

УДК 669.018.95

Т.А. Болсуновская¹, И.Ю. Ефимочкин¹, Н.В. Севостьянов¹, Н.П. Бурковская¹**ВЛИЯНИЕ МАРКИ ГРАФИТА В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДОЙ СМАЗКИ
НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-69-77

Рассмотрено влияние различных марок графита на триботехнические свойства в составе металлического композиционного материала на основе меди.

В качестве твердой смазки использовались графиты с разным размером зерна: спеченные синтетический, крупнокристаллический и мелкокристаллический, а также высокодисперсный коллоидный.

При триботехнических испытаниях по схеме трения «палец–диск» установили влияние различных скоростей скольжения и контактной нагрузки на коэффициент трения и износ в зависимости от марки графита, содержащегося в составе композиционного материала.

Показано, что испытанные марки графита обладают различными триботехническими свойствами, связанными с методом получения, дисперсностью и величиной зернистости.

Ключевые слова: графит, зернистость, крупнокристаллический, мелкокристаллический, синтетический, антифрикционный, трение, износ, коэффициент трения.

Т.А. Bolsunovskaya¹, I.Yu. Efimochkin¹, N.V. Sevostyanov¹, N.P. Burkovskaya¹**THE GRAPHITE GRADES LUBRICATION EFFECT
ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES
OF THE METALLIC COMPOSITE MATERIAL**

The effect of different graphite grades in the copper-based metallic composite material on its tribotechnical properties is considered.

Graphites were used as a solid lubricant with different crystal structure: synthetic, coarse-grained and fine-crystalline sintered, and finely dispersed colloidal.

Tribotechnical tests data, according to the «finger–disk» testing scheme, have determined the influence of various sliding speeds and contact loading on the wear and friction coefficient depending on the graphite grades in composite material.

It was shown that the tested graphite grades possess different tribotechnical properties associated with its manufacturing, dispersion and grain fineness.

Keywords: graphite, grain fineness, coarse-grained, finely-crystalline, synthetic, antifrictional, friction, wear, friction coefficient.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Известно, что в современном мире большинство механизмов и машин имеют подвижные части и узлы, которые при контакте друг с другом подвергаются значительному изнашиванию. Проблема, связанная со снижением потерь на трение и износ, остается актуальной в настоящее время и стоит очень остро [1, 2]. Для устранения данной проблемы создается и разрабатывается широкий спектр материалов, которые способны минимизировать износ и обеспечить устойчивую работу узлов трения [2–6]. Самое основное и важное условие, которое стоит перед антифрикционными материалами, – это низкий коэффициент трения и высокая износостойкость [5–8]. Для того чтобы

обеспечить данные характеристики, используют антифрикционные композиционные материалы различного состава и строения. В настоящее время широкое распространение получили антифрикционные самосмазывающиеся композиты с металлической матрицей на основе меди и железа.

Наибольшее распространение получили материалы на медной основе, наполненные твердыми смазками [9–11]. Это позволяет отказаться от применения жидкой смазки там, где ее использование затруднено или нет возможности ее подачи. Широкое применение в качестве твердой смазки получили графит, нитрид бора (белый графит), селениды, сульфиды, легкоплавкие и пластичные металлы (свинец, олово, сурьма) и другие вещества. Однако самое широкое распространение и применение получил графит, коэффициент трения которого находится в диапазоне 0,1–0,15 [12]. Столь низкий коэффициент трения объясняется слоистым строением графита, кристаллическая решетка которого состоит из параллельных слоев, образованных шестиугольниками из атомов углерода (рис. 1).

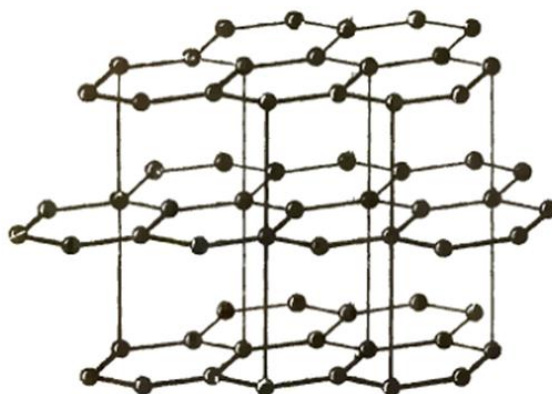


Рис. 1. Строение кристаллической решетки графита

Взаимодействие между этими слоями осуществляется ван-дер-ваальсовыми силами, которые очень слабы из-за большого расстояния между слоями атомов, и вследствие этого возможно скольжение одного углеродного слоя относительно другого под действием малых сдвиговых напряжений [9–12]. В результате этого, когда в процессе трения происходит нагрев, графит распадается на слои и становится смазочным материалом.

Графит имеет хорошую адгезию с металлами, что способствует формированию графитовой пленки на поверхности, которая обеспечивает низкий коэффициент трения, препятствует залипанию трущихся поверхностей и снижает износ [12–14].

По происхождению различают природный и искусственный графит [12–13]. Из-за того, что получить природный графит не всегда представляется возможным и его месторождения не всегда удовлетворяют необходимую потребность в данном минерале, в настоящее время создаются и производятся искусственные марки графита. Искусственный графит, как правило, получают из нефтяного кокса в качестве наполнителя и каменного пека в роли связующего. Его основным преимуществом, в отличие от природного графита, который содержит примеси, является химическая чистота. Содержание углерода в нем составляет до 99%.

Для получения искусственных графитов используют порошки, дисперсность которых составляет от миллиметров до микрометров, поэтому в настоящее время существует классификация графита по среднему размеру зерна [15, 16]:

- крупнозернистый – с величиной зерна от 500 до 3000 мкм;
- среднезернистый – с величиной зерна до 500 мкм;
- мелкозернистый – с величиной зерна от 30 до 150 мкм;
- тонкозернистый – с величиной зерна до 30 мкм.

Для получения твердой смазки на основе графита используют порошки различной крупности – правильно подобранная смесь обеспечивает в дальнейшем более высокую плотность, а следовательно, и прочность изделий. Более тонкое измельчение графита способно повысить прочность его зерен, так как при диспергировании крупные поры и трещины ликвидируются. Более измельченный графит образует более плотную структуру и однородную макроструктуру без каких-либо крупных дефектов, которые существенно разупрочняют материал. Материал, при изготовлении которого используют более мелкий графит, имеет повышенную прочность.

В настоящее время существует множество видов графита с разной дисперсностью и плотностью, которые применяются в различных отраслях промышленности, в том числе и в области антифрикционных материалов. В зависимости от минералогического типа и вида потребления графит выпускают следующих марок – см. таблицу [16].

Марки графита

Тип	Вид графита	Марка	Доля золы, % (по массе), не более	ГОСТ, ТУ	Основное назначение
Природный кристаллический	Специальный малозольный	ГСМ-1	0,1	18191–78	Для экспорта и производства изделий специального назначения
		ГСМ-2	0,5		
	Аккумуляторный	ГАС-1	0,5	10273–79	Для аккумуляторных изделий специального назначения Для изготовления активных масс щелочных аккумуляторов и масс для графитированных антифрикционных изделий
		ГАС-2	1,0		
		ГАС-3	2,0		
	Карандашный	ГК-1	1,0	4404–78	Для канцелярской группы Для чертежей школьной, копировальной групп
		ГК-2	3,0		
		ГК-3	5,0		
	Смазочный	ГС-1	0,5	8295–73	Для антифрикционных компонентов в твердых смазочных покрытиях при изготовлении ядерных реакторов, механизмов космических кораблей, летательных аппаратов В качестве ингредиента электропроводящей резины, изделий порошковой металлургии, паст, электропроводящих полимерных пленок Для изготовления консистентных смазок для высоконагруженных узлов трения Для изготовления изделий специального назначения
			1,0		
			2,0		
			5,0		
		П	7,0		
	Электроугольный	ЭУЗ-М	0,5	10274–79	Для производства электроугольных изделий Завальевского происхождения Для производства электроугольных изделий Тайгинского происхождения
			5,0		
			7,0		
			2,0		
			5,0		
	Тигельный	ГТ-1	7,0	4596–75	Для изготовления огнеупорных графитокерамических изделий
			8,5		
			10,0		
	Элементный	ГЭ-1	10,0	7478–75	Для производства первичных химических источников тока
			14,0		
10,0					
14,0					

Тип	Вид графита	Марка	Доля золы, % (по массе), не более	ГОСТ, ТУ	Основное назначение
Природный кристаллический	Литейный	ГЛС-1	13,0	5279–74	Для покрытия рабочих поверхностей при получении отливок, требующих особо чистой поверхности
		ГЛС-2	18,0		Для изготовления красок, паст, припыла, используемых при получении отливок средней сложности
		ГЛС-3	25,0		Для припыла при получении отливок, не требующих высокой чистоты поверхности
Природный скрытокристаллический	Электроугольный	ЭУН	13,0	10274–79	Для производства электроугольных изделий
	Литейный	ГЛС-1	13,0	P52729–2007	Для изготовления противопригарных покрытий при получении отливок
		ГЛС-2	17,0		
		ГЛС-3	22,0		Для металлургического производства
ГЛС-4	25,0				
Природный	Коллоидный (высокодисперсный порошок)	С-1	1,0	ТУ113-08-48-63-90	Для приготовления графитовых смесей, смазок
		С-2	1,0		
		С-3	1,5		
		С-4	2,0		
	Аморфный	ГА-1	13,0	–	В металлургии, литье, резинотехнике, станкостроении, приборостроении и др.
ГА-2		17,0			
Искусственный	Мелкозернистый плотный	МПГ-6	0,02	ТУ48-4807-297-2000; ТУ1915-109-081-2004	Для изготовления технической оснастки при получении полупроводниковых материалов, контейнеров, электродов-инструментов и др. при высоких температурах
		МПГ-7	–		
		МПГ-8	–		
	Электродный малозольный, крупнозернистый	ГЭ	0,5	ТУ48-20-86-81	Для изготовления электродов, тиглей для выплавки, фасонных изделий
	Малозольный крупнозернистый	ГМЗ	0,03	ТУ48-20-86-81; ТУ48-20-90-82	Для изготовления тиглей для плавки металлов, многокомпонентного стекла, трубчатых нагревателей электропечей вакуумных и сопротивления, уплотнительных колец, блоков и плиток для футеровки и других фасонных изделий по индивидуальным чертежам
		ГМЗ-О	0,03		
		ППГ	0,02		
		ЗОПГ	0,02		
	Малозольный мелкозернистый	МГ	0,5		
		МГ-1	0,3		
		АРВ-1	0,01		
		АРВ-2	0,03		
	АРВ-У	0,01			
	Зернистый	ГИЗ	0,7	ТУ48-4805-101-91	Для науглероживания синтетического чугуна, в процессе доводки стали, в производстве карбида для твердых сплавов и в других процессах
Измельченный	ГИИ А	1,0	ТУ1916-109-71-2000	В металлургии в качестве науглероживателя чугуна и стали	
	ГИИ Б	10,0			

Таким образом, можно сделать вывод, что средний размер зерна графита является одной из ключевых характеристик, которая существенно влияет на антифрикционные свойства материала и на его работу в целом.

Цель данной работы – установление триботехнических свойств различных марок графита в качестве твердых смазок в составе металлического композиционного материала на основе меди.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12. «Металломатричные и полиматричные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Объектами исследования служили образцы в виде диска $\varnothing 60$ мм. Исследованы образцы на основе меди с добавлением таких видов графита, как коллоидный марки С-1, мелкозернистый плотный марки МПГ-7, крупнокристаллический (КК) и синтетический особой чистоты (О.С.Ч) ГОСТ 23463–79, которые обладают разным размером зерен и прочностными характеристиками. Объемная доля графита составляла 10%.

Коллоидный графит представляет собой графит с размером частиц в основном < 4 мкм [16]. Композиционный материал, содержащий коллоидный графит марки С-1, обозначим как $Cu-Cc_1$.

Графит марки МПГ-7 (мелкозернистый плотный графит) относится к группе высокопрочных материалов. Данная разновидность графита получается путем горячего прессования из малозольного кокса. Его структура мелкозернистая и обладает высокой эрозионной прочностью и плотностью. Композиционный материал, содержащий графит марки МПГ-7, обозначим как $Cu-C_{МПГ}$.

К графитам синтетическим особой чистоты относятся марки ГМЗ, ППГ, ЗОПГ, которые производятся из термически обработанных угольного пека и кокса. Данные марки графита относятся к классу малозольных мелкозернистых, однако зерно имеет плоскую, продолговатую форму большой площади. Композиционный материал, содержащий в своем составе синтетический графит, обозначим как $Cu-C_{син}$.

Графит крупнокристаллический имеет средний размер зерна 100–200 мкм и менее плотную структуру. Композиционный материал, содержащий в своем составе крупнокристаллический графит, обозначим как $Cu-C_{КК}$.

Образцы материалов для испытаний изготавливали методом порошковой металлургии. Исходным сырьем для изготовления спеченных изделий из композиционных антифрикционных материалов служили металлический порошок меди марки ПМС-1 и графитовые порошки. Спекание производили на установке искрового плазменного спекания КСЕ[®] FСТН-HPD 25 [14]. Внешний вид полученных образцов представлен на рис. 2.

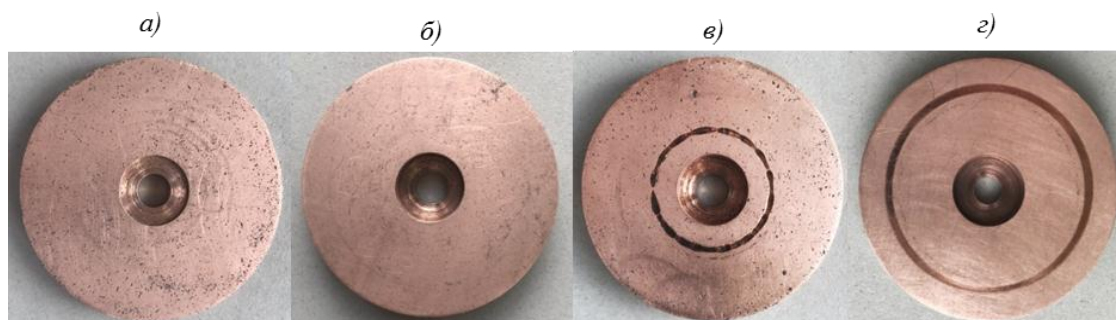


Рис. 2. Внешний вид испытываемых образцов из композиционных материалов $Cu-C_{МПГ}$ (а), $Cu-C_{КК}$ (б), $Cu-C_{син}$ (в) и $Cu-Cc_1$ (г)

Испытания проводили по схеме «палец–диск» на машине трения модели UMT-Tribolab фирмы Bruker. Методика проведения испытаний более подробно описана в работе [17]. В качестве контртела выступал палец из подшипниковой стали марки 95X18 диаметром 6,3 мм, к которому прикладывалась нагрузка от 5 до 25 Н. В качестве образца испытываемого материала выступал диск. Скорость скольжения во время испытаний варьировалась в интервале от 0,5 до 2,5 м/мин. Перед каждым испытанием поверхность дисков и пальца подготавливали, путем шлифования абразивной шкуркой зернистостью Р600 до шероховатости $R_a \leq 0,5 \mu\text{м}$.

Результаты и обсуждение

Результаты определения коэффициента трения при триботехнических испытаниях в условиях варьирования скорости скольжения в интервале от 0,5 до 2,5 м/мин при постоянной нагрузке на контакт трения 10 Н для композиционных материалов с различными марками графитов представлены на рис. 3. Видно, что материал Cu-C_{син} имеет повышенный коэффициент трения по сравнению с другими материалами, а также заметно, что скорость скольжения 1,5 м/с является критической, до которой коэффициент трения незначительно уменьшается, а ее превышение приводит к его росту.

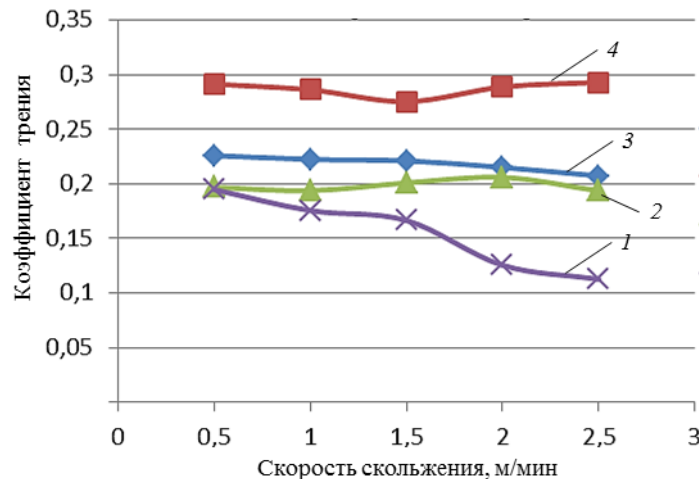


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения для меднографитовых материалов Cu-C_{с1} (1), Cu-C_{МПГ} (2), Cu-C_{КК} (3) и Cu-C_{син} (4)

Коэффициенты трения остальных материалов с увеличением скорости скольжения либо не изменяются (Cu-C_{МПГ}), либо имеют тенденцию к уменьшению (Cu-C_{КК}, Cu-C_{с1}).

По результатам испытаний наиболее низкий коэффициент трения показал образец Cu-C_{с1}. Это связано с тем, что коллоидный графит имеет очень мелкую структуру зерна и дисперсность, что позволяет наиболее равномерно распределить графит по объему материала.

Высокое исходное значение коэффициента трения синтетического графита и его резкий рост с увеличением скорости скольжения может свидетельствовать о более низкой степени графитизации, повышенной хрупкости, неравномерности распределения в объеме материала.

Наряду с коэффициентом трения во время испытаний с различной скоростью скольжения фиксировался износ (величина глубины бороздки) – зависимость износа материала от скорости скольжения (рис. 4). Зависимости износа характеризуются минимумом в диапазоне скорости скольжения 1,5 м/мин у всех типов материалов.

- По величине износа выделяются две группы материалов:
- Cu-Cc₁ и Cu-C_{МППГ} – с малой величиной износа;
 - Cu-C_{син} и Cu-C_{КК} – с повышенной величиной износа.

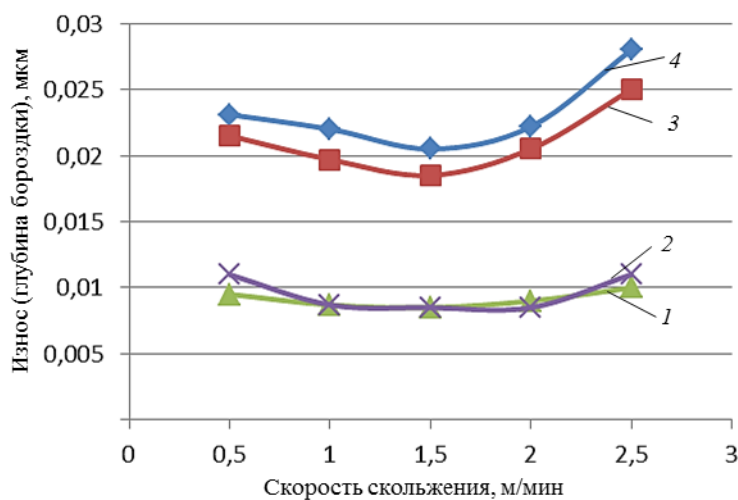


Рис. 4. Зависимость износа от скорости скольжения для меднографитовых материалов Cu-C_{МППГ} (1), Cu-Cc₁ (2), Cu-C_{син} (3) и Cu-C_{КК} (4)

Такое разделение можно объяснить кристаллической структурой графитов в составе материала. Коллоидный графит и МППГ имеют мелкозернистую структуру и меньший износ. Крупнокристаллический графит и синтетический обладают крупнозернистым строением и характеризуются большим износом.

Триботехнические испытания в условиях варьирования нагрузки в интервале от 5 до 25 Н проводили при постоянной скорости скольжения 1 м/мин (рис. 5).

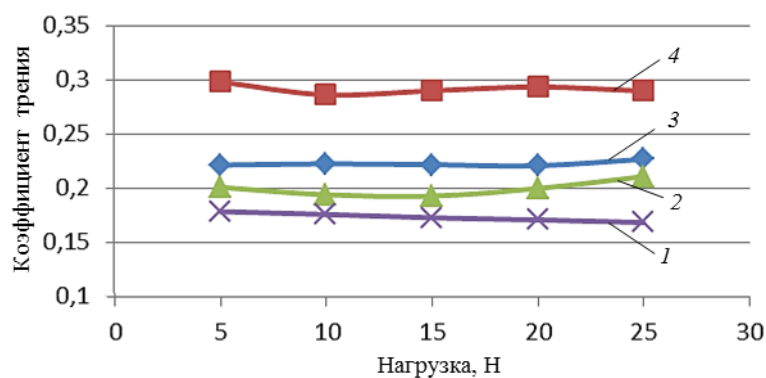


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для меднографитовых материалов Cu-Cc₁ (1), Cu-C_{МППГ} (2), Cu-C_{КК} (3) и Cu-C_{син} (4)

Испытания показали, что наименьшим коэффициентом трения при различной нагрузке обладает образец, имеющий в своем составе коллоидный графит Cu-Cc₁. Наибольшим коэффициентом трения из всех испытанных материалов обладает образец, содержащий синтетический графит.

Результаты испытаний на износ при варьировании нагрузки на контакт трения в диапазоне от 5 до 25 Н при постоянной скорости скольжения 1 м/мин представлены на рис. 6. Наблюдается явный рост износа с увеличением нагрузки для всех образцов.

Такое поведение объясняется тем, что с увеличением нагрузки происходит пластическое деформирование материалов в области контакта трения с увеличением площади контакта.

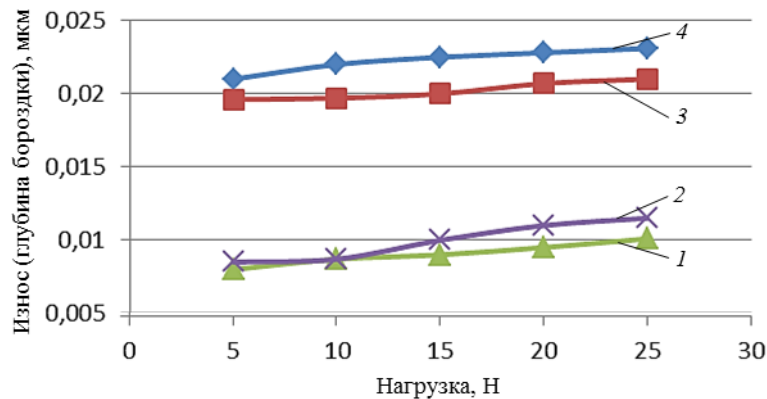


Рис. 6. Зависимость износа от нагрузки для меднографитовых материалов Cu-C_{МПГ} (1), Cu-C_{С1} (2), Cu-C_{син} (3) и Cu-C_{КК} (4)

Видно (рис. 6), что наименьший износ имеют образцы Cu-C_{С1} и Cu-C_{МПГ} с мелкокристаллической структурой. Более высокий износ у образцов с крупнокристаллической структурой Cu-C_{син} и Cu-C_{КК}.

Заключения

По итогам проведенных триботехнических испытаний показано влияние марки графита на коэффициент трения и износостойкость композиционного материала. Лучшие антифрикционные свойства в качестве компонента твердой смазки в композиционном материале показал коллоидный графит. Это можно связать с высокой дисперсностью частиц графита и хорошей равномерностью его распределения в объеме материала.

Самые низкие антифрикционные свойства (высокий коэффициент трения и низкие противоизносные свойства) продемонстрировал синтетический графит. Такой эффект объясняется высокой химической чистотой и высокой плотностью, приближающейся к теоретической. Малое количество дефектов в структуре такого графита обеспечивает высокие прочностные свойства и отрицательно отражается на антифрикционных свойствах, препятствуя сдвигу вдоль кристаллических плоскостей.

Следует также отметить выявленную закономерность влияния величины кристаллического строения на износостойкость. Как показали триботехнические испытания, графит с крупнокристаллической структурой сравнительно хуже препятствует износу композиционного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Соломенцева А.В., Фадеева В.М., Железина Г.Ф. Антифрикционные органопластики для тяжело нагруженных узлов трения скольжения авиационных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 30–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-30-34.

3. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Алешина Р.Ш. Исследование триботехнических характеристик материалов, применяемых для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №S1 (43). С. 24–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-24-30.
4. Иванов Е.В. Создание износостойких и антифрикционных материалов и покрытий для космического корабля «Буран» // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 142–151.
5. Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
7. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Материалы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
8. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // *Металлург*. 2013. №12. С. 4–8.
9. Браун Э.Д., Буше Н.А., Буяковский И.А. Основы трибологии (трение, износ, смазка). М.: Наука и техника, 2001. 778 с.
10. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. М.: Машгиз, 1962. 219 с.
11. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. 404 с.
12. Белогорский В.Д. Антифрикционный графит и его применение в промышленности. М.: Знание, 1974. 154 с.
13. Островский В.С. Искусственный графит. М.: Metallургия, 1986. 272 с.
14. Брэйтуэйт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. М.: Химия, 1967. 320 с.
15. Фиалков А.С. Углеродистые материалы. М.: Энергия, 1979. 319 с.
16. ГОСТ 17022–81. Графит. Типы, марки и общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
17. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытания на трение и износ. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 152 с.