

## ОЦЕНКА ТЕРМОСТОЙКОСТИ ТРЕХСЛОЙНОЙ СОТОВОЙ ПАНЕЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ СПЛАВА ЮИПМ-1200 СПОСОБОМ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ

И. А. ГУСАРОВА<sup>1</sup>, М. ПАРКО<sup>2</sup>, А. М. ПОТАПОВ<sup>1</sup>, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО<sup>3</sup>, Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ<sup>3</sup>,  
Т. В. МЕЛЬНИЧЕНКО<sup>3</sup>, В. Е. ФЕДОРЧУК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля».

49008, г. Днепр, ул. Криворожская, 3. E-mail: info@yuzhnoye.com

<sup>2</sup>TECNALIA. Parque Tecnológico de San Sebastián Mikeletgi Pasealekua,

2 E-20009 Donostia-San Sebastián-Gipuzkoa (Spain). E-mail: maria.parco@tecnalia.com

<sup>3</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработка систем тепловой защиты представляет собой одну из важных технических проблем, которые необходимо решить при создании многоразовых космических кораблей. Металлические системы тепловой защиты должны состоять из отдельных плиток с индивидуальным креплением к силовой конструкции космического аппарата с поверхностной плотностью не более 10 кг/м<sup>2</sup>, способных многократно выдерживать длительные полеты и обеспечивать снижение температуры от 1100 °С на внешней стенке до 200 °С на внутренней. В работе представлены результаты по созданию технологии диффузионной сварки в вакууме трехслойной сотовой панели из экспериментального порошкового сплава ЮИПМ-1200. Изготовлены технологические образцы трехслойной сотовой панели из данного сплава и проведены их испытания в рабочем диапазоне температур. Библиогр. 7, рис. 11.

*Ключевые слова:* теплозащитные системы, металлическая трехслойная панель, порошковый жаростойкий сплав, диффузионная сварка в вакууме, термоциклические испытания

Разработка теплозащитных систем с наружной металлической трехслойной панелью для многоразовых космических аппаратов ведется в США и Европе, начиная с середины XX века, однако информации об их создании для наветренной части корпуса многоразовых космических аппаратов, сохраняющих работоспособность при эксплуатационных нагрузках в течение требуемого количества пусков, пока нет [1]. Создание такой теплозащиты позволит создать надежный многоразовый космический аппарат (МКА) и снизить стоимость выведения грузов на орбиту.

В Украине (ГП «КБ «Южное») разработана съемная многослойная теплозащитная конструкция (ТЗК) с наружной металлической трехслойной панелью, состоящая из отдельных плиток с индивидуальным креплением к силовой конструкции КА плотностью не более 10 кг/м<sup>2</sup>, способная многократно выдерживать длительные полеты и обеспечивать снижение температуры от 1100 °С на внешней стенке до 200 °С на внутренней [2]. Схема ТЗК с металлической наружной трехслойной панелью с U-образным стыком и плиточной теплоизоляцией показана на рис. 1. Металлическая наружная трехслойная панель с размерами в плане 300×300 мм состоит из верхней обшивки толщиной 0,5 мм, сотового заполнителя и нижней обшивки толщиной 0,1 мм.

Для изготовления наружной металлической структуры разработан специальный порошковый

жаростойкий сплав ЮИПМ-1200 на основе Ni–Cr с требуемым уровнем излучательной способности и стойкий в окислительной среде при сверхвысоких температурах, что позволяет отказаться от применения специальных покрытий [3].

Так как разработанный жаростойкий порошковый сплав ЮИПМ-1200 на основе Ni–Cr практически не имеет аналогов, представляет интерес разработка технологии изготовления трехслойной

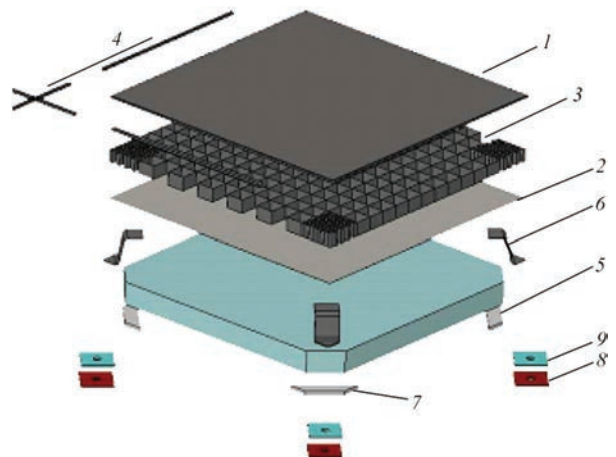


Рис. 1. Общий вид плитки ТЗК: 1 — верхняя обшивка панели; 2 — нижняя обшивка панели; 3 — сотовый наполнитель; 4 — U-образные выштамповки; 5 — теплоизоляция; 6 — Z-образные металлические стойки системы крепления; 7 — фетровая подложка; 8 — демпфирующая прокладка из термостойкой резины; 9 — термомост

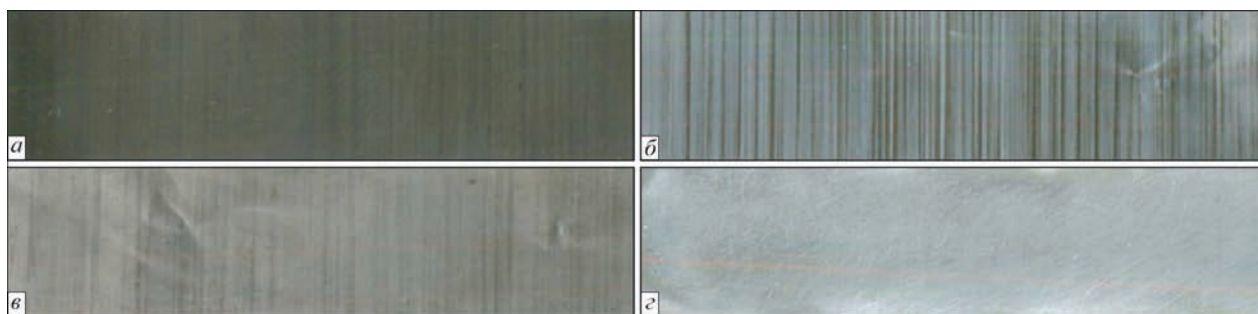


Рис. 2. Вид поверхности фольги из Ni–Cr жаропрочного сплава ЮИПМ-1200: *a* — вид фольги в исходном состоянии; *б* — химическое травление в растворе: 500 мл HNO<sub>3</sub>, 250 мл H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 10 г NaCl; *в* — химическое травление в растворе 750 мл HCl, 250 мл HNO<sub>3</sub>; *г* — механическая зачистка шлифовальной бумагой с зернистостью P1000

панели с сотовым наполнителем и изготовление ее технологического макета.

Так как существующее оборудование позволяет сваривать детали размером до 200 мм, то целью данной работы являлось изготовление технологического макета металлической трехслойной панели из сплава ЮИПМ-1200 с размерами 150×150 мм и проведение экспериментальных исследований функционирования макета ТЗК при термоциклировании в рабочем диапазоне температур.

Технологический процесс изготовления макета трехслойной панели включает следующие операции [4]:

- изготовление обшивок;
- изготовление заготовок для сотового наполнителя;
- формирование из заготовок профилированных лент;
- сварка сотового наполнителя;
- изготовление трехслойных панелей.

Изготовление обшивок и фольги для сотового наполнителя требуемых толщин проводили прокаткой по специально разработанной технологии на НПП «Рубин».

В исходном состоянии после прокатки на поверхности фольги из сплава ЮИПМ-1200 располагается плотная оксидная пленка (рис. 2, *a*). Для ее удаления рассматривали возможность применения химической или механической очистки.

Для снятия оксидной пленки с поверхности фольги применяли химические растворы: 500 мл HNO<sub>3</sub> + 50 мл H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 10 г NaCl или 750 мл HCl + 250 мл HNO<sub>3</sub> [5]. Анализ состояния поверхности фольги после химического травления показал, что полной ее очистки не происходит (рис. 2, *б*, *в*).

Механическая очистка фольги с помощью мелкозернистой наждачной бумаги P1000 позволяет получить более чистую поверхность в сравнении с обработкой в химических растворах (рис. 2, *г*). В случае зачистки фольги на наждачной бумаге удается устранить дефекты, наблюдающиеся на ее поверхности, обусловленные неровностями на поверхности валков, которые используются при ее изготовлении. На поверхности фольги отсут-

ствуют загрязнения и цвета побежалости. В дальнейшем удаление оксидной пленки с поверхности фольги проводили методом механической очистки. После очистки фольгу промывали в воде для удаления мелкодисперсных частиц пыли и сушили на воздухе в течение 20...30 мин при температуре 30...40 °С. Порезку фольги для обеспечения требуемой точности по длине образца и отсутствия надрывов, заусенцев проводили в соответствии с ГОСТ 618-73.

Для производства сотовых конструкций широкое применение нашел метод прокатки в профилированных роликах [6], позволяющий с высокой производительностью получать гофрированные полосы. В соответствии с этим для формирования профилированной ленты сотового наполнителя было спроектировано и изготовлено специальное устройство (рис. 3, *a*).

Устройство состоит из двух зубчатых колес 1 и 2 с параметрами зубьев, соответствующими размеру ячейки сот. Ведущее колесо 1 находится на одной оси с ручкой 3, приводящей устройство в движение. Вид сформированной ленты сотового наполнителя представлен на рис. 3, *б*.

Как показали исследования, фольга из сплава ЮИПМ-1200 в состоянии поставки имеет значительный наклеп, обусловленный ее прокаткой. При изготовлении полосы сотового наполнителя в местах изгиба фольги в ряде случаев происходило образование трещин, причиной появления которых является изменение свойств материала вследствие наклепа.

Известно [7], что применение термической обработки в интервале температур 0,35...0,40 от температуры плавления сплава позволяет повысить его пластичность.

Установлено, что отжиг в вакууме в течение 20...30 мин при температуре 780...800 °С является достаточным для снятия наклепа с исследуемого сплава. После данной термической обработки пластичность сплава повышается, что позволяет предотвратить образование трещин при формировании ячеек сотового наполнителя.

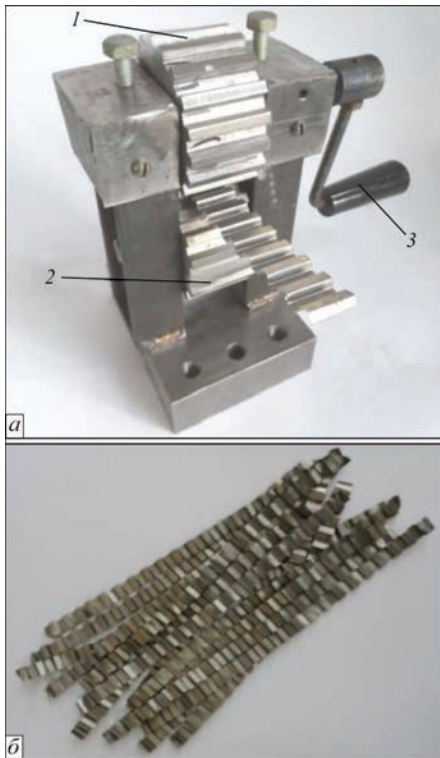


Рис. 3. Устройство для формирования ленты (а) и профилированная лента (б) (описание 1–3 см. в тексте)

Для получения сотового заполнителя из профилированных лент применяли точечную сварку (рис. 4). Поверхности профилированных лент перед их сборкой в блоки обезжировали спиртом. Ленты 1 устанавливали на электрод из графита 2, который изготавливали, исходя из габаритных размеров ячеек сот (рис. 4). После сжатия свариваемых участков металла через электрод 3 пропускали ток. Оптимальными параметрами процесса для данной толщины фольги является ток  $I = 300$  мА, напряжение  $U = 5$  В при диаметре электрода из меди диаметром 2 мм. Вид пакета сотового заполнителя размером  $150 \times 150$  мм из сплава ЮИПМ-1200 на основе Ni–Cr представлен на рис. 5.

Экспериментальным путем установлено, что наилучшие условия для сварки сплава ЮИПМ-1200 обеспечивает применение верхнего электрода из меди, а нижнего из графита, что устраняет нежелательное прихватывание поверхности фольги к электродам. После сварки проводили шлифование торцевых поверхностей сотового заполнителя.

Для соединения сотового заполнителя и обшивок в трехслойную конструкцию применяли диффузионную сварку в вакууме. Сварку проводили в специально сконструированном и изготовленном приспособлении (рис. 6). Конструктивно приспособление (оснастка) для сварки трехслойной сотовой панели состоит из нижнего, верхнего фланцев и ограничивающей втулки (рис. 6, а). Фланцы обеспечивают в процессе сварки прижатие по всей площади контакта обшивок к сотовому заполни-

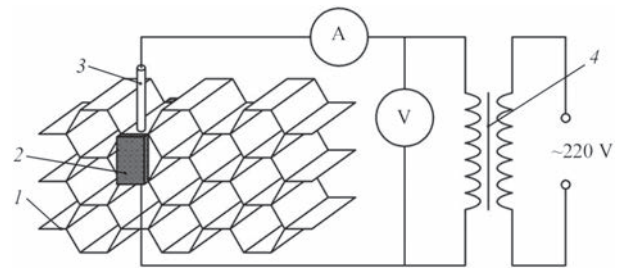


Рис. 4. Схема устройства для сварки сотового заполнителя из сплава Ni–Cr: 1 — профилированные ленты; 2 — электрод из графита; 3 — электрод из меди; 4 — трансформатор

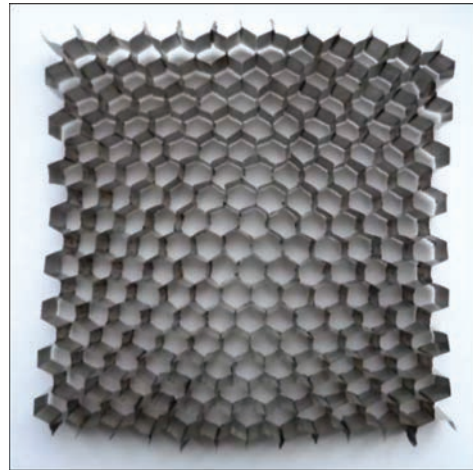


Рис. 5. Сотовый заполнитель, изготовленный из фольги сплава ЮИПМ-1200

телю, а ограничивающая втулка позволяет выровнять температурное поле в свариваемом изделии. На рис. 6, б представлен вид оснастки для сварки трехслойной сотовой панели в вакуумной камере установки диффузионной сварки.

На рис. 7 представлена схема рабочей камеры установки диффузионной сварки с размещенной в ней оснасткой. Для контроля температуры сварки предусмотрели возможность фиксации хромель-алюмелевой термопары в оснастке. Давление

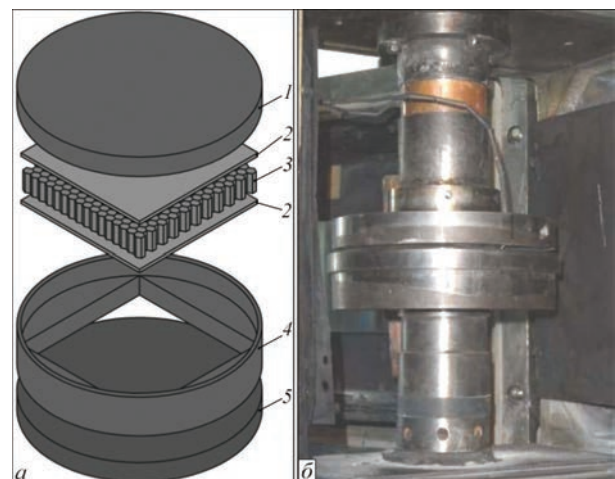


Рис. 6. Схематическое изображение оснастки для сварки трехслойных сотовых панелей (а) и рабочая камера с установленной в ней оснасткой (б): 1 — верхний фланец; 2 — обшивка; 3 — сотовый заполнитель; 4 — ограничивающая втулка; 5 — нижний фланец



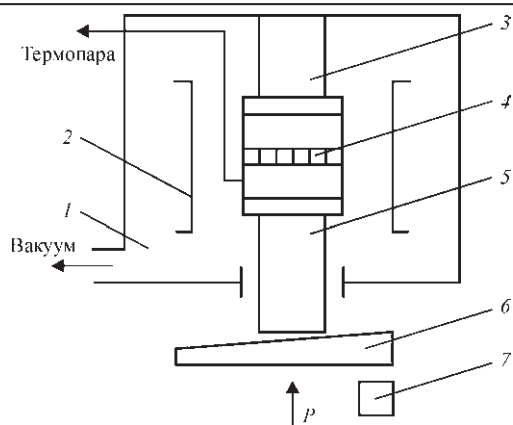


Рис. 7. Схема рабочей камеры с оснасткой: 1 — рабочая камера; 2 — нагреватель из молибдена; 3 — верхний шток; 4 — трехслойная панель, установленная в ограничивающую втулку; 5 — нижний шток; 6 — клин; 7 — пресс

к свариваемой детали прикладывали от пресса через клин 6 и нижний шток 5. Контроль величины давления осуществляли с помощью динамометра.

Нагрев оснастки с установленной в ней трехслойной сотовой панелью проводили со скоростью 25...30 °С/мин, после достижения температуры сварки к ней прикладывается давление. Выдержка при температуре сварки составляла 25...30 мин, после чего уровень приложенного давления снижали до нуля и проводили охлаждение до комнатной температуры в условиях вакуума.

Таким образом, были изготовлены технологические образцы макета трехслойной сотовой панели размером 150×150 мм, которые использовали для экспериментальных исследований. Толщина верхней обшивки трехслойной сотовой панели составляла 0,5 мм, нижней обшивки 0,1 мм, сотовый наполнитель изготовлен из фольги толщиной 0,03 мм.

Температурные режимы нагрева и охлаждения исследуемых образцов выбирали на основании теоретической температурной кривой на поверхности конструкции во время спуска МКА (рис. 8).

Максимальные рабочие температуры на поверхности трехслойной сотовой панели составляют 1100 °С. Для повышения надежности конструкций при их разработке закладывается 10 %-й запас жаростойкости. Поэтому первым этапом была отработка

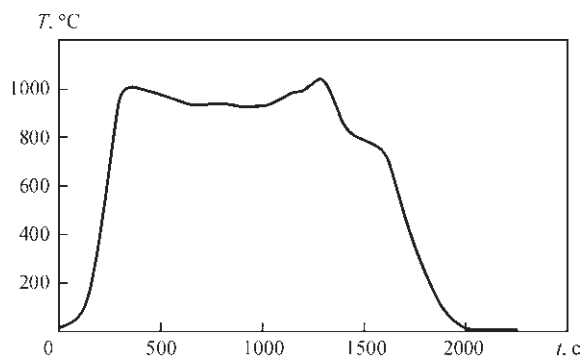


Рис. 8. Зависимость температуры на наружной поверхности ТЗК от времени

методики проведения испытаний и определение работоспособности конструкции при однократном воздействии температуры 1200 °С.

Испытания технологического образца трехслойной панели проводились с использованием лабораторной печи «СНОЛ». Перед началом испытаний печь разогревалась до температуры 1210 °С, после чего образец помещался в печь нижней обшивкой толщиной 0,1 мм вверх, верхняя обшивка толщиной 0,5 мм располагалась на нижней стенке печи. Производилась выдержка макета трехслойной панели в печи при температуре 1200 °С в течение 20 мин. Затем образец извлекался и охлаждался до температуры помещения. Время охлаждения составило 3 мин.

Внешний вид исследуемого образца до и после испытаний приведен на рис. 9. Верхняя обшивка толщиной 0,5 мм сохранила целостность. Обшивка толщиной 0,1 мм в процессе охлаждения деформировалась в местах сварки с сотами, в нескольких местах на ней образовались сквозные трещины. После полного охлаждения макета до температуры помещения обшивка толщиной 0,1 мм стала хрупкой, грани сот потеряли устойчивость и прочность в поперечном направлении.

Так как тонкослойные элементы конструкции толщиной 0,03 мм (соты) и 0,1 мм (нижняя обшивка) разрушаются при воздействии 1200 °С в течение 20 мин, термоциклирование следующего образца проводили в штатном диапазоне температур 20...1100 °С. Для моделирования штатных ус-



Рис. 9. Внешний вид трехслойной панели до (а) и после испытаний (б)



Рис. 10. Образец в теплоизоляционной ячейке: 1 — теплоизоляционная ячейка; 2 — наружная обшивка трехслойной металлической ТЗК; 3 — поддон для погружения в печь

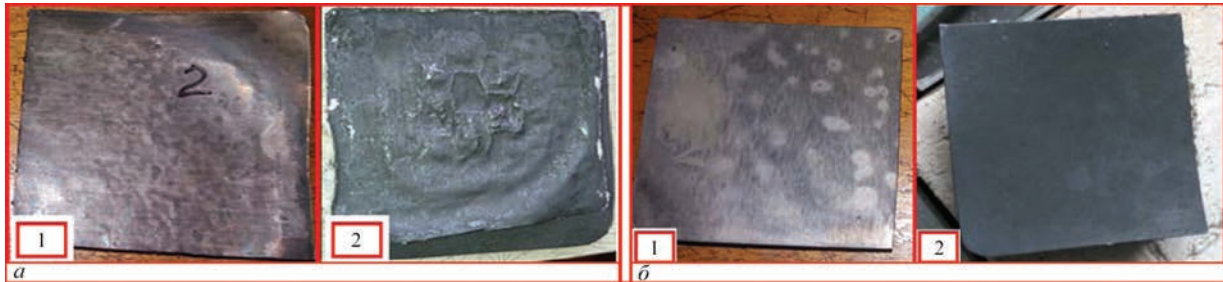


Рис. 11. Внешний вид нижней (а) и верхней (б) обшивок макета до термоциклирования (1) и после 11 термоциклов (2)

ловый эксплуатации образец помещался в специальную теплозащитную ячейку из волокнистой керамики, которая обеспечивала изоляцию торцов от воздействия прямых тепловых потоков, а также имитировала внутреннюю теплоизоляцию ТЗК, расположенную под нижней обшивкой панели (рис. 10). Количество термоциклов при испытаниях определялось целостностью конструкции при визуальном осмотре макета трехслойной наружной панели после каждого термоцикла.

Перед началом испытаний печь разогревалась до температуры 1150 °С, после чего образец помещался в печь и выдерживался в течение 20 мин при температуре 1100 °С. Образец извлекался вместе с теплоизоляционной ячейкой и охлаждался до температуры помещения (15 °С) за 11 мин, что соответствует времени охлаждения внешней поверхности летательного аппарата, полученного при теоретических расчетах (рис. 8).

После первого термоцикла на поверхности образца образовалась защитная оксидная пленка темно-серого цвета. Соты деформировались.

После проведения пятого термоцикла нижняя обшивка трехслойной металлической теплозащиты толщиной 0,1 мм деформировалась. После остывания остаточные деформации сохранились. После 11 термоцикла в месте соединения с сотовым наполнителем обнаружены сквозные дефекты по граням сот длиной 5 мм (рис. 11, а). Верхняя обшивка панели толщиной 0,5 мм осталась без видимых изменений формы и размеров (рис. 11, б).

Таким образом, термоциклирование макета трехслойной наружной панели теплозащитной конструкции из сплава ЮИПМ-1200 в рабочем диапазоне температур показали, что эле-

менты конструкции толщиной 0,5 мм сохраняют работоспособность в течение 11 термоциклов в заданном режиме. Более тонкие элементы конструкций деформируются и разрушаются после термоциклирования.

Для обеспечения нормального функционирования конструкции при штатных тепловых потоках необходимо увеличить толщину конструктивных элементов (более 0,1 мм) и скорректировать параметры сварки трехслойных конструкций.

*Работы выполнены в рамках проекта LightTPS РП7 № 607162.*

1. Tumino G. European Development and Qualification Status and Challenges in Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Transportation Concepts / G. Tumino // Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Vehicles: Proceedings of the 4th European Workshop, (Palermo, Italy, 26–29 Nov. 2002). – Paris: European Space Agency, 2003. – P. 39–43.
2. Пат. 91891 Україна, МПК В64G 1/58, В64С 1/38, В64С 3/36. Багатошарова теплозахисна система багаторазового космічного апарату / А. М. Потапов, Е. І. Шевцов, В. Г. Тихий, І. А. Гусарова, В. В. Скороход, Г. А. Фролов, В. П. Солнцев; власник Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. Н. К. Янгеля». – № 201313658; заявл. 25.11.2013; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14.
3. Пат. 108096 Україна, МПК С22С 19/05, В22F 3/16, В22F 3/12, В22F 1/00. Спосіб одержання жаростійкого сплаву на основі ніхрому / В. В. Скороход, В. П. Солнцев, Г. А. Фролов, А. М. Потапов, В. Г. Тихий, І. А. Гусарова, Ю. М. Литвиненко; власник Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – № 201211691; заявл. опубл. 09.10.2012; 27.01.2014, Бюл. № 2.
4. Bitzer T. N. Honeycomb Technology. Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing / T. N. Bitzer. – New York: Chapman & Hall, 1997. – 233 p.
5. Баранова Л. В. Металлографическое травление металлов и сплавов. Справ. изд. / Л. В. Баранова, Э. Л. Демина – М.: Металлургия, 1986. – 256 с.
6. Qiuming Zhang. Microstructural evolution and mechanical properties of a nickel-based honeycomb sandwich / Qiuming Zhang, Xiaodong He // Materials characterization. – 2009. – Vol. 60, № 3. – P. 178–182.
7. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик. – М.: Металлургия, 1978. – 567 с.

Поступила в редакцию 06.10.2016