

УДК 620.22:629.76/78

*Карпикова О. А., Гусарова И. А., Потапов А. М.*

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля.  
Украина, г. Днепропетровск

## РАЗРАБОТКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

*Рассмотрена металлическая теплозащита, представляющая собой теплозащитную систему плиточного типа, интегрируемую в общую конструкцию с помощью «U»-образных профилей. Начаты работы по разработке жаростойкого порошкового сплава на основе нихрома, способного выдерживать температуры порядка плюс 1100 °С, и внутренней волокнистой керамической теплоизоляции. Разработана технология получения прокаткой листовых заготовок из жаропрочного сплава ЮИПМ-1200, позволяющая получать листы и фольги толщиной от 20 мкм до 0,5 мм.*

Ключевые слова: космический аппарат; металлическое теплозащитное покрытие; волокнистая керамическая теплоизоляция; жаростойкие сплавы; физико-механические характеристики; диффузионная сварка.

### Введение

При создании современной техники для изучения космического пространства, необходимо создать многоразовые космические аппараты (КА) с надежной системой теплозащиты. Повысить надежность существующих теплозащитных покрытий возвращаемых орбитальных самолетов типа «Спейс Шаттл» и «Буря» позволит создание теплозащитной конструкции с наружным металлическим силовым элементом — так называемой металлической теплозащиты. Данная теплозащита способна обеспечить основные требования, предъявляемые к теплозащите многоразового аппарата. Трудности решения этой задачи связаны с обеспечением теплозащиты, прежде всего нижней наветренной поверхности возвращаемых аппаратов, где температура достигает до 1100 °С по всей ее

площади, что составляет порядка 43% поверхности аппарата. Для решения этой задачи необходимы новые материалы и технологии, которые позволят минимизировать массу теплозащиты и создать конструкцию, выдерживающую не менее 100 пусков в процессе эксплуатации.

### Основная часть

Металлическая теплозащита представляет собой теплозащитную конструкцию (ТЗК), состоящую из наружной металлической структуры из жаростойкого сплава, теплоизолирующего слоя из волокнистой керамической теплоизоляции на основе кварцевых волокон и системы крепления к силовому набору несущей обшивки КА.

Специалистами ГП «КБ «Южное» и Институтом проблем материаловедения им. И.Н. Франце-

вича НАН Украины проводятся работы по разработке жаростойкого порошкового сплава на основе нихрома, способного выдерживать температуры порядка плюс 1100 °С, который превосходит зарубежные аналоги и отечественные промышленные сплавы с идентичным химическим составом по стойкости к окислению при термоциклировании. В качестве внутренней теплоизоляции разрабатывается волокнистая керамическая теплоизоляция.

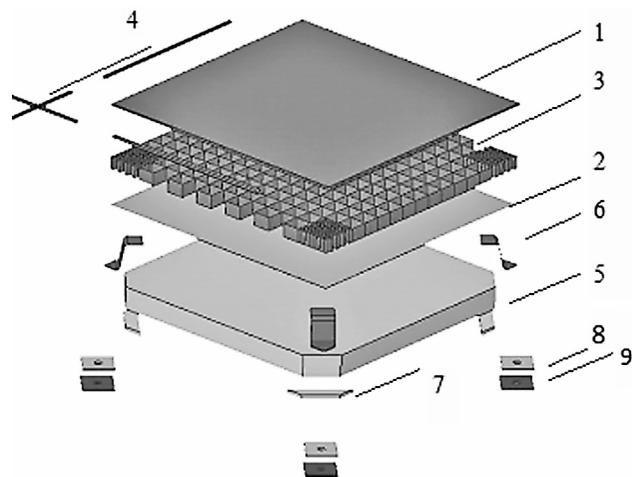
Металлическая теплозащита из жаростойкого сплава на основе Ni-Cr представляет собой теплозащитную систему плиточного типа, интегрируемую в общую конструкцию с помощью «U»-образных профилей. Каждая плитка состоит из наружной трехслойной панели с сотовым наполнителем (рис. 1).

Для изготовления наружной трехслойной панели ТЗК изготовлены:

- заготовки жаростойкого сплава на основе Ni-Cr (рис. 2) и Nb для дальнейшей прокатки (ИПМ НАН Украины) (рис. 3),

- образцы волокнистой керамической теплоизоляции на основе кварцевых волокон (НПО «Стекловолокно», г. Буча).

Механические и теплофизические характеристики жаростойкого сплава на основе Ni-Cr приведены в таблицах 1 и 2.



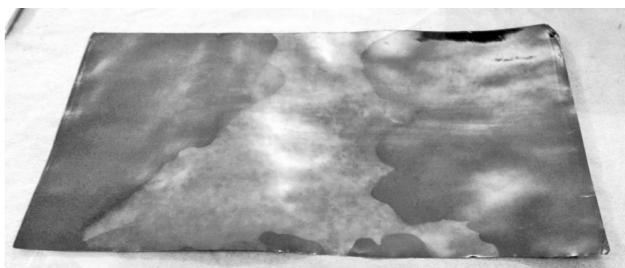
**Рис. 1.** Схема металлического теплозащитного покрытия:

1–3 – наружная металлическая структура, выполненная из жаростойкого сплава, состоящая из верхнего (поз. 1) и нижнего (поз. 2) листов и сотового наполнителя (поз. 3). На наружном листе выполнены «U»-образные выштамповки (поз. 4), 5 – теплоизоляция, 6 – «Z»-образные металлические стойки системы крепления, 7 – фетровая подложка, 8 – термомсты, 9 – демпфирующая прокладка из термостойкой резины

Для получения тонколистовых заготовок для изготовления сотового наполнителя и трехслойной панели разработана технология получения прокаткой листовых заготовок из жаропрочного сплава



**Рис. 2.** Заготовки жаростойкого сплава на основе Ni-Cr



**Рис. 3.** Прокатанные листы фольги из жаростойкого сплава на основе Ni-Cr

Таблица 1

## Механические свойства жаростойкого сплава на основе Ni-Cr

Температура испытаний, °С	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Предел пропорциональности, МПа	Модуль упругости Е, ГПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
20	738	364	356	227	36,5	34,2
800	237	228	222	121	36,7	32,6
1100	45	40	39	20	32,8	19,0

Таблица 2

## Теплофизические характеристики жаростойкого сплава на основе Ni-Cr

Температура, °С	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Удельная теплоемкость $c$ , кДж/(кг·°С)	Степень черноты поверхности
100	8300	10–13	0,44	0,80–0,85
900		28	0,60	

ЮИПМ-1200 на основе Ni-Cr (рис. 3). Определены оптимальная температура горячей прокатки сплава и температура промежуточных отжигов материала, которая составляет от плюс 1150 °С до плюс 1180 °С.

Разработанный маршрут прокатки позволяет получать листы и фольги толщиной от 20 мкм до 0,5 мм. Фольга с толщиной 20 мкм позволяет изготавливать более легкие сотовые заполнители по сравнению с результатами предыдущих работ, где минимальная толщина прокатки фольги была 50 мкм.

Для определения оптимальных параметров сварки жаропрочного Ni-Cr сплава была проведена серия экспериментов по получению соединений

при температурах 800, 900, 1000, 1100, 1200 °С. Давление сварки во всех случаях составляло  $P = 40$  МПа, время процесса  $t = 20$  минут. Сваривались образцы размером 15×15×0,05 мм. Поверхности образцов перед сваркой зачищались на наждачной бумаге до металлического блеска. Непосредственно перед сваркой поверхность образцов обезжиривалась в ацетоне.

Из полученной фольги сваривался сотовый заполнитель, а затем трехслойная панель методом диффузионной сварки со специально разработанными нанопрослойками (рис. 5).

Для снижения стоимости разработки и изготовления ТЗК проведен анализ и экспериментальная проверка возможности использования дешевой и

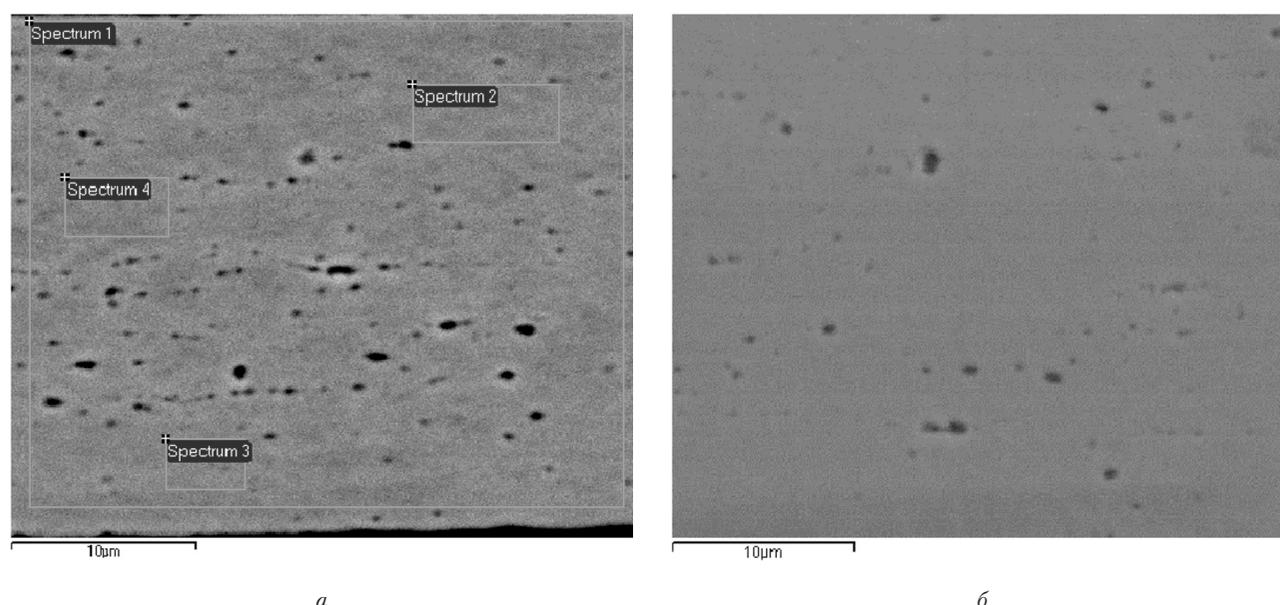


Рис. 4. Микроструктура фольги из жаропрочного Ni-Cr сплава в исходном состоянии (а) и после нагрева в вакууме (б)



Рис. 5. Образцы трехслойных конструкций из сплава на основе Ni-Cr

легкой высокоэффективной теплоизоляции коммерческого применения для многослойной ТЗК многоразовых КА.

Ни один из исследуемых образцов не обеспечил температуру на подложке плюс 200 °С в течение заданного времени. Испытания показали, что исследованные коммерческие теплоизоляционные материалы не пригодны для использования в теплозащитных конструкциях возвращаемых КА.

Недостаточные теплоизоляционные свойства коммерческой волокнистой теплоизоляции связаны со сравнительно большим диаметром волокон и наличием в материале не волокнистых включений — «королька», коротких волокон, утолщений. Диаметр муллитокремнеземистых волокон, выпускаемых предприятиями Украины, составляет от 3 до 5 мкм. Для получения теплоизоляционного материала, отвечающего заданным требованиям, необходимы керамические волокна с меньшим диаметром волокна и содержанием «корольков», утолщений, короткого волокна, не более 1%.

Работы по отработке технологии изготовления образцов волокнистой керамической теплоизоляции проводились на основе выбора связующего и типа волокна. Для экспериментов были выбраны следующие виды связующего: этилсиликатное, алюмофосфатное, кремнезоль, жидкостекольное. В качестве волокон были выбраны кварцевые, кремнеземные и МКРР-130.

После серии опытов и анализа полученных результатов было установлено, что наиболее прочные образцы получаются с использованием связующего АФС и кремнезоль. Наименьшая миграция связующего со середины на поверхность образцов осуществляется с использованием в связующем водной дисперсии ПВА, выпускаемой промышленностью в виде клея ПВА. В случае введения порошкообразного наполнителя в состав образцов их плотность резко возрастает до 200–250 кг/м<sup>3</sup>.

После отработки технологии волокнистой керамической теплоизоляции были изготовлены образ-



Рис. 6. Образцы плиток волокнистой керамической теплоизоляции

цы плиток плотностью 100 кг/м<sup>3</sup>, которые приведены на рисунке 6.

Физико-механические характеристики волокнистой керамической теплоизоляции:

- предел прочности при сжатии — 0,038 МПа;
- предел прочности при статическом изгибе — 0,092 МПа.

Теплопроводность образцов керамической теплоизоляции равна — 0,04 Вт/м·К.

### Выводы

Разработаны новые материалы и технологии, позволяющие изготовить ТЗК плотностью 10 кг/м<sup>3</sup>, состоящую из трехслойной панели из жаростойкого порошкового сплава на основе Ni-Cr и керамической волокнистой теплоизоляции.

### Литература

- [1] В.В. Мартыненко и др. «Влияние типа связующего на свойства теплоизоляционных изделий «Огнеупоры» №9, 1982. — с. 39.
- [2] Ю.А. Пирогов и др. «Комплексное связующее на основе кремнегеля «Огнеупоры» №12, 1986. — с. 16.
- [3] Е.В. Важенин и др. «Структурная гомогенизация волокнистых теплоизоляционных изделий», Огнеупоры, №5, 1989. — с. 21.
- [4] В.К. Воробьев, В.А. Черняховский «Закономерности вибропрессования огнеупорных масс на фосфатных связках», Огнеупоры, №4, 1978. — с. 22.
- [5] В.В. Астамян, П.П. Геденов «Ускорение термообработки и сушки теплоизоляционных изделий на жидком стекле», Стройматериалы, №12, 1985.

Karpikova O. O., Husarova I. O., Potapov O. M.

Yuzhnoye, State-owned Design Office named after Mikhail Yangel. Ukraine, Dnepropetrovsk

## DEVELOPMENT HEAT-SHIELDING MATERIALS FOR SPACECRAFT REUSABLE

*We consider a metal heat shield, which is a type of tile thermal protection systems, integrated into the overall design by using «U»-shaped profile. Work has begun to develop a heat resistant alloy powder on the basis of nichrome capable of withstanding temperatures of the order of 1100 °C plus, and an inner ceramic fiber insulation. The technology of rolling of the blanks superalloy ЮИИМ-1200, allowing to obtain sheets and foil thickness from 20 microns to 0.5 mm.*

*Keywords:* spacecraft; metal thermal barrier coating; fibrous ceramic insulation; heat-resistant alloys; physico-mechanical characteristics; diffusion welding.

### References

- [1] Martynenko B. et al., «Effect of binder type on the properties of thermal insulation products «Refractories» №9, 1982. — p. 39.
- [2] Pirogov Y.A. and others. «Complex-based binder of silica gel» Refractories, №12, 1986. p. 16.
- [3] Vazhenin E.V. et al., «Structure homogenizing fibrous insulation products», Refractories, №5, 1989. — p. 21.
- [4] Vorobyov V.K., Chernyakhovsky V.A. «Laws of vibrocompression refractory masses phosphate bundles», Refractories, №4, 1978. — p. 22
- [5] Astamyan V.V., Gedeonov P.P. «Accelerating the drying heat treatment and thermal insulation products for liquid glass» Building, №12, 1985.