

УДК 620.19:621039.52

Л. Н. ДЬЯЧКОВА, *д-р техн. наук, проф.*

А. Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, *д-р техн. наук, проф., акад.*

В. А. ОСИПОВ

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

ИНФИЛЬТРИРОВАННЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГРАФИТА ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Аннотация

Представлены результаты исследований влияния состава инфильтрата и режимов инфильтрации на структуру и свойства материалов на основе графита. Установлено, что максимальная плотность после инфильтрации достигается при инфильтрации Si-Cu-Sn сплавом. Показаны особенности формирования структуры и состава фазы инфильтрата в порах графита в зависимости от его состава. Установлено, что инфильтрация приводит к росту прочности графита в 1,6...4 раза, обеспечивает коэффициент трения 0,16 и температуру в зоне трения 61 °С при инфильтрации Cu-Si-Sn сплавом.

Ключевые слова:

антифрикционные материалы на основе графита, инфильтрация, состав инфильтрата, структура, плотность, свойства.

На фоне развития научно-технического прогресса, связанного с созданием новой техники и технологий, особое значение приобретают проблемы надежности и долговечности машин и механизмов, экономного использования материалов и энергии. Существенное снижение надежности и долговечности машин и механизмов связано с износом деталей узлов трения. Процессы порошковой металлургии позволяют создавать новые материалы с уровнем физико-механических и служебных свойств, превышающих характеристики материалов, полученных традиционными методами металлургии, при этом материалы могут сочетать высокие механические и триботехнические свойства. Это обеспечивает минимум потерь энергии в узлах трения и максимальный срок их службы. Для работы в условиях высоких температур и агрессивных сред применение металлических материалов ограничено, в связи с этим применяют композиционные материалы на основе углерода. Углеродные материалы являются наиболее распространенными, используемыми в парах трения, работающие при повышенных температурах. В качестве исходных материалов для них применяют природный или искусственный графиты [1].

Графит антифрикционный используется для производства узлов и агрегатов, станков и механизмов, работающих без смазки в диапазоне температур от минус 200 °С до плюс 2000 °С в условиях непосредственного контакта с жидкими и химически агрессивными средами, в т. ч. содержащими абразив, в среде агрессивных газов и в других особых условиях эксплуатации [2], в которых работоспособность многих известных антифрикционных материалов ограничена или полностью исключена. Применение антифрикционных материалов на основе графита значительно удешевляет и упрощает конструкцию машин и меха-

низмов. Однако, они обладают низкой прочностью, трещиностойкостью и износостойкостью, поэтому разрабатываются различные способы уменьшения этих недостатков.

Для повышения износостойкости материалы на основе углерода пропитывают металлами или неметаллическими соединениями. Пропитка снижает пористость, увеличивает модуль упругости, твердость, износостойкость, температурный коэффициент линейного расширения и теплопроводность материала [3]. Металлографиты обладают хорошими антифрикционными свойствами (пониженным коэффициентом трения, способностью «самосмазывания», хорошей прирабатываемостью к различным поверхностям), повышенной электропроводимостью и прочностью, невосприимчивостью к различным жидкостям и газам высокого давления. Изготовленные из металлографита втулки, пластины, уплотнительные кольца и другие изделия используют в машиностроительной, нефтехимической, металлургической, энергетической, пищевой и текстильной отраслях промышленности. Недостатком при получении металлографитов является необходимость при пропитке (инфильтрации) пористых графитов металлами (свинцом, оловом, медью) использовать специальное дорогостоящее оборудование (автоклавы), где при температуре выше температуры плавления пропитываемого материала создают попеременно давление и вакуум. Для исключения этого недостатка разрабатывается метод самопроизвольной пропитки графита металлами на основании процессов смачивания.

Целью работы является исследование влияния состава инфильтрата и режимов инфильтрации на структуру и свойства материалов на основе графита.

В качестве основы в работе использовали искусственный графит марок ЭГ, МГ, МГ-1, ГМЗ. Несмотря на то, что пористость этих марок графита примерно одинакова ($0,1 \dots 0,18 \text{ см}^3/\text{г}$) [3], при инфильтрации они вели себя по-разному.

Самопроизвольная инфильтрация медно-кремниевым сплавом наблюдалась только у графита марки МГ и частично у ЭГ, поэтому в дальнейших исследованиях использовали графит марки МГ. Инфильтрацию проводили в вакууме при температурах 1350, 1450 и 1550 °С в течение первого часа, а также при 1450 °С в течение второго часа сплавами четырех составов.

1. 42 % Cu + 18 % Sn + 40 % Si.
2. 70 % Cu + 30 % Ti.
3. 39 % Cu + 18 % Sn + 3 % Ni + 40 % Si.
4. 49,5 % Cu + 4,5 % Ti + 6 % Sn + 40 % Si,

которые получали смешиванием порошков.

Структуру материала исследовали на металлографическом микроскопе «MEF-3» (Австрия) и сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA 350» фирмы «Oxford Instruments» (Англия), прочность – на испытательной машине Tinius Olsen (Англия).

Максимальная плотность после инфильтрации отмечается у материала, инфильтрованного сплавом 1 (рис.1), при этом повышение температуры практически не влияет на плотность материала.

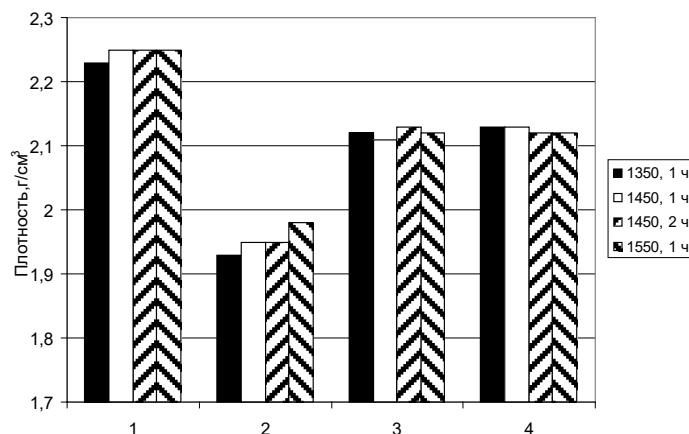


Рис. 1. Влияние состава инфильтрата и температуры инфильтрации на плотность графита: 1 – 1 состав; 2 – 2 состав; 3 – 3 состав; 4 – 4 состав

Исследование структуры графита выявило, что при инфильтрации составом 1 практически все поры в графите заполняются медным сплавом уже при температуре 1350 °С (рис. 2, а). Повышение температуры инфильтрации приводит к заполнению не только крупных пор, но и пор диаметром менее 10 мкм (рис. 2, б), а увеличение времени выдержки – к увеличению толщины переходного слоя (рис. 2, в, г и рис. 3).

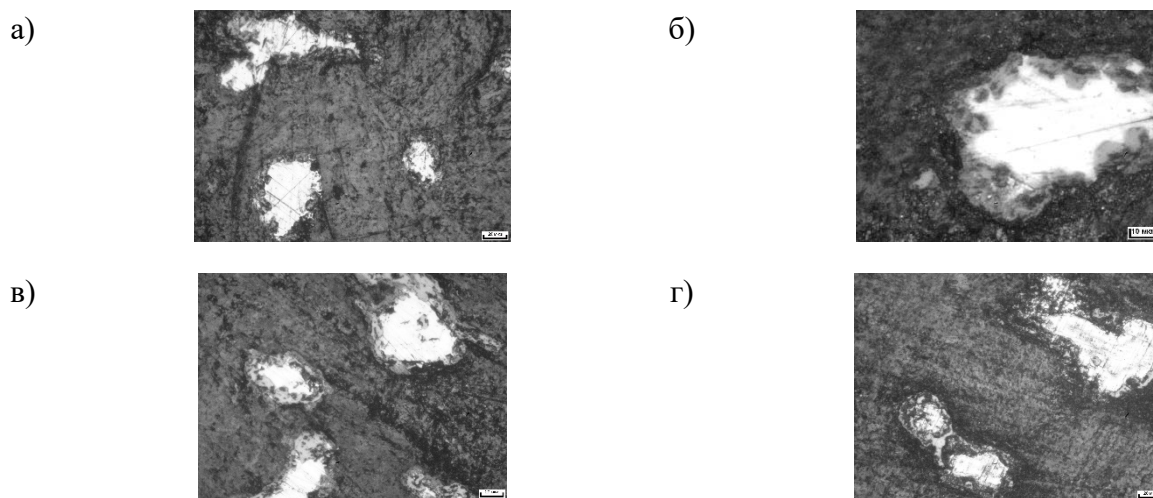


Рис. 2. Структура графита, инфильтрованного составом 1: а – 1350 °С, 1 ч; б – 1450 °С, 1 ч; в – 1450 °С, 2 ч; г – 1550 °С, 1 ч; а, в, г – 200 X; б – 500X

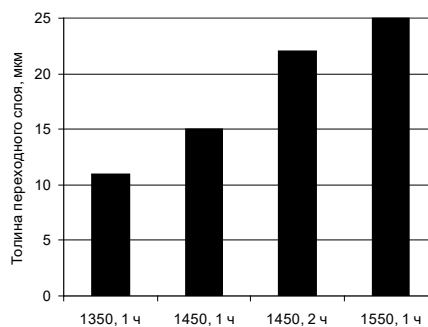
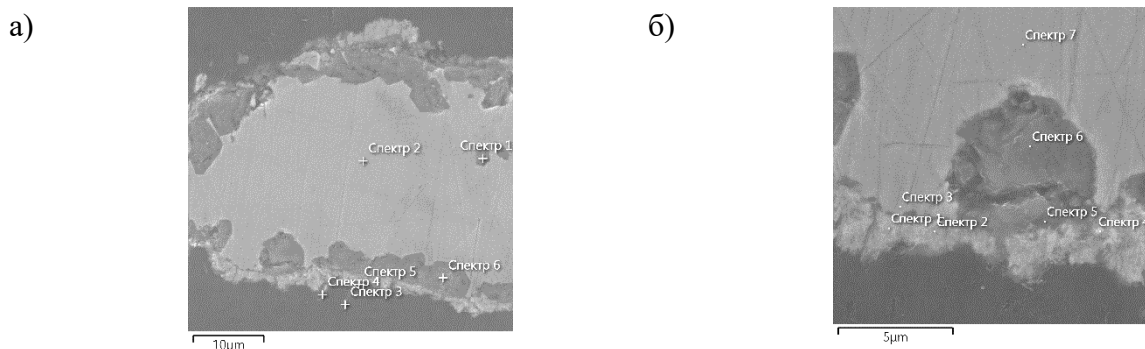


Рис. 3. Кинетика изменения толщины переходного слоя в фазе инфильтрата состава 1

Микрорентгеноспектральный анализ структуры показал, что переходный слой неоднороден по составу. На границе с графитом наблюдается повышенное содержание олова, далее в виде включений неправильной формы находятся включения карбида кремния. Точечный анализ выявил (рис. 4), что в центре фазы инфильтрата находится преимущественно медь (до 75 %), присутствуют также олово (до 2 %) и кремний (до 9 %) (спектр 2 на рис. 4, а). На границе с инфильтратом в графите присутствует до 15 % кремния, который, по-видимому, находится в виде карбида, и незначительное (до 2 %) количество олова и меди (спектры 3, 4 на рис. 4, а).

В переходном слое, расположенном на границе с графитом, содержится повышенное количество олова – 38 %...47 %, 10 %...25 % меди, 9 %...18 % кремния (спектры 1, 2, 4 на рис. 4, б). В центре темно-серой частицы включения, обогащенного кремнием, содержится 47,6 %...50,1 % кремния, 49,2 %...52,1 % углерода, что соответствует стехиометрическому карбиду кремния, и 0,4 % меди (спектры 6 на рис. 4, а, б), на границе со светлым переходным слоем содержание кремния не изменяется (47,3 %), но уменьшается количество углерода до 36,8 % (нестехиометрический карбид кремния), увеличивается количество меди до 2,2 % и олова до 13,9 % (спектр 5 на рис. 4, б).



Спектр	C, %	Si, %	Cu, %	Sn, %		Спектр	C, %	Si, %	Cu, %	Sn, %
1	55,4	42,0	2,4	0,2		1	20,2	9,0	24,9	45,9
2	17,5	8,6	72,1	1,9		2	25,6	17,6	9,8	47,0
3	84,2	14,4	0,78	0,7		3	23,7	9,3	60,8	6,2
4	82,1	14,6	1,6	1,7		4	25,2	14,8	21,4	38,6
5	60,0	19,0	1,2	19,8		5	36,8	47,3	2,2	13,9
6	49,2	50,1	0,7	0,0		6	52,1	47,6	0,4	0,0
						7	21,3	8,3	6,5	1,9

Рис. 4. Точечный анализ фаз в инфильтрате состава 1 (температура инфильтрации 1350 °С): а – X3000; б – X10000

Исследование образцов, инфильтрованных составом 2, показало, что, несмотря на литературные данные о том, что при увеличении содержания титана до 30 % краевой угол смачивания графита сплавом снижается до 0 градусов [4], инфильтрация при температуре 1350 °С происходила на глубину не более 500 мкм, а при повышении температуры до 1550 °С отдельные включения инфильтрата отмечались на глубине 3 мм. Возможно, отсутствие сквозной про-

питки объясняется тем, что на поверхности образца образуется слой, состоящий из меди и карбида титана, который препятствует проникновению расплава инфильтрата в объем образца. Наличие карбида титана на границе фазы инфильтрата наблюдается и во включениях инфильтрата в объеме графитовой основы.

При инфильтрации составом 3, в который дополнительно вводили 3 % Ni, в связи с повышением вязкости расплава пропитка при 1350 °С происходит на глубину 3,6...4,0 мм, только при 1550 °С инфильтрат идентифицируется во всем объеме образца. При этом в фазе инфильтрата практически отсутствует слой олова в приграничной области и увеличивается количество включений с повышенным содержанием кремния.

Структура включений инфильтрата состава 4 аналогична составу 1, однако фазы с высоким содержанием кремния больше. Инфильтрация при 1550 °С приводит к расслоению медной фазы и образованию слоя с повышенным содержанием олова в приграничной с графитом области.

Исследование влияние температуры и состава инфильтрата на прочность графита показало (рис. 5), что повышение температуры приводит к росту прочности. Наибольший рост прочности наблюдается при инфильтрации составами 1 и 2, при инфильтрации составом 1 предел прочности при сжатии возрастает в 2 раза, а составом 2 – в 1,6 раза. При инфильтрации составом 4 температура инфильтрации практически не влияет на прочность графита, однако она существенно выше, чем прочность графита, инфильтрированного составом 1 при температуре 1350 °С...1450 °С.

Исследование трибологических свойств выполняли с помощью машины трения А-135 при использовании схемы «ролик–колодка» в условиях концентрированного контакта при скорости скольжения 0,45 м/с и усилии нагружения 1000 Н в течение 30 мин. Колодки выполнялись из исследуемых материалов, ролики – из стали 40Х, закаленной до твердости 45...50 HRC. В ходе испытаний определяли мгновенный коэффициент трения и температуру в зоне трения по методике, описанной в [5]. Испытания выявили, что коэффициент трения исследованных марок графита до времени испытания 20 мин практически одинаков и составляет 0,16. Через 20 мин испытания температура в зоне трения составляет 58 °С, через 30 мин – 61 °С.

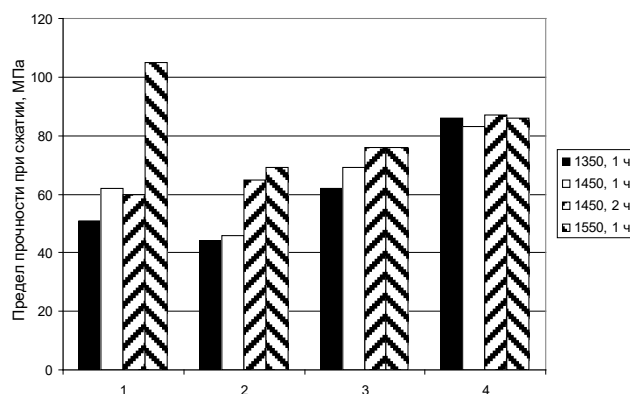


Рис. 5. Влияние состава инфильтрата и температуры на прочность графита: 1 – состав 1; 2 – состав 2; 3 – состав 3; 4 – состав 4

Заключение. Исследовано влияние состава инфильтрата и режимов инфильтрации на структуру и свойства материалов на основе графита. Показано, что максимальная плотность графита достигается после пропитки Cu-Si-Sn сплавом – $2,25 \text{ г/см}^3$, при этом повышение температуры практически не влияет на изменение плотности, в то же время при увеличении температуры инфильтрации до 1450°C происходит заполнение не только крупных пор, но и пор диаметром менее 10 мкм. При инфильтрации Cu-Si-Sn сплавом на границе с графитом в фазе инфильтрата образуется стехиометрический и нестехиометрический карбид кремния, располагающийся в виде оторочки, а также фазы с содержанием Cu 64 %...77,3 %; Si – 3,4 %...4,6 %; Sn – 1,5 %...2,5 %. На границе с графитом образуется слой, содержащий Sn 12 %...46,4 %; Si – 18,3 %; Cu – 0,6 %. Повышение температуры инфильтрации и времени выдержки приводит к увеличению толщины переходного слоя неоднородного состава, в котором на границе с графитом наблюдается повышенное содержание олова. Введение в сплав дополнительно 3 % Ni приводит к повышению вязкости расплава и при 1350°C заполнение пор происходит лишь на глубину 3,6...4,0 мм, а при 1550°C – по всему объему образца. При этом в фазе инфильтрата практически отсутствует слой олова в приграничной области и увеличивается количество включений с повышенным содержанием кремния. При инфильтрации Cu-Ti сплавом заполнение пор происходит на глубину 3 мм, а Cu-Ti-Si – во всем объеме. При этом в фазе инфильтрата присутствуют карбид кремния различного состава и силицид титана. Установлено, что повышение температуры инфильтрации приводит к росту прочности графита. При инфильтрации предел прочности при сжатии возрастает в 1,6...4 раза. Показано, что коэффициент трения инфильтрированного Cu-Si-Sn сплавом графита составляет 0,16, температура в зоне трения 61°C .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Графит в науке и ядерной технике / Е. И. Жмуриков [и др.]. – Новосибирск, 2013. – 193 с.
2. Новые высокопрочные материалы для традиционных технологий / В. И. Костиков [и др.] // РХЖ, 2004. – Т. XLVIII. – № 5. – С. 64–75.
3. **Тарабанов, А. С.** Силицированный графит / А. С. Тарабанов, В. И. Костиков. – Москва: Металлургия, 1977. – 208 с.
4. **Найдич, Ю. В.** Закономерности контактного взаимодействия графита с расплавленными металлами / Ю. В. Найдич, Г. А. Колесниченко // Изв. АН СССР. Металлы. – 1968. – № 4. – С. 220–230.
5. **Дьячкова, Л. Н.** Триботехнические характеристики спеченной оловянистой бронзы с добавками оксидов алюминия и никеля / Л. Н. Дьячкова, Е. Э. Фельдштейн, П. А. Витязь // Трение и износ. – 2013. – Т. 34. – № 1. – С. 28–36.

Контакты:

dln.51@mail.ru (Дьячкова Лариса Николаевна);

alexil@mail.belpac.by (Ильющенко Александр Федорович);

foff2017@mail.ru (Осипов Владимир Анатольевич).