УДК 678.743:539.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-38-41

*Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, Д. В. Савин, Г. В. Агафонова, А. С. Агейкин***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ АЛЮМИНИЯ
НА ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ
ФТОРОПЛАСТОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mvpol@vstu.ru

Исследовано влияние дисперсности и концентрации алюминиевых частиц и спекания на тепловое расширение фторопласт-алюминиевых композиционных материалов. Композиционные материалы получали статическим прессованием порошковых смесей фторопласта с 50 и 70 % алюминия с последующим спеканием. Установлено, что уменьшение размера частиц алюминия увеличивает тепловое расширение и снижает плотность КМ, но не влияет на теплостойкость. Обнаружено, что увеличение концентрации алюминия приводит к снижению теплового расширения КМ.

Ключевые слова: фторопласт-4, алюминий, дисперсность, статическое прессование, адгезионное взаимодействие, композиционные материалы, тепловое расширение.

*N. A. Adamenko, A. V. Kazurov, D. V. Savin, G. V. Agafonova, A. S. Ageikin***STUDY OF THE INFLUENCE OF ALUMINUM DISPERSION ON THERMAL
EXPANSION OF HIGHLY FILLED FLUOROPLASTIC COMPOSITE MATERIALS****Volgograd State Technical University**

The effect of dispersion and concentration of aluminum particles and sintering on the thermal expansion of fluoroplastic-aluminum composite materials has been investigated. Composite materials were obtained by static pressing of powder mixtures of fluoroplastic with 50 and 70% aluminum, followed by sintering. It was found that a decrease in the size of aluminum particles increases thermal expansion and decreases the density of CMs, but does not affect heat resistance. It was found that an increase in the aluminum concentration leads to a decrease in the thermal expansion of CM.

Keywords: fluoroplastic-4, aluminum, dispersity, static pressing, adhesive interaction, composite materials, thermal expansion.

Введение

В машиностроении для изготовления узлов трения широкое распространение получили антифрикционные металлополимеры на основе фторопласта-4 (Ф-4), сочетающие высокие антифрикционные свойства с высокими тепло- и термостойкостью [1–5]. В основном в качестве наполнителя используется бронза, обладающая высокой тепло- и электропроводностью [1–4]. Вместе с увеличением износостойкости, бронза повышает плотность фторопластовых композиционных материалов (КМ), особенно высоконаполненных. Замена бронзовых наполнителей на алюминиевые может снизить плотность фторопластовых КМ, не приводя к существенному снижению тепло- и электропроводности, что делает исследование фторопласт-алюминиевых КМ перспективной задачей. Тепловое расширение является важной характеристикой антифрикционных материалов [4], поэтому целью работы являлось изучение влияния дисперсно-

сти алюминия на тепловое расширение высоконаполненных фторопластовых КМ.

Методика проведения исследований

Композиционные материалы на основе Ф-4 (ГОСТ 10007–80), наполненного 50 и 70 % об. порошковым алюминием ПА-4 (ГОСТ 6058–73) дисперсностью менее 50 мкм и 100–200 мкм, получали односторонним статическим прессованием (СП) в пресс-формах давлением 0,2 ГПа с последующим спеканием. Необходимую дисперсность порошка алюминия получали просеиванием алюминиевого порошка через набор сит. Объемные пропорции в композиционных материалах обеспечивали смешиванием навесок заданной массы (с точностью до 0,01 г), взвешенных на лабораторных электронных весах OHAUS-123. Спекание осуществляли в свободном состоянии при температуре 380 °С с выдержкой 15 минут на один миллиметр поперечного сечения образца.

Плотность измеряли гидростатическим взвешиванием на аналитических весах *Shinko HTR-220CE* согласно ГОСТу 15139–69. Тепловое расширение наполненного фторопласта измеряли на установке термомеханического анализа *Netzsch 402 F3 Hyperion* по одноосной схеме. Образцы имели высоту 2 мм и диаметр 5 мм, нагрев производили до 390 °С со скоростью 3 °С/мин, а направление измерения осуществлялось вдоль направления прессования образцов. Кривые теплового расширения строились и анализировались с помощью встроенного программного обеспечения *Proteus 61*. Приведенные значения теплового расширения являются результатом аппроксимации экспериментальных данных, полученных при испытании не менее трех одинаковых образцов из КМ.

Результаты исследований

Результаты исследований плотности фторопласт-алюминиевых КМ (рис. 1) показали, что после СП достигается максимальная плотность КМ, которая соответствует рассчитанной по пра-

вилу смеси при 50 % алюминия (2465–2480 кг/м³) и немного ниже при 70 % алюминия (2505–2555 кг/м³). Спекание приводит к снижению плотности как при 50 % алюминия (2330–2390 кг/м³), так и при 70 % алюминия (2375–2460 кг/м³) независимо от дисперсности частиц алюминия, что связано с образованием пористости и снижением степени кристалличности. До спекания влияние дисперсности алюминия на плотность КМ минимально, хотя и прослеживается, что плотность меньше у КМ с меньшим размером частиц алюминия – 2465–2505 кг/м³ у КМ с размером частиц алюминия до 50 мкм и 2480–2555 кг/м³ у КМ с наполнителем 100–200 мкм. После спекания разница в плотности КМ с различным размером частиц алюминия увеличивается – 2330–2375 кг/м³ у КМ с размером частиц алюминия до 50 мкм и 2390–2555 кг/м³ у КМ с наполнителем 100–200 мкм. Стоит отметить, что влияние размера частиц алюминия на плотность усиливается при увеличении концентрации алюминия.

Рис. 1. Плотность фторопласт-алюминиевых КМ, с размером частиц алюминия до 50 мкм (1, 3) и 100–200 мкм (2, 4): 1, 2 – до спекания, 3, 4 – после спекания

Исследования зависимости теплового расширения фторопластовых КМ с 50 и 70 % алюминия от температуры (рис. 2) показали, что кривые, отображающие эту зависимость, имеют характерный для фторопластовых КМ вид. При нагреве до t_1 происходит небольшое тепловое расширение, связанное с малой тепловой подвижностью макромолекул и стабильным состоянием кристаллической фазы Ф-4. В интервале температур t_1 – t_2 происходит характерный скачок теплового расширения, обусловленный плавлени-

ем кристаллической фазы Ф-4. При нагреве выше t_2 происходит равномерное увеличение теплового расширения, связанное с повышением подвижности и разориентацией макромолекул Ф-4 в аморфной фазе.

Результаты исследований теплового расширения фторопластовых КМ с 50–70 % алюминия показали (рис. 2 и таблица), что тепловое расширение КМ с размером частиц алюминия 100–200 мкм до начала плавления (ϵ_1) меньше до 1,8 % (или до 1,4 раз), чем у КМ с размером час-

тиц алюминия до 50 мкм, а после плавления (ε_2) до 3,2 % (или до 1,4 раз). Тепловое расширение в интервале температур t_1 – t_2 ($\Delta\varepsilon$) при увеличении размера частиц алюминия уменьшается с 7,8–8,7 % до 6,4–5,8 % у неспеченных образцов, а у спеченных с 2,3–3 % до 1,5–2,2 %. При этом теплоустойчивость фторопластовых КМ, связанная с началом плавления, мало зависит от дисперс-

ности алюминия и температура плавления составляет 340–341 °С до спекания и 322–334 °С после спекания. Увеличение концентрации алюминия с 50 до 70 % приводит к уменьшению теплового расширения фторопластовых КМ – на 0,7–3,2 % (в 1,1–2,0 раза) при размере частиц алюминия до 50 мкм и на 1–2,2 % (в 1,2–1,9 раз) при размере частиц алюминия 100–200 мкм.

Рис. 2. Зависимость теплового расширения фторопластовых КМ с 50 % (а, б) и 70 % (в, г) алюминия, полученных СП, до (а, в) и после спекания (б, г), от температуры:
1 – до 50 мкм; 2 – 100–200 мкм

Сравнение зависимостей теплового расширения фторопласт-алюминиевых КМ от температуры до и после спекания показало, что спекание приводит к их изменению. У неспеченных КМ тепловое расширение до температуры плавления незначительно и увеличивается равномерно, а при плавлении наблюдается интенсивное тепловое расширение. После спекания тепловое расширение КМ до начала плавления увеличивается плавно, а плавление начинается при меньшей температуре и протекает в более широком интервале температур. При этом после спекания тепловое расширение при плавлении

Ф-4 ($\Delta\varepsilon$) уменьшается с 5,8–8,7 % до 1,5–3 %. Подобные различия указывают на изменения в кристаллической фазе Ф-4.

Полученные результаты показывают, что плотность высоконаполненных фторопласт-алюминиевых КМ, полученных СП, снижается при спекании, что связано с образованием пористости. При этом меньшая плотность неспеченных фторопластовых КМ с меньшим размером частиц алюминия связана с меньшей уплотняемостью порошковой смеси. Плавление Ф-4 приводит к возникновению растягивающих напряжений между частицами алюминия, что

приводит к образованию пор и тепловому расширению. Следовательно, СП не обеспечивает необходимый уровень адгезионной прочности между компонентами КМ для предотвращения образования пор в материале. Это подтвержда-

ется большим снижением плотности КМ с меньшим размером частиц алюминия – чем меньше размер частиц алюминия, тем больше площадь их поверхности и, следовательно, вероятнее образование большего количества пор.

Характерные температуры и деформации теплового расширения фторопласт-алюминиевых КМ

Содержание алюминия, % об.	Размер частиц алюминия, мкм	Спекание $t=380^{\circ}\text{C}$	Характеристики кривых теплового расширения				
			$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$\epsilon_1, \%$	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	$\epsilon_2, \%$	$\Delta\epsilon, \%$
50	<50	–	341	4,3	352	13,0	8,7
		+	322	6,4	336	9,4	3
	100–200	–	340	3,4	351	9,8	6,4
		+	323	4,5	337	6,7	2,2
70	<50	–	340	2,5	351	10,3	7,8
		+	324	6,2	337	8,5	2,3
	100–200	–	341	2,5	351	8,3	5,8
		+	326	4,4	335	5,9	1,5

Изменение интенсивности плавления кристаллической фазы, выраженной в разности деформаций теплового расширения ($\Delta\epsilon$), и температуры плавления после спекания характерно для Ф-4 и связано с процессами, происходящими во фторопласте при спекании и сопровождающимися изменением строения кристаллической фазы [6,7]. Уменьшение теплового расширения высоконаполненных фторопластовых КМ при увеличении концентрации алюминия связано со смесевыми закономерностями.

Увеличение теплового расширения неспекенных фторопластовых КМ при уменьшении размера частиц алюминия может быть связано с большей поверхностью между частицами, что обеспечивает рост теплового расширения Ф-4 при плавлении. Это подтверждается усилением этой закономерности после спекания, что обусловлено образованием большего количества пор в КМ с меньшим размером частиц алюминия.

Выводы

1. Установлено, что уменьшение размера частиц алюминия снижает плотность и увеличивает тепловое расширение высоконаполненных фторопластовых КМ, но не оказывает влияния на теплостойкость. Также уменьшение размера частиц алюминия способствует большему снижению плотности при спекании фторопласт-алюминиевых КМ.

2. Обнаружено, что спекание высоконаполненных фторопластовых КМ, полученных СП, приводит к снижению плотности независимо от концентрации и дисперсности частиц алюминия, что вызвано низкой адгезией, недостаточной для препятствования образованию пор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нечипоренко, О. Ю. Исследование спеченных втулок из материала БФГ-50М в составе карданов, работающих без возобновления смазки / О. Ю. Нечипоренко, И. М. Ромашко, А. С. Бычков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2018. – № 4. – С. 122–129.
2. Бычков, А. С. Исследование эксплуатационных характеристик втулок из антифрикционного самосмазывающегося материала БФГ-50М, изготовленных методом порошковой металлургии Сообщение 1. Технология изготовления. Металлографические исследования заготовок втулок / А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко, И. М. Ромашко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2017. – № 76. – С. 86–100.
3. Каблов, Е. Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи / Е. Н. Каблов // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. – М. : МИСИС-ВИАМ. 2002. – С. 23–47.
4. Семенов, А. П. Металлофторопластовые подшипники / А. П. Семенов, Ю. Э. Савинский. – М. : Машиностроение, 1976. – 192 с.
5. Бабаевский, П. Г. Промышленные полимерные композиционные материалы / П. Г. Бабаевский. – М. : Химия. – 1980.
6. Radusch, H. J. Analysis of reversible melting in polytetrafluoroethylene // Journal of thermal analysis and calorimetry. – 2005. – Т. 79. – № 3. – С. 615–621.
7. Melillo L., Wunderlich B. Extended-chain crystals // Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere. – 1972. – Т. 250. – № 5. – С. 417–425.