Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, Д. В. Савин, Г. В. Агафонова, А. С. Агейкин, А. С. Усанин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ МЕТАЛЛА НА ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ
ФТОРОПЛАСТ-АЛЮМИНИЕВЫХ 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 с последующим спеканием. Установлено, что уменьшение размера частиц алюминия не влияет на теплостойкость, но увеличивает тепловое расширение и снижает плотность КМ. Обнаружено, что увеличение концентрации алюминия приводит к снижению теплового расширения КМ до спекания и увеличению после спекания.

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, A. S. Usanin

**STUDY OF THE INFLUENCE OF METAL DISPERSITY ON THERMAL EXPANSION
OF FLUOROPLAST - ALUMINUM 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, followed by sintering. It was found that a decrease in the size of aluminum particles does not affect heat resistance, but increases thermal expansion and decreases the density of CM. Found that an increase in the aluminum concentration leads to a decrease in the thermal expansion of CMs before sintering and an increase after sintering.

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

© Адаменко Н. А., Казуров А. В., Савин Д. В., Агафонова Г. В., Агейкин А. С., Усанин А. С., 2021.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта №19-43-343001.

Введение

В узлах трения авиационной техники широко применяют металлофторопласты на основе фторопласт-4 (Ф-4), обладающего уникально низкими коэффициентами трения, высокой химической и термической стойкостью, и бронзы, обладающей высокой тепло- и электропроводностью [1–4]. Бронза повышает износостойкость Ф-4, однако также повышает плотность, что затрудняет применение таких КМ для авиации. Альтернативой бронзы могут выступать порошки антифрикционных алюминиевых сплавов, которые обладают близкой к бронзам теплопроводностью, но существенно меньшей плотностью. В предыдущей работе [5] было показано влияние дисперсности алюминия на тонкую структуру компонентов фторопласт-алюминиевых композиционных материалов (КМ), что должно отразиться на свойствах. Одним из важных свойств антифрикционных материалов является тепловое расширение [6], поэтому целью работы являлось изучение влияния дисперсности алюминия на тепловое расширение фторопласт-алюминиевых композиционных материалов (КМ).

Методика проведения исследований

Композиционные материалы на основе Ф-4 (ГОСТ 10007–80), наполненного 10 и 30 % об. порошковым алюминием ПА-4 (ГОСТ 6058–73) дисперсностью менее 50 мкм и 100–200 мкм, получали односторонним статическим прессованием 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 прессования и до спекания КМ достигается максимальная плотность, соответствующая расчетной по правилу смеси, 2299–2390 кг/м³ при 10 % и 2308–2396 кг/м³ при 30 % алюминия. До спекания плотность КМ мало зависит от дисперсности алюминия. После спекания плотность снижается, причем больше у КМ с меньшим размером частиц алюминия – до 2134–2269 кг/м³ у КМ с размером частиц алюминия до 50 мкм и до 2265–2313 кг/м³ у КМ с наполнителем 100–200 мкм. Такое снижение плотности обусловлено образованием пористости.

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

Результаты исследований теплового расширения фторопласт-алюминиевых КМ с 10–30 % алюминия (рис. 2 и таблица), полученных СП, показали, что спекание оказывает большее влияние на вид кривой, чем размер частиц алюминия. До спекания наблюдаются более интенсивные тепловые расширения при плавлении кристаллической фазы и на 14–18 °С более высокие температуры плавления (337–340 °С), чем после спекания (320–325 °С), т. е. происходит снижение теплостойкости. Однако, дисперсность алюминия оказывает влияние на величину теплового расширения – тепловое расширение у фторопласт-алюминиевых КМ с размером частиц алюминия 100–200 мкм меньше до 7,1 % при 10 % алюминия и до 9 % при 30 % алюминия (или в 1,7 и 1,8 раз соответственно), чем у КМ с размером частиц алюминия до 50 мкм. Увеличение концентрации алюминия с 10 до 30 % приводит к уменьшению теплового расширения при размере частиц алюминия до 50 мкм на 3,5–8,1 % (в 1,5–1,7 раз) и при размере частиц алюминия 100–200 мкм на 1–3 % (в 1,20–1,25 раз) у КМ до спекания, а после спекания к увеличению теплового расширения КМ при размере частиц

алюминия до 50 мкм на 5–9 % (в 1,71–1,75 раз) и при размере частиц алюминия 100–200 мкм на 2 % (в 1,2–1,3 раза).

Полученные результаты показывают, что после СП, происходит снижение плотности КМ после спекания, связанное с образованием пористости, что свидетельствует о низком адгезионном взаимодействии между Ф-4 и алюминием. Более снижение плотности КМ с меньшим размером частиц алюминия обусловлено меньшей степенью кристалличности полимера [5], а также, возможно, с большей пористостью, вызванной большей площадью межфазной границы, на которой образуются поры при спекании.

Изменение интенсивности плавления кристаллической фазы и температуры плавления характерно для Ф-4 и связано с процессами, происходящими во фторопласте при спекании.

Увеличение теплового расширения КМ при уменьшении размера частиц алюминия может быть связано с тем, что алюминий выступает в роли макродефектов, разрыхляя полимерную матрицу, а увеличение количества частиц алюминия приводит к усилению данного эффекта. Это подтверждается данными РСА [5].

Рис. 2. Зависимость теплового расширения фторопласт-алюминиевых КМ с 10 % (а, б) и 30 % (в, г) алюминия, полученных СП до (а, в) и после спекания (б, г), от температуры: 1 – до 50 мкм; 2 – 100–200 мкм

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			
			$t_1, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_1, \%$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_2, \%$
10	<50	–	337	8,5	351	25,1
		+	322	7	337	12
	100-200	–	338	5	350	18
		+	320	6	335	10
30	<50	–	340	5	351	17
		+	325	12	334	21
	100-200	–	339	4	349	15
		+	321	8	334	12

Уменьшение теплового расширения не спеченных фторопластовых КМ при увеличении концентрации алюминия связано со смесевыми закономерностями. Повышение теплового расширения спеченных фторопластовых КМ при увеличении концентрации наполнителя, обладающего меньшим температурным коэффициентом линейного расширения, характерно для Ф-4 и в других КМ на его основе [7, 8], однако природа данной особенности наполненного Ф-4 так и не была должным образом изучена. Однако, стоит отметить, что данная закономерность проявляется только после спекания и может быть связана с процессами монолитизации матрицы, формирования надмолекулярных структур или образованием пористости. Причем, гипотезу о связи данного явления с пористостью подтверждает тот факт, что КМ с меньшим размером частиц, обладающий меньшей плотностью, а, следовательно, и большей пористостью, обладает большим тепловым расширением.

Стоит отметить, что изменение теплового расширения при увеличении концентрации алюминия более сильное у КМ с меньшим размером частиц, независимо от спекания, что говорит о более существенном влиянии более дисперсного наполнителя на полимерную матрицу.

Выводы

1. Установлено, что размер частиц алюминия не влияет на теплостойкость фторопласт-алюминиевых КМ, но уменьшение размера снижает плотность и увеличивает тепловое расширение КМ. Также уменьшение размера частиц алюминия усиливает влияние его концентрации на тепловое расширение КМ.

2. Обнаружено, что увеличение концентрации алюминия с 10 до 30 % приводит к сниже-

нию теплового расширения КМ до спекания и его увеличению после спекания, что может быть связано как с различной пористостью, так и с большим расширением монолитной матрицы.

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. Исследование характеристик металлофторопласта различных производителей для элементов авиационных конструкций / С. А. Бычков, И. Г. Лавренко, О. Ю. Нечипоренко и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – Х., 2013. – Вып. 59. – С. 343–353.
4. 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.
5. Исследование влияния дисперсности алюминия на структуру металло-фторопластовых композитов / Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, Д. В. Савин, Г. В. Агафонова, А. В. Нужнов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (225) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 38–43.
6. Семенов, А. П. Металлофторопластовые подшипники / А. П. Семенов, Ю. Э. Савинский. – М. : Машиностроение, 1976. – 192 с.
7. Дж, М. Полимерные смеси и композиты ; пер. с англ. под ред. Ю. К. Годовского / М. Дж, Л. Сперлинг. – М. : Химия. – 1979.
8. Бабаевский, П. Г. Промышленные полимерные композиционные материалы / П. Г. Бабаевский. – М. : Химия. – 1980.