

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 621.762
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-103-110>

Поступило в редакцию 06.07.2020
Received 06.07.2020

**Член-корреспондент А. Ф. Ильющенко, Т. Л. Талако, А. В. Лешок,
А. И. Лецко, Т. И. Пинчук**

Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь

**Триботехнические свойства спеченного фрикционного
материала на основе меди с добавкой ультрадисперсного
порошка алюминиды системы Ti–46Al–8Cr**

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния добавок ультрадисперсного порошка системы Ti–46Al–8Cr, полученного МАСВС, на триботехнические свойства фрикционного материала на основе бронзы БрО6. Показано, что в интервале концентраций добавки порошка 0,5–1,5 мас. % отмечается рост динамического коэффициента трения с 0,04 до 0,055, в интервале 1,5–2,5 мас. % – до 0,055–0,058. Введение 0,5–1,0 мас. % порошка Ti–46Al–8Cr способствует снижению интенсивности изнашивания фрикционного материала с 4,0 до 3,7 мкм/км. Увеличение добавки до 2,5 % приводит к росту интенсивности изнашивания материала до 6 мкм/км.

Ключевые слова: фрикционный материал, интерметаллид, алюминид титана, коэффициент трения, износ

Для цитирования. Триботехнические свойства спеченного фрикционного материала на основе меди с добавкой ультрадисперсного порошка алюминиды системы Ti–46Al–8Cr / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 1. – С. 103–110. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-103-110>

**Corresponding Member Aliaxander Ph. Ilyushchanka, Tatyana L. Talako, Andrey V. Leshok,
Andrey I. Letsko, Tatyana I. Pinchuk**

O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus

**TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF A SINTERED FRICTION MATERIAL BASED ON COPPER
WITH THE ADDITIVES OF THE ULTRAFINE POWDER OF ALUMINIDE OF THE Ti–46Al–8Cr SYSTEM**

Abstract. The article presents the results of study of the effect of additives of an ultrafine powder of the Ti–46Al–8Cr system obtained by MASHS on the tribotechnical properties of a friction material based on BrO6 bronze. It is shown that in the range of powder additive concentrations 0.5–1.5 wt. %, the dynamic coefficient of friction increases from 0.04 to 0.055, in the range of 1.5–2.5 % – to 0.055–0.058. The introduction of the 0.5–1.0 % Ti–46Al–8Cr powder permitted to reduce the wear rate of the friction material from 4.0 to 3.7 $\mu\text{m}/\text{km}$. An increase in the additive to 2.5 % led to an increase in the material wear rate up to 6 $\mu\text{m}/\text{km}$.

Keywords: friction material, intermetallide, titanium aluminide, coefficient of friction, wear

For citation: Ilyushchanka A. Ph., Talako T. L., Leshok A. V., Letsko A. I., Pinchuk T. I. Tribotechnical properties of sintered friction material based on copper with the additives of the ultrafine powder of aluminide of Ti–46Al–8Cr system. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 1, pp. 103–110 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-103-110>

Введение. К одному из наиболее перспективных направлений порошковой металлургии относятся технологии производства спеченных порошковых фрикционных материалов – далее фрикционных материалов, предназначенных для передачи крутящего момента. Фрикционные материалы широко используются в передающих и тормозных узлах и механизмах автотракторной техники, техники специального назначения, станках, машинах и механизмах [1–3]. Особое место среди таких материалов занимает группа материалов на основе меди, которые предназна-

ченны для работы в условиях граничного и смешанного трения. Такие материалы, как правило, используются в гидромеханических коробках передач, маслоохлаждаемых тормозах и муфтах. К ним предъявляются требования обеспечения заданного значения динамического и статического коэффициентов трения, высокой износостойкости, эффективной приработки и высокой теплопроводности [4–6]. Повышение заданных свойств возможно за счет введения добавок интерметаллидов в базовый состав фрикционного материала, содержание которых составляет 0,5–15,0 об. % [7]. Различия в составах порошков интерметаллидов, способ их получения оказывают существенное влияние на химический, гранулометрический и фазовый составы, что в конечном счете определяет степень их влияния на свойства фрикционного материала.

Добавка интерметаллидов на основе алюминия способствует повышению физико-механических и триботехнических свойств разрабатываемых материалов [8–10]. Влияние добавки интерметаллического порошка Ti–46Al–8Cr, получаемого методом механоактивируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (МАСВС)¹, на триботехнические свойства антифрикционного материала на основе меди исследовано в [11]. Установлено, что увеличение содержания алюминидов с 0,5 до 1,0 % приводит к снижению интенсивности изнашивания материала более чем в 3 раза.

Анализ литературных источников свидетельствует об отсутствии информации по использованию добавок интерметаллидов для модифицирования спеченных порошковых фрикционных материалов.

Цель работы – исследование влияния содержания добавки ультрадисперсного порошка интерметаллидов системы Ti–46Al–8Cr на триботехнические свойства спеченного фрикционного материала на основе меди, предназначенного для работы в узлах трения со смазкой.

Материалы и методы исследования. В качестве основы фрикционного материала использовали смесь порошков меди с 6 % олова и 30 об. % графита элементного ГЭ-1. Исходную шихту получали смешиванием порошков меди марки ПМС-1 со средним размером частиц 100 мкм, олова марки ПО-1 со средним размером частиц 20 мкм, графита элементного марки ГЭ-1 (ГОСТ 7478–75), имеющего чешуйчатую форму, со средним размером чешуек 100 мкм в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 45 мин. Для формования фрикционных материалов использовали 5 видов шихты на основе меди с добавками порошка интерметаллида системы Ti–46Al–8Cr в количестве 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 мас. % соответственно.

Порошок системы Ti–46Al–8Cr получали методом МАСВС [12]. Предварительную механическую обработку реакционной смеси порошков титана марки ПТОМ (ТУ14-1-3086–80), алюминия марки АСД-1 (ТУ 45-21-131–81) и хрома марки ПХС-1 (ТУ 14-274–75) проводили в атриторе А-4,5 при следующих параметрах: скорость вращения вала импеллера 360 мин⁻¹, соотношение массы шаров и порошка 10 : 1, продолжительность обработки 3 ч. Последующий самораспространяющийся высокотемпературный синтез осуществляли в экспериментальном СВС-реакторе в среде аргона, смесь порошков поджигали вольфрамовой спиралью, нагреваемой пропусканием электрического тока. После остывания полученный спек подвергали размолу в планетарной мельнице Pulverisette 6 (Fritsch, Германия) в среде спирта при следующих параметрах: диаметр шаров 5 мм, соотношение массы шаров и порошка 20 : 1, скорость вращения ведущего вала импеллера 400 мин⁻¹, время размолу 30 мин.

Синтезированный материал Ti–46Al–8Cr, согласно рентгеноструктурному анализу, состоит из основы в виде интерметаллида γ -TiAl (пространственная группа P4/mmm) (рис. 1, а, фаза 1), легированного хромом, содержащего 64–68 ат. % Ti, 30–34 ат. % Al и до 5 ат. % Cr, включений двойных интерметаллидов Ti_3Al и $AlCr_2$ и тройного интерметаллида $Al_{0,67}Cr_{0,08}Ti_{0,25}$ (рис. 1 а, b). Тонкие вторичные выделения τ -фазы $Al_{0,67}Cr_{0,08}Ti_{0,25}$ размером менее 0,5 мкм (рис. 1, с, фаза 3), выпадающие в зернах моноалюминидов титана, содержат порядка 68–71 ат. % Al, 20–25 ат. % Ti, 7–12 ат. % Cr и имеют кубическую решетку типа Pm-3m, обеспечивающую когерентность границ с γ -фазой.

¹ Способ получения порошкового материала на основе алюминидов титана: патент 10752 Респ. Беларусь, МПК (2006) В 22 F 9/16, С22С 21/00 / Т. Л. Талако, А. И. Лецко, А. В. Беляев, А. Ф. Ильющенко, Т. В. Гасак / заяв. ГНУ ИПМ. – № а 20060062; заявл. 24.01.2006; опубл. 30.10.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 81.

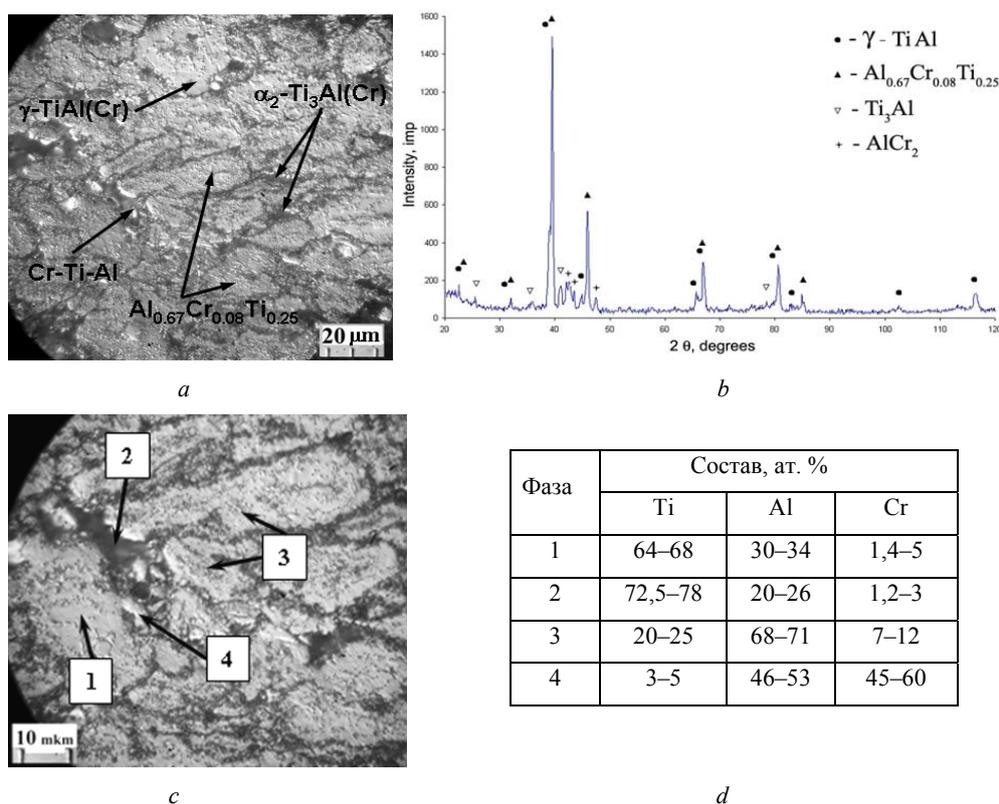


Рис. 1. Микроструктура и фазовый состав синтезированного СВС порошка системы Ti–46Al–8Cr до размола: *a, c* – структура; *b* – рентгенограмма; *d* – элементный состав по точкам

Fig. 1. Microstructure and the phase composition of a sintered CBC powder of the Ti–46Al–8Cr system before grinding: *a, c* – structure; *b* – X-ray picture; *d* – elemental composition by points

Фаза α_2 -Ti₃Al (пространственная группа R63/mmc) локализуется, главным образом, по границам зерен и содержит порядка 2 ат. % Cr (рис. 1, *c*, фаза 2). Кроме того, у границ зерен моноалюминид титана располагаются также включения избыточных фаз соединений хрома с алюминием и титаном, содержащих 46–53 ат. % Al, 45–60 ат. % Cr и 3–5 ат. % Ti (рис. 1, *c*, фаза 4), формирование которых, вероятно, обусловлено проблемами диффузионного перераспределения компонентов в процессе СВС в условиях преимущественно твердофазного взаимодействия.

Размер частиц порошка Ti–46Al–8Cr составляет 50–500 нм, которые формируют агломераты размером 5–20 мкм с высокой удельной поверхностью (рис. 2). Микротвердость частиц порошка составляет 4000–5140 МПа.

Образцы фрикционных дисков для испытаний изготавливали следующим образом: полученную шихту из исходных порошков наносили методом свободной насыпки на поверхность стальной основы с помощью специальной технологической оснастки, затем проводили предварительное спекание в среде диссоциированного аммиака при температуре 840 °C в течение 50 мин. Спеченную заготовку фрикционного диска подвергали пластической деформации (чеканке) пуан-

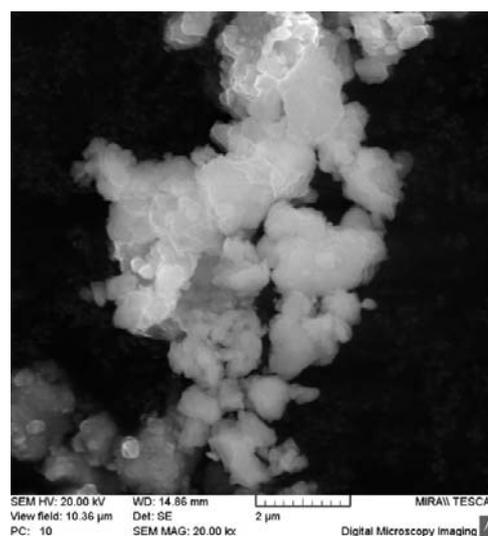


Рис. 2. Морфология поверхности частицы порошка Ti–46Al–8Cr после размола (×20000)

Fig. 2. Morphology of the surface of the particle of the Ti–46Al–8Cr powder after grinding (×20000)

соном, имеющим на поверхности профиль в виде «сетки», для формования на поверхности спеченного материала системы маслоотводящих каналов и пазов, а также получения пористости 12–18 %. Затем осуществлялось окончательное спекание под давлением 0,1 МПа в среде диссоциированного аммиака, который содержит, %: N_2 – 75, N_2 – 25 при температуре 840 °С в течение 3 ч.

Исследование триботехнических свойств фрикционного материала осуществлялось на машине трения типа ИМ-58 по схеме «фрикционный диск–контртело» при следующих режимах: начальная скорость торможения – 10 м/с; удельная нагрузка – 4,0 МПа; момент инерции маховых масс – 0,56 Н·м·с²; работа трения 27,5 кДж. В качестве контртела использовали диск из стали 65Г твердостью 260–320 НВ и шероховатостью рабочей поверхности Ra 0,7–0,8.

Исследование структуры осуществлялось с помощью оптического микроскопа MEF-3 (Австрия). Морфологию поверхности трения фрикционного диска и его микроструктуру исследовали на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения MIRA (Чехия) с микро-рентгеноспектральной приставкой «INCA 350» фирмы Oxford Instruments (Великобритания). Фазовый состав исследовали на рентгеновском дифрактометре Ultima IV (Rigaku) в CuK_{α} -излучении при напряжении на рентгеновской трубке 40 кВ, анодном токе 40 мА. Параметры кристаллической решетки сплавов определялись по дифракционным линиям, расположенным на больших углах рассеяния. Для фазового анализа использовалась стандартная картотека PDF.

Результаты и их обсуждение. Триботехнические испытания фрикционного материала с добавками порошка системы Ti–46Al–8Cr (далее – интерметаллид) от 0,5–2,5 % показали рост значения динамического коэффициента трения (далее – коэффициент трения) (рис. 3, *a*) с увеличением содержания интерметаллида. Наиболее существенный рост значений коэффициента трения отмечается при увеличении содержания интерметаллида от 0,5 до 1,5 %. Дальнейшее увеличение содержания добавки интерметаллида с 1,7 до 2,5 % показало весьма незначительное влияние на величину коэффициента трения фрикционного материала.

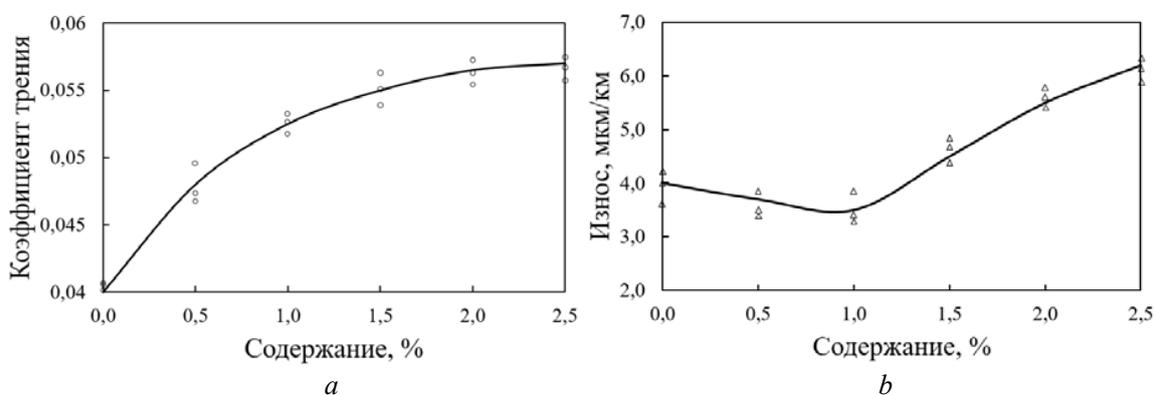


Рис. 3. Влияние содержания добавки порошка системы Ti–46Al–8Cr в составе спеченного фрикционного материала на основе меди на значения коэффициента трения (*a*) и износа (*b*)

Fig. 3. Influence of the additive of the Ti–46Al–8Cr power as part of the copper-based friction material on the values of the coefficient of friction (*a*) and wear (*b*)

Несколько иной характер оказывает добавка интерметаллида на величину износа фрикционного материала. Так, при содержании от 0,5 до 1,0 % добавки порошка Ti–46Al–8Cr износ материала снижается с 4,0 до 3,6 мкм/км (рис. 3, *b*). Дальнейшее увеличение добавки интерметаллида с 1,0 до 2,5 % привело к линейному росту износа до 6,0 мкм/км.

Как будет показано далее, изменения коэффициента трения и износа обусловлены совокупным действием как самого интерметаллида, так и изменением структуры поверхности трения, занимающей значительно большую площадь контакта.

После спекания структура базового состава спеченного фрикционного материала без добавки интерметаллида представляет собой однородный α -твердый раствор олова в меди микротвердостью 400–550 МПа. Средний размер зерна твердого раствора составляет 10–15 мкм, фиксиру-

ется наличие единичных зерен размером до 100 мкм. В структуре фрикционного материала отмечается равномерное распределение пор размером 5–15 мкм преимущественно сферической формы и деформированных частиц графита вытянутой формы длиной до 120 мкм, шириной до 50 мкм (рис. 4).

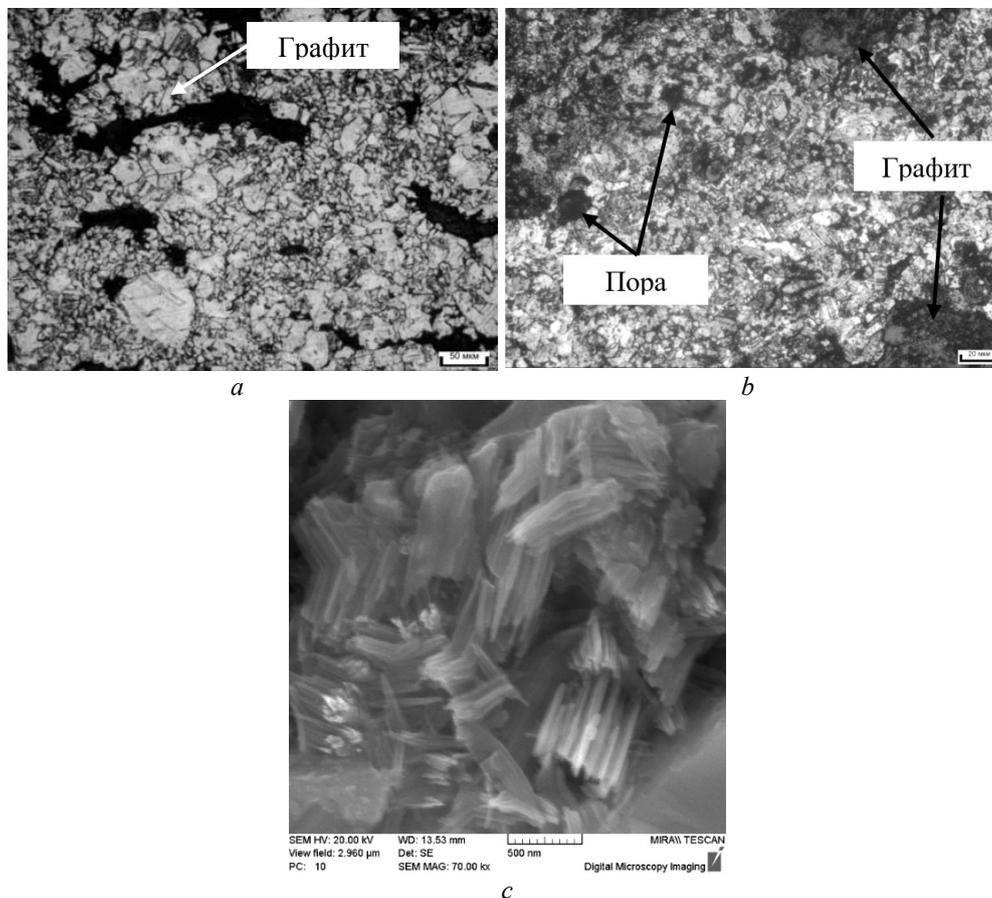


Рис. 4. Микроструктура спеченного фрикционного материала на основе меди и морфология частицы Ti–46Al–8Cr: *a* – без добавки; *b* – с добавкой 1,5 % порошка Ti–46Al–8Cr; *c* – частица включения Ti–46Al–8Cr

Fig. 4. Microstructure of the copper-based sintered friction material and the morphology of the Ti–46Al–8Cr particle: *a* – no additives; *b* – with the additive of 1.5 % of the Ti–46Al–8Cr powder; *c* – the particle with the additive of Ti–46Al–8Cr

При введении добавки порошка Ti–46Al–8Cr происходит измельчение зерна α -твердого раствора олова в меди. Так, при введении 1,5 мас. % добавки порошка интерметаллида средний размер зерна α -твердого раствора олова в меди уменьшается до 5 мкм. Это может быть обусловлено тем, что равномерно распределенные включения добавки порошка интерметаллида служат преградой для движения дислокаций, препятствуя собирательной рекристаллизации. Как отмечается в [13; 14], блокирование роста зерна за счет собирательной рекристаллизации при введении в материал добавок ультрадисперсных порошков является известным приемом, позволяющим повысить механические свойства композиционных материалов.

Результаты сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения показали, что после спекания фрикционного материала на поверхности порошка системы Ti–46Al–8Cr отмечаются структурные изменения, которые проявляются в формировании игольчатой структуры (рис. 3, *c*). Так, после спекания в среде диссоциированного аммиака при температуре 840 °C в течение 180 мин формируются блоки трапециевидной формы размером 100–500 нм, с размером игл до 50 нм. Формирование схожей игольчатой структуры наблюдали авторы работы [14], когда при термической обработке в среде азота на поверхности порошка алюминид титана формировался нитрид титана с твердостью 5,4 ГПа.

Рентгенофазовый анализ спеченного фрикционного материала на основе меди, легированной оловом с добавкой порошка системы Ti–46Al–8Cr, показал, что основные дифракционные пики соответствуют характерным пикам α -твердого раствора олова в меди, а также графита. Оставшиеся линии небольшой интенсивности могут принадлежать соединениям $Cu_{31}Sn_8$ и γ -TiAl. Присутствие соединения $Cu_{31}Sn_8$ может быть обусловлено тем, что имеются участки с повышенным содержанием олова, вследствие недостаточного времени для прохождения диффузии.

Учитывая невысокое содержание добавки порошка системы Ti–46Al–8Cr в спеченном фрикционном материале (ниже предела чувствительности традиционного рентгенофазового анализа), заключение о структурных изменениях затруднено. Идентификация изменений требует привлечения методов исследований высокого разрешения. Однако можно сделать предположение, что при спекании материала в присутствии азота на поверхности интерметаллида могут формироваться твердые соединения нитрида, карбонитрида титана, а также новые фазы на основе алюминия и хрома.

Использование в составе фрикционного материала добавки порошка системы Ti–46Al–8Cr приводит к снижению износа и шероховатости контртела. Так, после 1500 циклов испытаний при добавке в базовый состав 1 % интерметаллида шероховатость контртела (Ra) снизилась с 2,9 до 1,3 мкм (рис. 5). Наряду со снижением шероховатости фиксируется снижение глубины микровпадин с 1,0 до 0,4 мкм. Аналогичный эффект отмечается в [15; 16], где показано, что использование наноразмерного порошка алмазов, снижая шероховатость контртела, повышает износостойкость пары трения.

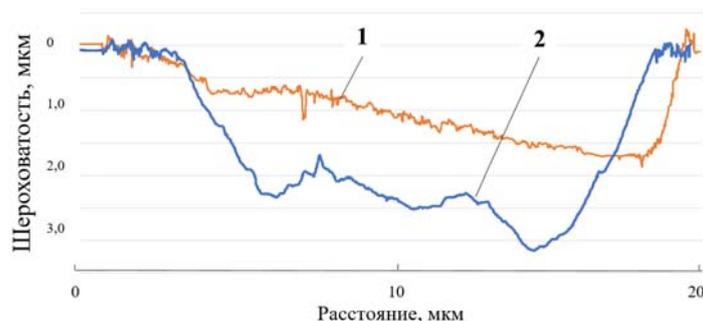


Рис. 5. Шероховатость поверхности контртела после 1500 циклов испытаний: 1 – фрикционный материал с добавкой 1,0 % порошка системы Ti–46Al–8Cr; 2 – базовый фрикционный материал

Fig. 5. Surface roughness of the control body after 1500 test cycles: 1 – friction material with an additive of 1.0 % of the Ti–46Al–8Cr powder; 2 – base friction material

Выводы

1. Исследования коэффициента трения и износа фрикционного материала на основе меди, легированного 6 % олова с добавкой порошка системы Ti–46Al–8Cr, показали, что в интервале концентраций 0,5–1,5 % добавки интерметаллида отмечается рост значения динамического коэффициента трения с 0,047 до 0,055. Дальнейшее увеличение содержания порошка интерметаллида до 2,5 % не приводит к существенному изменению коэффициента трения, которое составляет 0,055–0,058. Исследование влияния добавки порошка Ti–46Al–8Cr на износостойкость фрикционного материала показало, что при концентрации до 1,0 % отмечается незначительное снижение износа с 4,0 до 3,7 мкм/км. При дальнейшем росте содержания добавки до 2,5 % износ линейно увеличивается до 6 мкм/км. Введение добавки порошка системы Ti–46Al–8Cr в базовый состав спеченного фрикционного материала на основе меди позволило снизить износ контртела в два раза.

2. При использовании 1,5 %-ной добавки порошка Ti–46Al–8Cr в составе фрикционного материала отмечается снижение размера зерна α -твердого раствора олова в меди. Для базового материала размер зерна составляет 40 мкм, тогда как при использовании 1,5 %-ной добавки порош-

ка Ti–46Al–8Cr размер зерна α -твердого раствора олова в меди снижается в среднем до 5 мкм, подтверждая тем самым вывод, что добавка препятствует процессу собирательной рекристаллизации.

3. Результаты сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения показали, что после спекания фрикционного материала на основе меди, на поверхности зерен порошка системы Ti–46Al–8Cr отмечаются структурные изменения, которые проявляются в формировании блочной игольчатой структуры с размером блоков 100–500 нм и размером игл до 50 нм.

Список использованных источников

1. Влияние состава фрикционного материала на основе меди на его структуру и триботехнические свойства / А. В. Лешок [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 6. – С. 654–660.
2. Федорченко, И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. – Киев, 1980. – 404 с.
3. Ильющенко, А. Ф. Современные разработки в области порошковой металлургии для машиностроения / А. Ф. Ильющенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – Т. 20–21, № 3–4. – С. 113–120.
4. Федорченко, И. М. Современные фрикционные материалы / И. М. Федорченко, В. М. Крячек, И. И. Панаиоти. – Киев, 1975. – 334 с.
5. Ильющенко, А. Ф. Спеченные металлокерамические фрикционные композиционные материалы и изделия / А. Ф. Ильющенко, А. А. Дмитриевич, А. В. Лешок // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 2. – С. 10–17.
6. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов. – М., 1980. – 496 с.
7. Шуркин, П. К. Влияние эвтектикообразующих элементов (Ca, Ni, Ce, Fe) на структуру, технологичность и механические свойства алюминиевых сплавов, содержащих цинк и магний / П. К. Шуркин. – М., 2020.
8. Скаков, Ю. А. Интерметаллиды / Ю. А. Скаков // Химическая энциклопедия: в 5 т / И. Л. Кнунянц (гл. ред.). – М., 1990. – Т. 2: Даффа–Меди. – 671 с.
9. Применение микроструктурированных интерметаллидов в турбостроении. Часть I: Современное состояние и перспективы / А. В. Картавых [и др.] // Материаловедение. – 2012. – № 5. – С. 3–11.
10. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением / Ю. Р. Колобова [и др.]. – М., 2008. – 328 с.
11. Триботехнические свойства спеченной бронзы, упрочненной алюминидом системы Ti–46Al–8Cr / Л. Н. Дьячкова [и др.] // Трение и износ. – 2017. – Т. 38, № 2. – С. 80–85.
12. Талако, Т. Л. Порошки, получаемые методом механоактивируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, для жаростойких, износостойких и радиопоглощающих газотермических покрытий / Т. Л. Талако. – Минск, 2015. – 398 с.
13. Структура и механические свойства высокооловянистой бронзы, легированной титаном и германием / В. М. Ажажа [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – Т. 15, № 1: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – С. 60–66.
14. Использование алюминидов титана для создания электроискровых покрытий / С. А. Пячин [и др.] // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 1. – С. 55–61. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-55-61>
15. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2011. – 527 с.
16. Витязь, П. А. Синтез и применение сверхтвердых материалов / П. А. Витязь, В. Д. Грицук, В. Т. Сенюць. – Минск, 2005. – 359 с.

References

1. Leshok A. V., Dyachkova L. N., Ilyushchenko A. F., Rogovoy A. N., Alekseenko N. A. Influence of copper frictional material composition on structure and tribotechnical properties. *Journal of Friction and Wear*, 2019, vol. 40, no. 6, pp. 495–500. <https://doi.org/10.3103/s1068366619060151>
2. Fedorchenko I. M., Pugina L. I. *Composite sintered antifriction materials*. Kiev, 1980. 404 p. (in Russian).
3. Pyuschenko A. F. Current developments in powder metallurgy for mechanical engineering. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2012, vol. 20–21, no. 3–4, pp. 113–120 (in Russian).
4. Fedorchenko I. M., Kryachek V. M., Panaioti I. I. *Modern friction materials*. Kiev, 1975. 334 p. (in Russian).
5. Pyuschenko A. F., Dmitrovich A. A., Leshok A. V. Sintered metal-ceramic friction composite materials and products. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2011, no. 2, pp. 10–17 (in Russian).
6. Kiparisov S. S. *Powder metallurgy*. Moscow, 1980. 496 p. (in Russian).
7. Shurkin P. K. *Influence of eutectic-forming elements (Ca, Ni, Ce, Fe) on the structure, manufacturability and mechanical properties of aluminum alloys containing zinc and magnesium*. Moscow, 2020.

8. Skakov Yu. A. Intermetallic compounds. Knunyants I. L. (ed.). *Chemical encyclopedia. Vol. 2: Duffa-Medi*. Moscow, 1990. 671 p. (in Russian).
9. Kartavykh A. V., Kaloshkin S. D., Cherdyn'tsev V. V., Gorshenkov M. V., Sviridova T. A., Borisova Yu. V., Senatov F. S., Maksimkin A. V. Use of microstructured intermetallides in turbine manufacture. Part I. Current state and prospects. *Materialovedenie [Materials Science]*, 2012, no. 5, pp. 3–11 (in Russian).
10. Kolobov Yu. R., Kablov E. N., Kozlov E. V., Koneva N. A., Povarova K. B., Grabovetskaya G. P., Buntushkin V. P., Bazyleva O. A., Muboyadzhyan S. A., Budinovskii S. A. *Structure and properties of intermetallic materials with nanophase hardening*. Moscow, 2008. 328 p. (in Russian).
11. Dyachkova L. N., Letsko A. I., Fel'dshtein E. E., Kelek P., Kelek T. Tribotechnical properties of sintered bronze strengthened by aluminate of Ti-46Al-8Cr. *Journal of Friction and Wear*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 98–103. <https://doi.org/10.3103/s1068366617020088>
12. Talako T. L. *Powders obtained by mechanically activated self-propagating high-temperature synthesis for heat-resistant, wear-resistant and radio-absorbing gas-thermal coatings*. Minsk, 2015. 398 p. (in Russian).
13. Azhazha V. M., Sverdlov V. Ya., Tikhonovsky M. A., Kondratov A. A., Vinogradov D. V., Ruducheva T. Yu., Pikalov A. I. Structure and mechanical properties of the high-tin bronze alloyed by titanium and germanium. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki = Problems of Atomic Science and Technology*, 2006, vol. 15, no. 1 (Vacuum, pure materials, superconductors), pp. 60–66 (in Russian).
14. Pyachin S. A., Ershova T. B., Burkov A. A., Vlasova N. M., Komarova V. S. The use of titanium aluminides for the development of electrospark coatings. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2015, no. 1, pp. 55–61 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-55-61>
15. Vityaz P. A., Zhornik V. I., Kukareko V. A., Komarov A. I., Senyut V. T. *Modification of materials and coatings with nano-sized diamond-containing additives*. Minsk, 2011. 527 p. (in Russian).
16. Vityaz P. A., Gritsuk V. D., Senyut V. T. *Synthesis and application of superhard materials*. Minsk, 2005. 359 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, директор. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mail.belpak.by.

Талако Татьяна Леонидовна – д-р техн. наук, доцент, заместитель академика-секретаря. Национальная академия наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: talako@presidium.bas-net.by.

Лешок Андрей Валерьевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sdilav@tut.by.

Лецко Андрей Иванович – канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: letsko@tut.by.

Пинчук Татьяна Иосифовна – науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: iscentr@tut.by.

Information about the authors

Ilyushchanka Aliaxander Ph. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Director. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mail.belpak.by.

Talako Tatyana L. – D. Sc. (Engineering), Associate professor, Deputy Academician-Secretary. National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: talako@presidium.bas-net.by.

Leshok Andrey V. – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sdilav@tut.by

Letsko Andrey I. – Ph. D. (Engineering), Associate professor, Head of the Laboratory. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: letsko@tut.by.

Pinchuk Tatyana I. – Researcher. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: iscentr@tut.by.