но при этом разность их плотностей компенсируется разностью удельных теплоемкостей.

Также обращают на себя внимание темпы изменения теплопроводности исследуемых фрикционных материалов при росте температуры. Зависимость $\lambda(t)$ (рис. 4) чистой спеченной бронзы БрО12 (образец 1) в сравнении с остальными исследованными фрикционными материалами выражена наиболее интенсивно. Наличие порошков графита, железа в составе спеченного фрикционного материала (образцы 2–6) снижают его зависимость $\lambda(t)$ в исследованном интервале температур.

Выводы

Экспериментально исследованы теплофизические свойства спеченных фрикционных материалов на основе бронзы с 12 % олова БрО12 в интервале температур от 20 °С до 140 °С в зависимости от добавок порошков графита различных марок и дисперсности, а также порошка железа ПЖРВ 3.200.

По результатам исследования сформулированы следующие выводы.

1. Наличие в составе фрикционного материала графитсодержащих порошков, независимо от их марки, ведет к увеличению удельной теплоемкости от 2 % до 20 %. Максимальное значение удельной теплоемкости достигается в случае добавления в состав фрикционного материала порошков 30 об.% графита и 35 об.% железа. Зависимость удельной теплоемкости от температуры $c(t)$ является более выраженной во всех образцах с добавками по сравнению с чистой порошковой бронзой БрО12.

2. Наличие графитовых порошков приводит к снижению температуропроводности фрикционного материала, а также к уменьшению ее зависимости от температуры по сравнению бронзой без добавок. При наличии порошков железа коэффициент температуропроводности фрикционного материала снижается при росте температуры. При этом чем выше его объемное содержание, тем сильнее снижается температуропроводность с ростом температуры.

3. Добавление в фрикционный материал на основе БрО12 графитовых порошков также приводят к снижению теплопроводности итогового состава. В случае добавления литейного кокса теплопроводность достигает наименьшего значения, что связано с его аморфным строением. При добавлении порошков ГК–1 и ГЭ–1 вклад в теплопроводность вносит дисперсность исходных компонентов. В случае добавления мелкодисперсного графита теплопроводность получается выше на 9–12%, что может быть связано с более равномерным пространственным распределением частиц графита в металлической матрице.

4. В случае добавления графита ГЭ–1 и железа ПЖРВ теплопроводность остается примерно одинаковой, что обусловлено разностью их плотностей и удельных теплоемкостей.

5. Наиболее значительную зависимость теплопроводности с ростом температуры имеет чистая спеченная бронза БрО12. Комбинация порошковой бронзы БрО12 с графитовыми и железными порошками снижают их зависимость $\lambda(t)$ в исследованном интервале температур.

Литература/References

1. Yu L., Ma B., Chen M., Li H. Y., Liu J. Experimental study on the friction stability of paper-based clutches concerning groove patterns. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2020. Vol. 72, No. 4. P. 541–548. DOI: 10.1108/ILT-03-2019-0098
2. Yu L., Ma B., Chen M., Li H., Ma C., Liu J. Comparison of the Friction and Wear Characteristics between Copper and Paper Based Friction Materials. *Materials*. 2019. Vol. 12, iss. 18. Article 2988. DOI: 10.3390/ma12182988
3. Wang X., Ru H. Effect of Lubricating Phase on Microstructure and Properties of Cu — Fe Friction Materials. *Materials*. 2019. vol. 12, iss. 2, 313. DOI: 10.3390/ma12020313
4. Derkacheva G. M., Panaioti I. I. Friction powder materials (review). *Powder Metallurgy and Metall Ceramics*. 1989, vol. 28, pp. 968–975. DOI: 10.1007/BF00793885
5. Serrano-Munoz I., Rapontchombo J., Magnier V., Brunel F., Kossman S., Dufrénoy P. Evolution in microstructure and compression behaviour of a metallic sintered friction material after braking. *Wear*. 2019, vol. 436–437, 202947. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202947
6. Kuhn H. Powder metallurgy processing: the techniques and analyses. Elsevier, 1978, 208 p.
7. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1980. 496 с. [Kiparisov S. S., Libenson G. A. Powder metallurgy. M.: Metallurgy, 1980. 496 p. (in Russian)]
8. Chang I., Zhao Y. Advances in powder metallurgy. Properties, processing and applications. Elsevier science, 2013, 642 p.
9. Chichinadze A. V. Theoretical and practical problems of thermal dynamics and simulation of the friction and wear of tribocouples.

- Journal of Friction and Wear*. 2009, vol. 30, pp. 199–215. DOI: 10.3103/S106836660903009X
10. Zhang P., Zhang L., Fu K., Cao J., Shijia C., Qu X. Effects of different forms of Fe powder additives on the simulated braking performance of Cu-based friction materials for high-speed railway trains. *Wear*. 2018. vol. 414–415. pp. 317–326. DOI: 10.1016/j.wear.2018.09.006
 11. Prapai J., Morakotjinda. M., Yotkaew T., Vetayanukul B. Tribological properties of PM Cu-based dry friction clutch. *Key Engineering Materials*. 2013. vol. 545, pp. 163–170. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.545.163
 12. Yotkaew T., Tosangthum N., Krataitong R. etc. Sintered Frictional Materials Based on Cu Powders. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 747, pp 55–58. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.747.55
 13. Ost W., Baets P. De, Degrieck J. The tribological behaviour of paper friction plates for wet clutch application investigated on SAE and pin-on-disk test rigs. *Wear*. 2001. Vol. 249. pp. 361–371. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00540-3
 14. Ma W., Lu J. Effect of Sliding Speed on Surface Modification and Tribological Behavior of Copper — Graphite Composite. *Tribology Letters*, 2011, vol. 41, pp. 363–370. doi: 10.1007/s11249-010-9718-x
 15. Xiao Y., Yao P., Fan K., Zhou H., Deng M., Jin Z. Powder metallurgy processed metal-matrix friction materials for space applications. *Friction*, 2018, vol. 6, pp. 219–229. DOI: 10.1007/s40544-017-0171-9
 16. Kennedy Z. E., Rajaram G. Tribological behavior of metal-ceramic composites for high friction and high temperature applications. *Materials today: proceedings*. 2022, vol. 55, Part 2, pp. 287–293. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.298
 17. X. Xiao., Y. Yin, J. Bao, L. Lu, X. Feng. Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8 (5). DOI: 10.1177/16878140166473
 18. Чичинадзе А. В. и др. Основы трибологии (трение, износ и смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с. [Chichinadze A. V. et al. Fundamentals of tribology (friction, wear and lubrication): Textbook for technical universities. 2nd ed. of the redevelopment. and an additional one. Under the general editorship of A. V. Chichinadze. M.: Mechanical engineering, 2001. 664 p. (in Russian)]
 19. Kato H., Takama M., Washida K., Sasaki Y., Miyashita S. Mechanical and Wear Properties of Sintered Cu-Sn Composites Containing Copper-Coated Solid Lubricant Powders. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 2003, vol. 50, iss. 11, pp. 968–972. DOI: 10.2497/jjspm.50.968
 20. Ma W., Lu J. Effect of Sliding Speed on Surface Modification and Tribological Behavior of Copper — Graphite Composite. *Tribology Letters*, 2011, vol. 41, pp. 363–370. DOI: 10.1007/s11249-010-9718-x
 21. Kato H., Takama M., Iwai Y., Washida K., Sasaki Y. Wear and mechanical properties of sintered copper-tin composites containing graphite or molybdenum disulfide. *Wear*, 2003, Vol. 255, pp. 573–578. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00072-3
 22. Kestursatya M., Kim J. K., Rohatgi P. K. Wear performance of copper-graphite composite and a leaded copper alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, Vol. 339, pp. 150–158. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00114-4
 23. Pérez B., Echeberria J. Influence of abrasives and graphite on processing and properties of sintered metallic friction materials. *Heliyon*, 2019, vol. 5, iss. 8, e02311. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02311
 24. Wasilewski P. Frictional Heating in Railway Brakes: A Review of Numerical Models. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2020, vol. 27, pp. 45–58. DOI: 10.1007/s11831-018-9302-3
 25. Yevtushenko A. A., Grzes P., Adamowicz. A. Numerical analysis of thermal stresses in disk brakes and clutches (a review). *An International Journal of Computation and Methodology*, 2015, vol. 67, iss. 2, pp. 170–188. DOI: 10.1080/10407782.2014.923221
 26. Abdullah O. I., Schlattmann J. Contact Analysis of a Dry Friction Clutch System. *International Scholarly Research Notices*, 2013, vol. 2013, 495918. DOI: 10.1155/2013/495918
 27. Zhimeng T., Zemin W., Lei X., Libo Z., Zhaohui H., Jianhua L. Thermal and tribological properties of MoS₂ doped graphite/copper composites by microwave sintering. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021. vol. 15, pp. 6001–6010. doi:10.1016/j.jmrt.2021.11.053
 28. Кудинов В. А., Аверин Б. В., Стефанюк Е. В. Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях. Москва: Высшая школа, 2008, 305 с. [Kudinov V. A., Averin B. V., Stefanyuk E. V. Thermal conductivity and thermoelasticity in multilayer structures. Moscow: Higher School, 2008, 305 p. (in Russian)]
 29. Дульнев Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991, 248 с. [Dulnev G. N. Transfer processes in inhomogeneous media. L.: Energoatomizdat, 1991, 248 p. (in Russian)]
 30. E. S. Watson, M. J. O’neill, J. Justin, N. Brenner. A Differential Scanning Calorimeter for Quantitative Differential Thermal Analysis. *Analytical Chemistry*, 1964, vol. 36, iss. 7, pp. 1233–1238. DOI: 10.1021/ac60213a019
 31. Федоров А. В., Баранов И. В., Тамбулатова Е. В., Волков С. М., Прохорова Л. Т., Крылов В. А. Исследование температурных зависимостей удельной теплоемкости рафинированных подсолнечных масел от их состава методом дифференциальной сканирующей калориметрии // Вестник Международной академии холода. 2019. № 1. С. 52–63. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-52-63 [Fedorov A. V., Baranov I. V., Tambulatova E. V., Volkov S. M., Prokhorova L. T., Krylov V. A. Investigation of the temperature dependence of the specific heat capacity of the refined sunflower oils from their composition by the method of differential scanning calorimetry. Journal International Academy of Refrigeration. 2019. No 1. p. 52–63. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-52-63 (in Russian)]
 32. Parker W. J. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity / W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, G. L. Abbott. *Journal of applied physics*, 1961, vol. 32, iss. 9. pp. 1679–1684. DOI: 10.1063/1.1728417
 33. Asach A. V. Thermophysical characteristics of friction materials based on bronze with 12 % tin with the addition of GK–1 graphite powder and foundry coke / A. V. Asach, I. V. Baranov, A. A. Kiliashov, V. A. Krylov, A. V. Liashok. *Physical Sciences and Technology*, 2022, vol. 9, iss. 3–4, pp. 83–88. DOI:10.26577/phst.2022.v9.i2.010

Сведения об авторах

Лешок Андрей Валерьевич

К. т. н., старший научный сотрудник, Институт порошковой металлургии им. Академика О. В. Романа, ул. Платонова, 41, г. Минск, 220005, Республика Беларусь, sdlav@tut.by.
ORCID: 0000-0001-9634-1800

Киляшов Артемий Александрович

Аспирант, Образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, aakiliashov@itmo.ru.
ORCID: 0000-0001-5212-1566

Баранов Игорь Владимирович

Д. т. н., профессор, директор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ivbaranov@itmo.ru. ORCID: 0000-0003-0595-368X

Асач Алексей Владимирович

Старший преподаватель, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, avasach@itmo.ru. ORCID: 0000-0001-9509-2048

Крылов Василий Александрович

Инженер 2 категории, межфакультетская лаборатория «Трансляционные технологии в образовании», аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vakrylov@itmo.ru. ORCID: 0000-0003-3105-2172

Information about authors

Liashok Andrei V.

Ph. D., Senior researcher, Institute of Powder Metallurgy named after Academician O. V. Romana, st. Platonova, 41, Minsk, 220005, Republic of Belarus, sdlav@tut.by.
ORCID: 0000-0001-9634-1800

Kiliashov Artemii A.

Postgraduate student, Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, aakiliashov@itmo.ru.
ORCID: 0000-0001-5212-1566

Baranov Igor V.

D. Sc., Professor, Director of the educational center “Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, ivbaranov@itmo.ru. ORCID: 0000-0003-0595-368X

Asach Alexey V.

Senior Lecturer, Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, avasach@itmo.ru.
ORCID: 0000-0001-9509-2048

Krylov Vasilii A.

Engineer of Interfaculty laboratory «Translational technologies in education», Postgraduate student of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, vakrylov@itmo.ru.
ORCID: 0000-0003-3105-2172



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Университет ИТМО
Международная академия холода

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

28 января 2025 г.

ТЕМЫ, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- традиционные и альтернативные рабочие вещества техники низких температур, их смеси, холодильные масла и растворы;
- прогресс инновационных решений будущих систем охлаждения, нагревания и кондиционирования;
- горизонты энергосберегающих технологии генерации тепла и холода; обратимые термоэлектрические циклы;
- дискомфорты теплообмена и массопереноса в системах искусственного холода;
- теплообмен при кипении смесевых хладагентов с маслами; доминирующая реальность транскритических циклов;
- компрессоры для альтернативных рабочих веществ; автономные рефрижераторные установки и тепловые насосы;
- тепловые насосы, кондиционеры, системы охлаждения и заморозки на транспорте;
- охлаждение и обогрев в электромобилях; технологии низких температур и глобальные экологические проблемы;
- сценарии применения возобновляемых источников энергии для низкотемпературных систем;
- диалоги о технике безопасности при использовании природных хладагентов.

Подробная информация на сайте:

<https://iarspb.tilda.ws/climaticaspectsoftheapplicationoflow-temperaturetechnologies>