

А.С. Филимонов, В.А. Тарасов, М.А. Комков,
В.А. Моисеев, М.П. Тимофеев, Н.В. Герасимов

ВЛИЯНИЕ СВЯЗУЮЩИХ НА СВОЙСТВА НОВЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР

Предложены методика экспериментальных исследований и схема испытаний цилиндрических образцов сферопластика с полимерными и органосиликатными связующими. Определены теплофизические свойства теплоизоляционных материалов, даны рекомендации по их выбору для длительной работы в условиях высоких температур.

E-mail: alexf72@mail.ru

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы, тепловые испытания, сферопластики, стеклянные микросферы, эпоксидное связующее, органосиликатное связующее, фенолформальдегидное связующее, теплопередача, теплопроводность.

В современном мире все более широкое применение получают теплоизоляционные материалы (ТИМ) на основе стеклянных микросфер. Расширение областей применения этих материалов приводит к новым условиям их эксплуатации [1]. В настоящее время все чаще используют ТИМ на основе композиции из стеклянных микросфер и эпоксидного связующего [2]. Однако такие ТИМ хорошо работают без потери прочности при температурах, не превышающих 350 °С, а их уникальные свойства, в частности низкая теплопроводность при высокой конструкционной прочности, требуют применения и при более высоких температурах. В связи с этим актуальна задача исследования свойств ТИМ на основе стеклянных микросфер с различными связующими.

Целью данной работы является оценка влияния связующих на свойства новых теплоизоляционных покрытий с использованием стеклянных микросфер.

В работе решаются следующие задачи:

- исследование изменения теплового потока на внутренних и внешних поверхностях ТИМ;
- расчет фактических значений теплопроводности ТИМ с различными связующими;
- изучение поведения ТИМ при повторном тепловом нагружении.

Описание экспериментов. Для решения сформулированных задач была разработана технологическая схема проведения экспери-

ментов (рис. 1). В целях упрощения теплофизических расчетов был выбран осесимметричный вариант схемы.

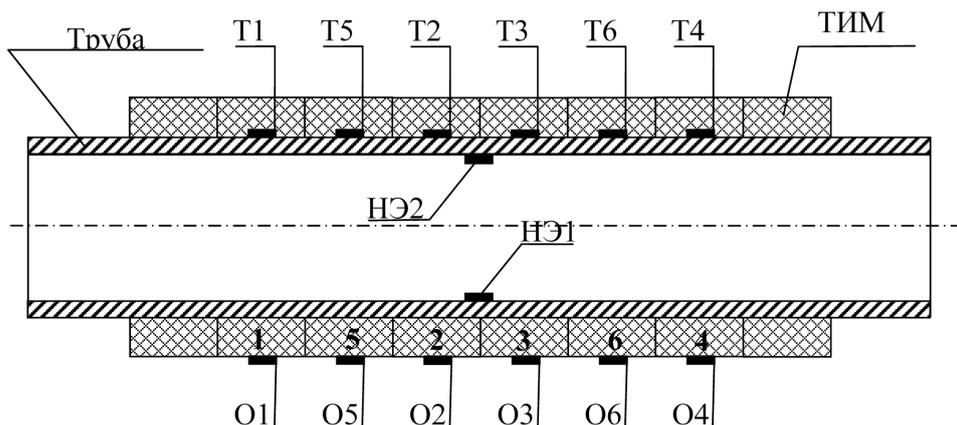


Рис. 1. Схема расположения образцов ТИМ № 1—6 и установки термомпар по длине трубы:

НЭ1, НЭ 2 — термомпары, расположенные внутри стальной трубы; Т1—Т6 — термомпары, расположенные на трубе в соответствии с номерами образцов ТИМ; О1—О6 — термомпары, расположенные на поверхностях соответствующих образцов ТИМ

При реализации осесимметричной схемы было решено испытываемые образцы ТИМ изготовить в виде колец высотой 120 мм. При этом образцы различных ТИМ надевали на одну стальную трубу, что позволило за один эксперимент исследовать и сравнить несколько ТИМ.

В целях плотного соединения колец между собой с их торцевых краев были предусмотрены тепловые замки.

Для проведения исследований были выбраны: стальная труба (длина — 800 мм, наружный диаметр — 89 мм, толщина — 3,5 мм) и кольцевые секции из ТИМ (внешний диаметр — 130 мм, толщина — 18 мм).

Экспериментальная часть работы проходила на двух основных участках: в лаборатории Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Дмитров Московской обл.), где изготовляли кольца из ТИМ на основе базальтовых волокон [3] и сферопластиков; в лаборатории кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва), где были изготовлены трубы, технологическая оснастка, приборы.

В рамках решения задачи сравнения характеристик различных ТИМ были изготовлены конструктивные элементы теплоизоляции на основе следующих композиций:

а) образцы № 1—4: стеклянные микросферы + эпоксидное связующее (рис. 2, а);

б) образец № 5: стеклянные микросферы + органосиликатное связующее (рис. 2, б);

в) образец № 6: базальтовое волокно + глинозем (рис. 2, в);

г) образец № 7: стеклянные микросферы + фенолформальдегидное связующее (рис. 2, г).



a



б



в



г

Рис. 2. Образцы ТИМ на основе следующих композиций:

a — стеклянные микросферы + эпоксидное связующее (образцы № 1—4); *б* — стеклянные микросферы + органосиликатное связующее (образец № 5); *в* — базальтовое волокно + глинозем (образец № 6); *г* — стеклянные микросферы + фенолформальдегидное связующее (образец № 7)

Для изготовления образцов ТИМ из сферопластиков использовали стеклянные микросферы марки МС-ВП-А9 по ТН 6-48-91-92 апретированные АГМ-9 по ТУ 6-02-724-74.

Кольца из сферопластика были выполнены на основе эпоксидного компаунда ЭТАЛ-245, фенолоформальдегидного связующего и органосиликатной композиции ОС-11-07 по ТУ 84-725-78 с рабочей температурой до 500 °С.

Технологическую схему испытаний выбирали согласно следующим требованиям: температурные условия работы — до 500 °С,

удобство монтажа испытательного стенда и подводки измерительной аппаратуры.

Наиболее рациональным было признано горизонтальное расположение труб (рис. 3), что обеспечивало свободную подводку измерительной аппаратуры с торцов, упрощение сборки стенда, возможность легкой смены элементов системы нагрева и измерений.

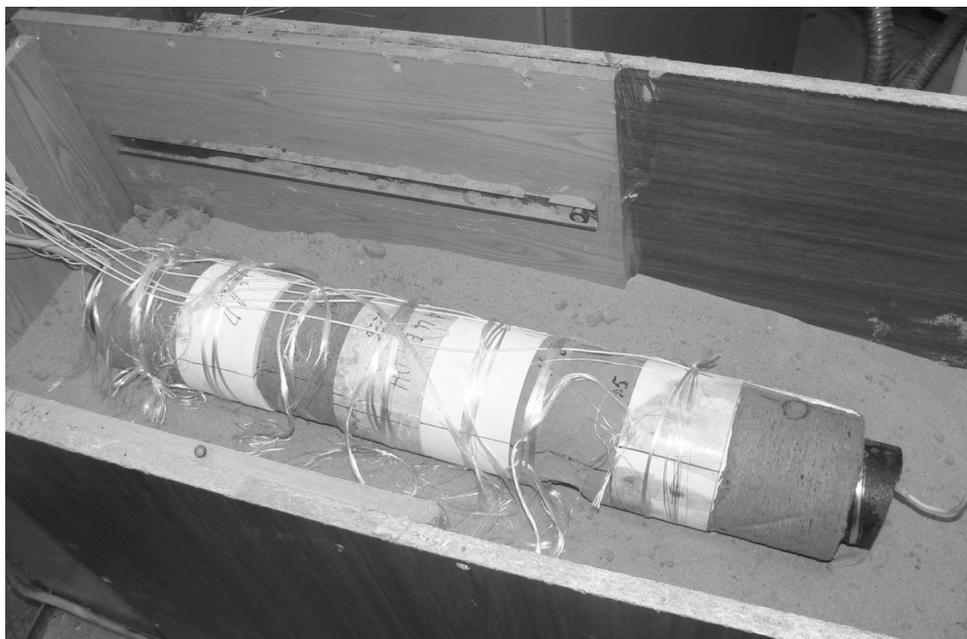


Рис. 3. Стенд для тепловых испытаний

При проведении эксперимента показания снимались с нижней поверхностей трубы и колец из ТИМ, в частности температура внутренней поверхности трубы — с нижней и верхней сторон.

Нагрев осуществлялся от теплонагревателя, засыпанного внутри трубы литейным песком. В качестве нагревательного элемента был выбран ТЭН трубчатого типа длиной, близкой к длине трубы. Он располагался по осевой линии стальной трубы. Для точного регулирования нагрева использовали два последовательно соединенных реостата.

Для наиболее точного исследования поведения различных ТИМ при тепловом нагружении проводили два испытания по разным технологическим схемам.

Схема 1 (см. рис. 1) была предназначена для сравнения характеристик ТИМ:

- 1) на основе стеклянных микросфер и эпоксидного связующего,

полученных с применением разных технологических процессов (образцы № 1—4);

2) на основе стеклянных микросфер и эпоксидного связующего (образцы № 1—4), стеклянных микросфер и органосиликатного связующего (образец № 5), базальтового волокна и глинозема (образец № 6).

Расположение образцов ТИМ было выбрано из условия минимального влияния краевого эффекта. Для этого дополнительно было теплоизолировано пространство по краям трубы с помощью колец из базальтового волокна и глинозема.

Важным этапом исследований являлось изучение поведения различных материалов при повторном тепловом нагружении. Для этих целей был поставлен эксперимент по схеме № 2 (рис. 4), при этом сравнивали характеристики ТИМ на основе стеклянных микросфер и эпоксидного связующего (образец № 1), ТИМ на основе стеклянных микросфер и органосиликатного связующего (образец № 5), ТИМ на основе базальтового волокна и глинозема (образец № 6), ТИМ на основе стеклянных микросфер и фенолформальдегидного связующего (образец № 7). Для более точного сравнения теплофизических свойств материалов было решено заизолировать термопары О1, О5, О6, О7 с внешней стороны от песка с помощью ТИМ на основе базальтового волокна, так как существует возможность передачи теплоты через песок между соседними термопарами в радиальном направлении.

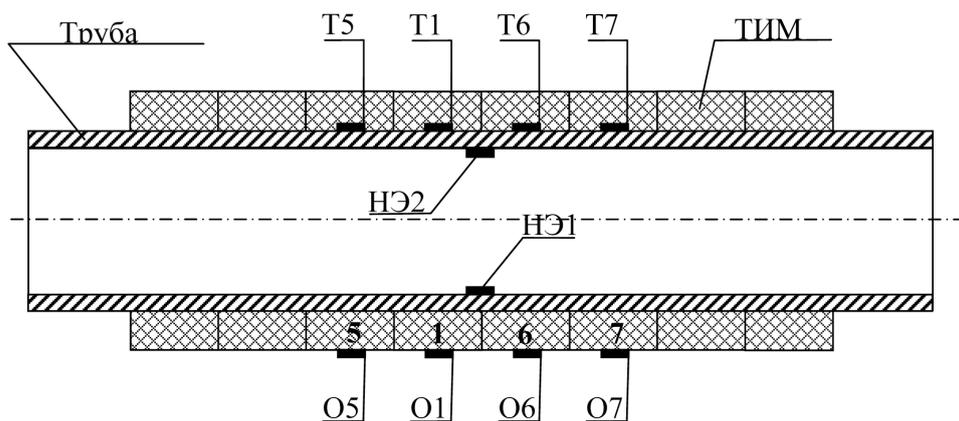


Рис. 4. Схема 2 расположения образцов ТИМ № 3, 6 и установки термопар по длине трубы

Результаты испытаний по схемам 1 и 2 приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

**Изменение показаний термопар с течением времени
в эксперименте по схеме 1**

Вре- мя, мин	Температура, °С													
	T1	O1	T2	O2	T3	O3	T4	O4	T5	O5	T6	O6	НЭ1	НЭ2
0	28	31	28	31	28	31	30	30	28	28	32	28	29	30
10	38	31	38	32	42	33	43	31	38	29	47	29	55	57
20	65	34	70	34	85	35	75	34	79	32	98	35	116	123
30	89	35	99	36	119	37	96	37	107	35	126	39	148	155
40	120	39	138	42	154	43	122	42	143	40	161	46	189	197
50	140	42	166	46	185	47	140	45	168	45	184	52	216	224
60	164	47	196	53	213	54	159	50	193	51	208	59	245	253
70	189	52	225	60	240	61	176	56	217	58	230	66	271	278
80	215	60	258	69	270	70	196	62	245	67	254	76	301	308
90	232	65	279	76	288	76	208	67	262	73	270	82	319	326
100	250	72	303	85	307	84	223	73	281	81	288	90	339	346
110	270	78	327	93	328	93	238	80	301	90	306	99	362	368
130	293	89	355	105	352	105	254	88	325	103	327	111	384	388

Таблица 2

**Изменение показаний термопар с течением времени
в эксперименте по схеме 2**

Время, мин	Температура, °С									
	T1	O1	T5	O5	T6	O6	T7	O7	НЭ1	НЭ2
0	31	24	32	30	33	25	35	30	41	53
30	58	27	53	33	66	32	60	34	78	96
45	103	36	90	42	118	49	103	45	134	153
60	159	55	139	60	178	79	159	64	195	215
80	217	84	192	87	239	115	219	92	258	277
100	260	111	232	113	283	142	264	116	303	321
115	296	133	264	136	319	166	305	140	341	359
135	326	152	292	157	351	186	336	163	371	388
155	356	176	322	184	384	215	368	189	402	414
170	362	188	329	196	391	224	374	198	408	419
185	369	198	331	207	396	231	379	205	412	423

По данным, представленным в табл. 1 и 2, определены значения теплопроводности:

$$\lambda_{\text{ТИМ}} = \frac{q}{2\pi(t_1 - t_2)} \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}},$$

где q — удельный тепловой поток, усредненное значение которого равно 145 Вт/м; $d_{\text{вн}}$, $d_{\text{нар}}$ — внутренний и наружный диаметры кольца из ТИМ; t_1 , t_2 — температуры на внутренней и внешней поверхностях колец из ТИМ.

Усредненные экспериментальные характеристики ТИМ даны в табл. 3.

Таблица 3

Усредненные экспериментальные характеристики ТИМ

Номера образцов	Теплопроводность $\lambda_{\text{ТИМ}}$, Вт/(м·К)	Плотность, г/см ³
1—4	0,037	0,43
5	0,055	0,50
6	0,04	0,25
7	0,047	0,45

Анализ данных табл. 3 показывает, что композиция образцов № 1—4 обладает более низкой теплопроводностью, более высокой прочностью, а это может оказаться существенным при многократных сборках и разборках. Однако масса теплоизоляции возрастает вдвое, а при длительном воздействии температуры около 450 °С, как показал эксперимент по схеме 2, эпоксидное связующее обугливается и в материале образуются трещины.

В результате повторного теплового нагружения выявлено, что:

1) ТИМ на основе базальтового волокна и глинозема (образец № 6) не теряет своих свойств, при этом его цвет практически не изменяется;

2) ТИМ на основе стеклянных микросфер и органосиликатного связующего (образец № 5) чернеет внутри, но его свойства при этом существенно не ухудшаются;

3) ТИМ на основе стеклянных микросфер и эпоксидного связующего (образцы № 1—4), а также ТИМ на основе стеклянных микросфер и фенолформальдегидного связующего (образец № 7) после повторных тепловых испытаний чернеют, покрываются микротрещинами, что свидетельствует о значительном снижении прочностных характеристик этих материалов.

Выводы. В результате экспериментов установлено: если в конструкции изделий необходимы высокие прочностные свойства ТИМ, то следует применять композицию стеклянные микросферы + органически-кремниевое связующее, а если прочностные свойства ТИМ не важны и при этом требуется малая масса, то рекомендуется использовать композицию на основе базальтового волокна и глинозема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В.А., Кашуба Л.А. Теоретические основы технологии ракетостроения: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 352 с.
2. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
3. Тимофеев М.П. Разработка и исследование фильтрационной технологии изготовления изделий из волокнистых неорганических материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 16 с.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012