

УДК 621.762:621.89

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-36-42

Композиционный антифрикционный материал $\text{MoSi}_2\text{--MoS}_2$

© 2022 г. Г.Ю. Смorchков, А.И. Рачковский, Г.В. Баранов, Д.Н. Кондрохин, С.С. Курганов

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ–ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

Статья поступила в редакцию 14.07.20 г., доработана 29.03.21 г., подписана в печать 06.04.21 г.

Аннотация: Разработан новый высокотемпературный композиционный антифрикционный материал 90 % MoSi_2 + 10 % MoS_2 с коэффициентом трения покоя менее 0,3. Он работоспособен при температурах до 1500 °С в условиях нейтронного облучения в среде инертных газов. Отработаны режимы приготовления смеси исходных порошков MoSi_2 и MoS_2 и горячего прессования полученной шихты в индукционно-вакуумной установке в графитовых пресс-формах при температуре 1600–1650 °С и удельном давлении горячего прессования 25 МПа с выдержкой 1 ч при данных значениях температуры и давления. Исследованы триботехнические свойства материала в зависимости от усилия сжатия в паре трения и от твердости материала контртела в паре трения. Показано, что чем выше усилие сжатия и чем тверже материал контртела в паре трения, тем меньше коэффициент трения. Установлено влияние температуры на физико-механические и теплофизические свойства материала. При ее увеличении с 20 до 1000 °С прочность материала при сжатии уменьшается с 1388 до 739 МПа. Повышение температуры с 25 до 400 °С ведет к росту удельной теплоемкости от 427 до 596 Дж/(кг·К) и коэффициента теплопроводности от 2,35 до 3,41 Вт/(м·К). Подшипники скольжения из данного материала успешно прошли ресурсные и реакторные испытания.

Ключевые слова: композиционный антифрикционный материал, порошки, дисилицид молибдена, дисульфид молибдена, горячее прессование, микроструктура, плотность, пористость, твердая смазка, коэффициент трения, пара трения, прочность.

Смorchков Г.Ю. – нач.-к лаборатории керамических материалов РФЯЦ–ВНИИЭФ (607188, Нижегородская обл. г. Саров, пр-т Мира, 37). E-mail: GYuSmorchkov@vniief.ru.

Рачковский А.И. – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. лаборатории тугоплавких материалов РФЯЦ–ВНИИЭФ. E-mail: AIrachkovskij@vniief.ru.

Баранов Г.В. – канд. техн. наук, нач.-к науч.-исслед. отд.-ния РФЯЦ–ВНИИЭФ. E-mail: GVBaranov@vniief.ru.

Кондрохин Д.Н. – нач.-к группы в лаборатории керамических материалов РФЯЦ–ВНИИЭФ. E-mail: DNKondrohin@vniief.ru.

Курганов С.С. – инженер-технолог лаборатории керамических материалов РФЯЦ–ВНИИЭФ. E-mail: SSKurganov@vniief.ru.

Для цитирования: Смorchков Г.Ю., Рачковский А.И., Баранов Г.В., Кондрохин Д.Н., Курганов С.С. Композиционный антифрикционный материал $\text{MoSi}_2\text{--MoS}_2$. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2022. Т. 16. № 1. С. 36–42. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-36-42.

$\text{MoSi}_2\text{--MoS}_2$ composite antifriction material

G.Yu. Smorchkov, A.I. Rachkovskij, G.V. Baranov, D.N. Kondrokhin, S.S. Kurganov

Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC–VNIIEF), Sarov, Russia

Received 14.07.2020, revised 29.03.2021, accepted for publication 06.04.2021

Abstract: A new high-temperature antifriction composite material 90 % MoSi_2 + 10 % MoS_2 was developed with a static friction coefficient of less than 0.3. The material is functional at temperatures up to 1500 °C under neutron irradiation in an inert gas environment. Modes of initial MoSi_2 and MoS_2 powder mixture preparation and hot pressing of the resulting charge in a vacuum induction unit in graphite molds were worked out at a temperature of 1600–1650 °C, specific hot pressing pressure of 25 MPa, and holding for 1 h at these values of temperature and pressure. Tribotechnical properties of the material depending on the compression force in the friction pair and on the counterbody material hardness were investigated. It was shown that the higher the compression force and the harder the counterbody material in the friction pair, the lower the coefficient of friction. The effect of temperature on

the physical, mechanical and heat-transfer properties of the material was established. As the temperature increases from 20 to 1000 °C, the material compressive strength decreases from 1388 to 739 MPa. An increase in the temperature from 25 to 400 °C leads to an increase in the specific heat capacity from 427 to 596 J/(kg·K) and the coefficient of heat conductivity from 2.35 to 3.41 W/(m·K). Plain bearings made of this material successfully passed durability and reactor tests.

Keywords: antifriction composite material, powders, molybdenum disilicide, molybdenum disulphide, hot pressing, microstructure, density, porosity, solid lubricant, friction coefficient, friction pair, fracture strength.

Smorchkov G.Yu. – head of the laboratory «Ceramic materials» of Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC–VNIIEF) (607188, Russia, Sarov, Mira pr., 37). E-mail: GYuSmorchkov@vniief.ru.

Rachkovskij A.I. – Cand. Sci. (Eng.), leading researcher of the laboratory «Refractory materials» of RFNC–VNIIEF. E-mail: AIRachkovskij@vniief.ru.

Baranov G.V. – Cand. Sci. (Eng.), head of the scientific research department of RFNC–VNIIEF. E-mail: GVBaranov@vniief.ru.

Kondrokhin D.N. – head of the group in the laboratory «Ceramic materials» of RFNC–VNIIEF. E-mail: DNKondrohin@vniief.ru.

Kurganov S.S. – engineer-technologist of the laboratory «Ceramic materials» of RFNC–VNIIEF. E-mail: SSKurganov@vniief.ru.

For citation: Smorchkov G.Yu., Rachkovskij A.I., Baranov G.V., Kondrokhin D.N., Kurganov S.S. MoSi₂–MoS₂ composite antifriction material. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2022. Vol. 16. No. 1. P. 36–42 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-36-42.

Введение

В современной технике (двигателестроение, ядерная энергетика, ракетостроение, химическое машиностроение и др.) необходимы антифрикционные материалы, работающие в агрессивных средах, при высоких температурах (1000 °C и более), в условиях глубокого вакуума и высокого уровня радиоактивного излучения.

Проблема создания антифрикционных материалов для работы в узлах трения различного назначения может быть решена с использованием методов порошковой металлургии, которые позволяют получать композиционные антифрикционные материалы (КАМ) с широкими возможностями по составу и пористости. Их структура должна быть гетерогенной, мелкозернистой и отвечать правилу Шарпи, т.е. представлять собой сочетание твердых и более мягких компонентов, причем самым мягким компонентом антифрикционного материала являются поры. Определяющий признак данных материалов — сравнительно низкий коэффициент сухого трения (обычно ≤0,3) и хорошая прирабатываемость [1, 2].

Цель настоящей работы — разработка КАМ, работоспособного при температурах до 1500 °C в условиях нейтронного облучения в среде инертных газов.

В настоящее время в качестве твердых смазок широко применяются графит [1, 3–7], дисульфид молибдена [1, 3–6, 8, 9], нитрид бора [1, 4, 10–13], фторид кальция [1, 3, 5, 14–16] и др.

В состав разрабатываемого композиционного материала должны входить жаростойкая пористая матрица и высокотемпературная твердая смазка. В связи с тем, что контртелом для подшипника скольжения в нашем случае будет служить деталь из молибденового сплава ТМ-7, то, с учетом предъявляемых к КАМ требований, в качестве матрицы очень хорошо подходит такое тугоплавкое соединение, как дисилицид молибдена (MoSi₂), имеющий наилучшую из всех простых силицидов жаростойкость. Температура плавления MoSi₂ составляет 2020 °C. В восстановительных, инертных и окислительных газах MoSi₂ устойчив до $t = 1400\div1700$ °C [17–19]. Его высокая жаростойкость обеспечивается защитным слоем SiO₂, который формируется на поверхности MoSi₂ при окислении [20].

Анализ литературных данных показал, что наиболее подходящий материал для использования в качестве твердой смазки в создаваемом КАМ — дисульфид молибдена (MoS₂). Этот материал является одной из наиболее распространенных твердых смазок. Дисульфид молибдена не токсичен, не чувствителен к радиоактивному излучению и обладает высокой химической стабильностью. В среде инертных газов в качестве твердой смазки он может применяться вплоть до $t = 1540$ °C. Дисульфид молибдена обеспечивает низкий коэффициент трения и незначительный износ трущихся

ся поверхностей, выдерживая при этом высокие удельные нагрузки. Исключительные смазывающие свойства MoS_2 в сочетании с его высокой термической стабильностью, коррозионной стойкостью и хорошей адгезией к металлическим поверхностям позволяют использовать дисульфид молибдена для создания композиционных самосмазывающихся материалов. Лучшие антифрикционные свойства обеспечивают порошки MoS_2 с чистотой не менее 98,5 % [1, 3—6, 8, 9].

На основании вышеизложенного можно признать перспективным двухкомпонентный КАМ на основе дисилицида молибдена с дисульфидом молибдена в качестве твердой смазки. Содержание компонентов в КАМ может изменяться в широких пределах. Известны КАМ для работы при температурах до 1300 °С на основе тугоплавких металлов (Mo, Nb, Ta, W) с добавлением дисульфидов данных металлов (MoS_2 , NbS_2 , TaS_2 , WS_2) в количестве 20—97 % [1]. Увеличение содержания MoS_2 в КАМ ведет к уменьшению коэффициента трения и износа материала. Обычно явление схватывания пар трения устраняется при введении в материал 5 % MoS_2 . Однако малое содержание MoS_2 в КАМ не обеспечивает необходимых антифрикционных свойств, а с повышением количества MoS_2 материал утрачивает прочностные свойства. Кроме того, получение КАМ, содержащих более 10 % MoS_2 , технически затруднено. Применяя спекание под давлением или горячее прессование и используя довольно крупные порошки MoS_2 с размером частиц около 70 мкм, можно получать материалы, содержащие до 50—68 % MoS_2 [5, 8].

В технологическом процессе изготовления КАМ большую роль играет операция приготовления порошковой смеси (шихты). От качества смешивания и точности дозирования исходных составляющих материала зависят его конечный состав и свойства. Качество смешивания исходных порошков определяется видом применяемого оборудования и режимами смешивания. С использованием для перемешивания порошков MoSi_2 и MoS_2 биконического смесителя не удалось получить горячим прессованием качественные образцы КАМ. Они отличались высокой пористостью и низкой прочностью. Метод приготовления шихты на основе данных порошков в планетарной центробежной мельнице «Pulverisette 6» (Fritsch, Германия) оказался очень эффективным и позволил решить проблему качества получаемого антифрикционного материала. По результатам ана-

лиза проведенных предварительных исследований за основу был выбран состав порошковой смеси 90 % MoSi_2 + 10 % MoS_2 .

Методика проведения исследований

Для создания композиционного антифрикционного материала 90% MoSi_2 —10% MoS_2 использовали готовые промышленные порошки MoSi_2 (ТУ 6-09-03-395-74) с размером частиц 20—40 мкм и MoS_2 (марка ДМ-1, ТУ 48-19-133-90) со средним размером частиц 7 мкм и суммарным содержанием примесей (Si, Fe, Al, Ca, MoO_3) менее 1 %.

Шихту готовили перемешиванием исходных порошков в планетарной центробежной мельнице «Pulverisette 6» при следующих условиях: скорость вращения барабана — 150 мин⁻¹ (соответствует центробежному ускорению 5 g), соотношение «шары : смесь» = 1 : 1, барабан с футеровкой из твердого сплава ВК15, шары стальные (ШХ15), время обработки — 10 мин.

Из полученной шихты горячим прессованием изготавливали заготовки для образцов. Горячее прессование заготовок проводили в индукционно-вакуумной установке собственной разработки ($t_{\text{max}} = 2200$ °С) в графитовых пресс-формах по режиму: нагрев до 1300 °С со скоростью 25 °С/мин, выдержка 30 мин, затем нагрев до 1600—1650 °С со скоростью 20 °С/мин с выдержкой 60 мин при удельном давлении прессования 25 МПа. Плотность горячепрессованных заготовок определяли методом гидростатического взвешивания в воде (ГОСТ 18898-89).

Из полученных заготовок КАМ изготавливали образцы для определения следующих свойств материала: антифрикционных (коэффициент трения покоя: образцы Ø15×5 мм), физико-механических (предел прочности при сжатии: образцы Ø6×9 мм, предел прочности при изгибе: образцы 5×5×35 мм) и теплофизических (теплоемкость: образцы Ø15×10 мм, теплопроводность: образцы Ø15×5 мм).

Механическую обработку выполняли на электроэрозионном станке ДК 7732 (компания «Доминик», г. Челябинск) (молибденовая проволока МО-1 диаметром 0,18 мм) с последующим шлифованием алмазным кругом с подачей СОЖ.

Определение коэффициента трения покоя проводили на установке собственной разработки. Принцип работы установки показан на рис. 1.

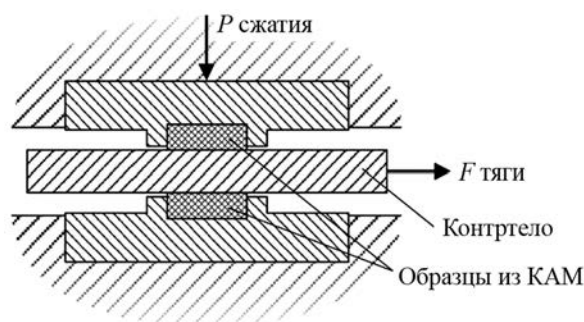


Рис. 1. Принципиальная схема работы установки для определения коэффициента трения покоя

Fig. 1. Process functional diagram of the unit for static friction coefficient measurement

Испытания проводили при комнатной температуре при удельных давлениях сжатия на контактирующую пару $\sigma = 0,5$ и $1,0$ МПа. В ходе испытаний к контактирующей паре нормально прикладывается усилие сжатия $P_{сж}$ (контролируется динамометром сжатия ДОСМ-3-0,05 (Точприбор, г. Новосибирск)). Тяговое усилие (контролируется динамометром растяжения ДОР-3-0,1 (ПетВес, г. Санкт-Петербург)) вызывает сдвиг подвижного образца (контртела) относительно неподвижных образцов из КАМ. Момент сдвига определяется по показаниям индикатора с одновременной фиксацией на динамометре растяжения усилия сдвига (силы трения f).

Подвижные образцы в виде плоских плиток с размерами $60 \times 30 \times 9$ мм (по 5 шт.) были изготовлены трех видов — из стали У8, стали 12Х18Н10Т и молибденового сплава ТСМ-7 (Мо + 0,1 % Та). В качестве неподвижных образцов (всего испытаны 10 шт.) служила пара образцов из КАМ.

Коэффициент трения покоя рассчитывался по формуле

$$\mu = f / (2P_{сж}), \quad (1)$$

где f — сила трения покоя, $P_{сж}$ — нормальное усилие сжатия образцов.

Испытания по определению предела прочности при поперечном изгибе проводили по ГОСТ 20019-74 на разрывной машине ИР 5047-50 (Завод испытательных приборов, г. Иваново) со скоростью перемещения подвижного захвата машины 2 мм/мин и расстоянием между опорами 30 мм. Испытывалось по 4 образца при каждой из трех температур: 20, 150 и 300 °С.

Испытания на сжатие выполняли при $t = 20$,

500 и 1000 °С (по 5 образцов на каждой температуре) на испытательной машине «Instron 5984» (Instron, США) со скоростью перемещения traversы 1 мм/мин, что соответствует скорости относительной деформации $\epsilon \approx 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Нагрев образцов при испытаниях на сжатие проводили в печи модели SF-16 2230.

Испытания по определению удельной теплоемкости КАМ проводили в соответствии с ГОСТ 23630.1-79 на измерителе теплоемкости ИТ-с-400 (приборостроительный завод, г. Актюбинск, Казахстан), а коэффициент теплопроводности определяли в соответствии с ГОСТ 23630.2-79 на измерителе теплопроводности ИТ-λ-400 (тот же производитель).

Микроструктуру КАМ изучали на оптическом микроскопе «Axiovert 200 MAT» (Carl Zeiss, Германия).

Микрошлифы были изготовлены по методике Struers на шлифовально-полировальном станке «LaboPol-5» (Struers, Дания) с использованием оригинальных расходных материалов. Травление шлифов не производилось.

Исследование пористости осуществляли на оптическом микроскопе «Axio Observer.Alm» (Carl Zeiss, Германия) с применением системы анализа изображений «ВидеоТест-Металл 1.2» по ГОСТ 8233-56.

Твердость материалов контртел по Виккерсу (HV) определяли на твердометре ИТ 5010 (завод испытательных приборов, г. Иваново) по ГОСТ 2999-75 при нагрузке 49,03 Н (5 кгс).

Результаты и их обсуждение

Из шихты 90 % MoSi_2 + 10 % MoS_2 горячим прессованием были получены заготовки в виде цилиндров $\varnothing 40 \times 12$ мм (1 шт.), $\varnothing 40 \times 18$ мм (2 шт.) и пластина $80 \times 50 \times 5,5$ мм (1 шт.), из которых методом электроэрозионной резки с последующим алмазным шлифованием изготовили образцы для определения триботехнических, физико-механических и теплофизических свойств КАМ. Плотность заготовок составляла 6,11–6,41 г/см³.

Металлографические исследования показали, что КАМ имеет однородную двухфазную структуру с равномерно распределенной пористостью (рис. 2), что полностью отвечает требованиям к структуре антифрикционного материала с сухой смазкой. Следы химического взаимодействия между основой и твердой смазкой в виде посто-

ронных фаз или включений в ходе исследований не выявлены.

Пористость КАМ составляет 13,5 %.

Установлена зависимость триботехнических свойств КАМ от нагрузки и материала контртела в паре трения (табл. 1).

Как видно из табл. 1, разработанный КАМ удовлетворяет требованиям к антифрикционным материалам (коэффициент сухого трения $\mu \leq 0,3$ [2]).

Показано, что с увеличением усилия сжатия в паре трения коэффициент трения уменьшается. Он также уменьшается с повышением твердости контртела в паре трения. Особенно положительно влияет MoS_2 на процесс трения сталей и сплавов, в состав которых входит молибден [4, 5, 8].

Помимо хороших триботехнических свойств композиционный антифрикционный материал должен обладать физико-механическими и теплофизическими характеристиками, достаточными для обеспечения высоких эксплуатационных свойств материала во всем диапазоне рабочих температур.

Результаты испытаний образцов из КАМ при сжатии и на поперечный изгиб при различных температурах приведены в табл. 2. В ходе испытаний выявлено, что для данного материала характерно хрупкое разрушение.

Установлено, что с повышением температуры прочность КАМ снижается. Практически, прочность данного материала при сжатии на порядок выше прочности при изгибе.

Главным недостатком металлокерамических композиций являются хрупкость и низкая прочность при изгибе и растяжении, что не позволяет изготавливать из них детали в виде валов. Использование валов из высокотемпературных сплавов с металлокерамическим покрытием в сочетании с втулками из металлокерамики является одним из путей обеспечения нормальной работы подшипников скольжения при высоких температурах [5].

При работе пористых подшипников следует учитывать также различия в теплопроводности, прирабатываемости и других свойствах пористых

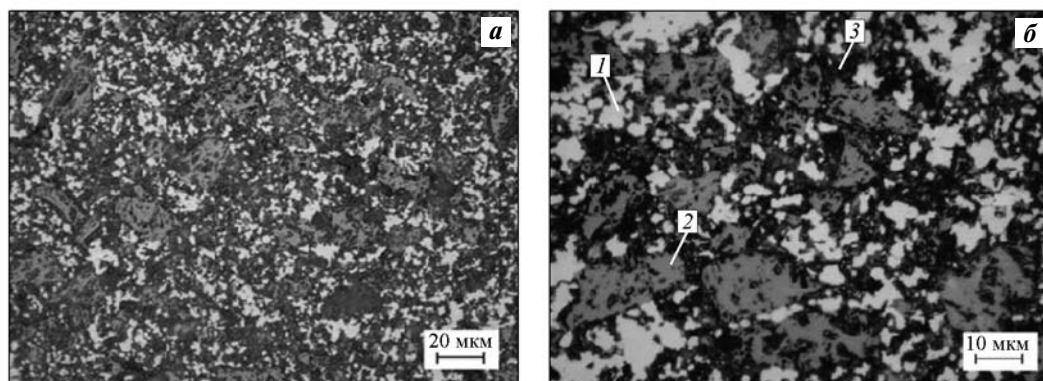


Рис. 2. Микроструктура материала 90% MoSi_2 –10 % MoS_2 при разных увеличениях

1 – основа MoSi_2 (светлая фаза); 2 – твердая смазка MoS_2 (фаза серого цвета); 3 – поры (темная составляющая)

Fig. 2. 90% MoSi_2 –10 % MoS_2 material microstructure at different magnifications

1 – MoSi_2 base (light phase); 2 – MoS_2 solid lubricant (grey phase); 3 – pores (dark component)

Таблица 1. Коэффициент трения покоя для разных пар трения в зависимости от усилия сжатия и материала контртела (среднее из 5 измерений)

Table 1. Static friction coefficient for different friction pairs depending on compression force and counterbody material (average of 5 measurements)

Характеристики подвижной пластины (контртело)		Коэффициент трения покоя при удельных давлениях сжатия	
Материал	Твердость по Виккерсу, МПа	0,5 МПа	1,0 МПа
Сталь 12X18H10T	1736	0,297	0,297
Сталь У8	2022	0,292	0,289
Молибден ТСМ-7	2322	0,279	0,257

Таблица 2. Прочность КАМ при сжатии и поперечном изгибе при различных температурах

Table 2. Compression strength and cross bending strength of antifriction composite material at different temperatures

Прочность КАМ, МПа					
при сжатии (среднее из 5 испытаний)			при поперечном изгибе (среднее из 4 испытаний)		
20 °С	500 °С	1000 °С	20 °С	150 °С	300 °С
1388	1264	739	145	136	126

и литых материалов. Отвод тепла имеет важное значение, особенно при больших скоростях вращения вала. Теплопроводность у пористых материалов меньше, чем у литых, что приводит к снижению для них предельных нагрузок при больших скоростях [2].

В результате проведенных исследований в диапазоне температур 25—400 °С для КАМ установлено, что значения удельной теплоемкости (C) и коэффициента теплопроводности (λ) изменяются по линейным законам ($C = 0,451t + 415,74$, $\lambda = 0,0029t + 2,27$, где t — температура, °С) от 427 до 596 Дж/(кг·К) и от 2,35 до 3,41 Вт/(м·К) соответственно.

Разработанный композиционный антифрикционный материал 90%MoSi₂—10%MoS₂ был использован в качестве материала подшипников скольжения в составе устройства, обеспечивающего возвратно-поступательное движение изделия в направляющей трубе из молибденового сплава ТСМ-7 при температуре 1270 °С в среде инертного газа. Подшипники скольжения в составе макетов успешно прошли ресурсные и реакторные испытания.

Заключение

В результате проведенных исследований разработан высокотемпературный композиционный антифрикционный самосмазывающийся материал 90%MoSi₂—10%MoS₂. Он работоспособен при температурах до 1500 °С в среде инертных газов в условиях нейтронного облучения.

Показано, что данный материал имеет однородную двухфазную структуру с равномерно распределенной пористостью. Его триботехнические свойства удовлетворяют требованиям к антифрикционным материалам ($\mu \leq 0,3$).

Установлена зависимость коэффициента трения от усилия сжатия в паре трения и от твердости материала контртела в паре трения. Чем выше усилие сжатия и тверже материал в паре трения, тем меньше коэффициент трения.

Прочность материала при нагреве снижается: от 1388 до 739 МПа при нагреве от 20 до 1000 °С при сжатии и от 145 до 126 МПа при нагреве от 20 до 300 °С при поперечном изгибе.

В интервале температур 25—400 °С значения удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности материала увеличиваются по линейным законам ($C = 0,451t + 415,74$, $\lambda = 0,0029t + 2,27$, где t — температура, °С) от 427 до 596 Дж/(кг·К) и от 2,35 до 3,41 Вт/(м·К) соответственно.

Разработанный материал использован в качестве подшипников скольжения в составе устройства, работающего при $t = 1270$ °С в среде инертного газа. В составе макетов и опытных образцов подшипники скольжения успешно прошли ресурсные и реакторные испытания.

По результатам работы получены патенты на высокотемпературный антифрикционный материал [21] и способ его изготовления [22].

Литература/References

1. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наук. думка, 1980.
Fedorchenko I.M., Pugina L.I. Composite sintering anti-friction materials. Kiev: Naukova Dumka, 1980 (In Russ.).
2. Либенсон Г.А. Производство порошковых изделий. М.: Металлургия, 1990.
Libenson G.A. Manufacturing powder parts. Moscow: Metallurgiya, 1990 (In Russ.).
3. Майорова Л.А. Твердые неорганические вещества в качестве высокотемпературных смазок. М.: Наука, 1971.
Maierova L.A. Solid inorganic materials as a high-temperature lubricants. Moscow: Nauka, 1971 (In Russ.).
4. Брейтуэйт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. Пер. с англ. под ред. В.В. Синицина. М.: Химия, 1967.
Braithwaite E.R. Solid lubricants materials and antifriction surfaces. Ed. V.V. Sinitsin (transl. engl.). Moscow: Khimiya, 1967 (In Russ.).

5. Вайнштейн В.Э., Трояновская Г.И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. М.: Машиностроение, 1968.
Vainshtein V.E., Troyanovskaya G.I. Dry lubricants and self-lubricating materials. Moscow: Mashinostroenie, 1968 (In Russ.).
6. Манг Т., Дрезель У. Смазки. Производство, применение, свойства: Справочник. Пер. с англ. под ред. В.М. Школьников. СПб.: Профессия, 2010.
Mang T., Dresel W. Lubricants. Manufacturing, use, properties: Hand book. Ed. V.M. Shkol'nikov (transl. engl.). Saint-Petersburg: Professiya, 2010 (In Russ.).
7. Витязь П.А., Жорник В.И., Ковалева С.А., Кукаренко В.А. Изменение структуры и свойств спеченных сплавов под влиянием наноразмерных углеродных добавок. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2014. No. 4. С. 12—18.
Vityaz P.A., Zhornik V.I., Kovalyova S.A., Kukarenko V.A. Change of structure and properties of sintered alloys under the influence nanosized carbon additives. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2014. No. 4 P. 12—18 (In Russ.).
8. Пугина Л.И., Синявская М.Д., Максимчук И.М. Дисульфид молибдена. Киев: Наук. думка, 1968.
Pugina L.I., Sinyavskaya M.D., Maksimchuk I.M. Molybdenum disulphur. Kiev: Naukova Dumka, 1968 (In Russ.).
9. Сентюрихина Л.Н., Опарина Е.М. Твердые дисульфид-молибденовые смазки. М.: Химия, 1966.
Sentyurikhina L.N., Oparina E.M. Solid molybdenum disulphur lubricants. Moscow: Khimiya, 1966 (In Russ.).
10. Бондаренко В.П. Триботехнические композиты с высокомолекулярными наполнителями. Киев: Наук. думка, 1987.
Bondarenko V.P. Tribotechnical compositions with high-modules additives. Kiev: Naukova Dumka, 1987 (In Russ.).
11. Watanabe S., Miyake S., Murakawa M. Friction behavior of amorphous —BN-cubic-BN dual-layered film. *Surf. Coat. Technol.* 1995. Vol. 76—77. Pt. 2. P. 600—603.
12. Carrapichano J.M., Gomes J.R., Silva R.F. Terminological behavior of Si₃N₄-BN ceramic materials for dry sliding applications. *Wear*. 2002. Vol. 253. P. 1070—1076.
13. Gutierrez-Mora F., Erdemir A., Goretta K.C., Dominguez-Rodriguez A., Routbort J.L. Dry and oil-lubricated sliding wear of Si₃N₄ and Si₃N₄/BN fibrous monoliths. *J. Tribol. Lett.* 2005. Vol. 18. No. 2. P. 231—237.
14. Julthongpipit D., Ahn H.S., Siolorenko A., Doo-In Kim, Tsukruk V.V. Towards self-lubricated nanocoatings. *Tribol. Int.* 2001. Vol. 35. P. 829—836.
15. Jianxin D., Tonykun C. Self-lubricant mechanisms Via the in situ formed tribofilm of sintered ceramics with CaF₂ additions when sliding against hardened steel. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2007. Vol. 25. Iss. 2. P. 189—197.
16. Roik T.A., Kholyavko V.V., Vitsuk Yu.Yu., Melnyk O.O. Influence of mechanism tribosynthesis structures for properties of antifriction composites materials based on nickel. *Metallphys. Newest Techn.* 2009. Vol. 31. P. 1001—1016.
17. Астапов А.Н., Терентьева В.С. Обзор отечественных разработок в области защиты углеродсодержащих материалов от газовой коррозии и эрозии в скоростных потоках плазмы. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2014. No. 4. С. 50—70.
Astapov A.N., Terentieva V.S. Review of home-grown technologies in the field of protection of carbon-bearing materials from gaseous corrosion and erosion in plasma's high-speed flow. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2014. No. 4. P. 50—70 (In Russ.).
18. Самсонов Г.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М. Силициды. М.: Металлургия, 1979.
Samsonov G.V., Dvorina L.A., Rud' B.M. Silicides. Moscow: Metallurgiya, 1979 (In Russ.).
19. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: Справочник. Под ред. Т.Я. Косолаповой. М.: Металлургия, 1986.
Properties, reception and application of refractory compounds: Hand book. Ed. T.Ya. Kosolapova. Moscow: Metallurgiya, 1986 (In Russ.).
20. Knittel S., Mathieu S., Vilasi M. The oxidation behavior of uniaxial hot pressed MoSi₂ in air from 400 to 1400 °C. *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. Iss. 8. P. 1207—1215.
21. Сморочков Г.Ю., Рачковский А.И., Кондрохин Д.Н. Высокотемпературный антифрикционный материал: Пат. 2535419 (РФ). 2013.
Smorchkov G.Yu., Rachkovskij A.I., Kondrokhin D.N. High-temperature antifriction material: Pat. 2535419 (RF). 2013 (In Russ.).
22. Сморочков Г.Ю., Рачковский А.И., Кондрохин Д.Н. Способ изготовления высокотемпературного антифрикционного материала: Пат. 2542039 (РФ). 2013.
Smorchkov G.Yu., Rachkovskij A.I., Kondrokhin D.N. A method of manufacture an high-temperature antifriction material: Pat. 2542039 (RF). 2013 (In Russ.).