

Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкциях фазоразделительных и фильтрующих устройств космических жидкостных ракетных двигательных установок: современное состояние и проблемы

© Л.Г. Александров¹, С.Б. Константинов¹, И.В. Платов¹,
Ю.М. Новиков², В.А. Большаков², И.С. Партола³

¹ АО «НПО Лавочкина», Химки, 141400, Россия

² ООО «ЦВТМ при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, 105005, Россия

³ АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия

Обоснована необходимость разработки пористых сетчатых материалов, которые могут успешно заменить мелкоячеистые металлические однослойные моносетки, применяемые в разных технических конструкциях. Дано описание эволюции состава пористо-сетчатых материалов в зависимости от предъявляемых к ним технических требований, среди которых особую роль играет требование к тому, чтобы способ соединения таких материалов с основной конструкцией обеспечивал надежность, герметичность, отсутствие вредного воздействия на внутреннюю структуру изделия. Показано, что оно успешно удовлетворяется при использовании комбинированного пористо-сетчатого металла (материала) с краями, подготовленными для соединения путем лазерной импульсной сварки. Приведены примеры сварных конструкций на основе комбинированных пористо-сетчатых металлов (материалов), используемых в космической, авиационной и газовой отраслях промышленности РФ. Рассмотрены проблемы, связанные с организацией специализированного их производства и даны рекомендации, которые должны способствовать их преодолению.

Ключевые слова: комбинированный пористо-сетчатый металл (материал), двигательная установка, фильтр, внутрибаковое устройство, метод изготовления, себестоимость изделия

Введение. Широкое применение металлических сеток в разных отраслях машиностроения обусловлено отработанной в течение продолжительного времени высокой технологичностью их разработки и производства. В то же время следует отметить, что при использовании металлических сеток в объектах и системах космической отрасли необходимо решить ряд технических и технологических проблем, связанных с обеспечением высокой надежности и качества комплектирующих изделий и используемых материалов.

Цель данной публикации — показать, что решить поставленные задачи можно путем создания новых проницаемых пористых материалов на основе металлических сеток, учитывая и более полно применяя их преимущества и избегая присущих им недостатков.

Развитие технологического процесса изготовления тканых металлических сеток. В космическом машиностроении успешно создают и производят конструкции на основе таких сеток с ячейками различной формы и размеров, а именно: противометеоритные защитные экраны, пористые вставки транспирационного охлаждения камер сгорания (КС) космических жидкостных ракетных двигателей (КЖРД), фазоразделители внутрибаковых устройств капиллярного типа (ВБУ КТ) в топливных баках космических жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ) многоразового включения. Большинство таких изделий имеют обеспечивающую жесткость и прочность каркасную основу, на которой крепятся отдельные сетчатые полотна или их набор, не пригодные для создания несущей конструкции. Однако наличие силовых каркасов придает устройству дополнительный вес. Кроме того, технологический процесс производства металлических тканых сеток недостаточно совершенен — в их сетчатом поле возможны отклонение размеров ячеек от номинала, а порой и появление дефектов: обрывов утка, искривления его проволок и пр. Возникают сложности и с закреплением этих сеток на каркасе с помощью пайки, сварки или склейки, что отражается на качестве мест крепления. Так, при сварке появляются прожоги сетчатого поля, при пайке — неконтролируемое растекание припоя, при склейке — низкая стойкость места приклеивания к рабочей среде или к внешним нагрузкам. Также при динамическом воздействии рабочих сред в процессе эксплуатации изменяются геометрическая форма и размеры ячеек сеток, что приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик изделий, в которых они применяются.

В результате проведения научно-исследовательских работ было найдено решение перечисленных проблем: создан КПСМ (комбинированный пористо-сетчатый материал (металл)).

В 1970-х–1980-х годах проходил первый этап его разработки, итогом которого стало появление новых пористых сетчатых металлов (ПСМ). В работе [1] «...впервые подробно освещается технология получения пористых сетчатых металлов (ПСМ)» путем сварки давлением при горячей прокатке в вакууме металлических сеток. Комплексные работы по этому направлению в целях создания фильтровальных материалов проводили в МВТУ им. Н.Э. Баумана под руководством академика А.И. Целикова.

Наиболее полно систематизированы характеристики материалов ПСМ на основе трикотажных (вязаных) и тканых сеток, а также приведены области их применения в справочнике [2]. Кроме того, в нем отражен достигнутый уровень разработок проницаемых материалов в нашей стране на тот период и представлены результаты исследований в разных ведущих научных центрах.

На втором этапе проведения работ были созданы комбинированные пористые проницаемые металлы (материалы) (КППМ), сочетающие в проницаемом поле комбинации разных металлических сеток с пористыми лентами на основе металлических порошковых материалов, а также с металлическими сетками, на которые напылены металлические порошковые материалы. Процесс изготовления КППМ из описанной комбинации металлов происходит на основе технологии получения ПСМ [2]. Однако был один недостаток, который сводил на нет все усилия по получению равномерной и стабильной проницаемой структуры в максимально широком диапазоне пористости используемых материалов — отсутствовал универсальный способ их надежного соединения между собой или с элементами конструкции.

Решением представленной проблемы стало создание комбинированных пористо-сетчатых металлов (материалов) (КПСМ), получаемых с применением базовой технологии ПСМ [3]. В работе [3] приведены главные принципы комплексной технологии изготовления КПСМ для различных проницаемых устройств, применяемых в системах, для которых требуются высочайшие надежность и безопасность. Определение «комбинированный» обусловлено тем, что в состав нового проницаемого материала входят три составляющие, в результате обработки которых получается плоская развертка изделия с заданными гидравлическими, фильтровальными и прочностными характеристиками. Одна составляющая КПСМ — функциональная, она определяет гидравлическую и фильтровальную способности материала. Другая обеспечивает прочность и защитные свойства по отношению к функциональной. Третья составляющая придает материалу способность к соединению сваркой по специально подготовленной кромке плоской развертки, как по сплошному металлу.

В настоящее время никакой другой проницаемый материал, получаемый в виде плоской развертки посредством разных техпроцессов, не имеет такого набора взаимосвязанных и взаимодополняющих функциональных свойств, которым обладают КПСМ, конструкции из которых способны работать в широких диапазонах рабочих параметров различных теплообменных процессов. Создание КПСМ фактически открыло дорогу к освоению на практике промышленного процесса производства партий нового проницаемого материала, подготовленного для соединения лазерной и другими видами сварки.

Объемная пористая структура КПСМ составлена из набора металлических сеток, которые на поверхности КПСМ могут выполнять как защитные функции, предохраняя внутренние слои материала от вредного внешнего воздействия, так и силовые, необходимые для создания прочного и жесткого каркаса готового изделия. Поэтому выбирают поверхностные сетки с крупными ячейками, что уменьшает

влияние на повышение гидравлического сопротивления проницаемой структуры. У них толщина проволок утка и основы больше, чем у функциональных сеток. Включение в состав КПСМ нескольких функциональных слоев сетки в целях обеспечения стабильности размеров ячеек пористой структуры позволяет уменьшить величину отклонения среднего размера ячейки функциональной проницаемой структуры КПСМ по сравнению со средним размером ячейки исходной функциональной металлической сетки. Параметр «средний размер пор» — $d_{п.ср}$, который определяет равномерность структуры проницаемого материала, а также в гидравлических расчетах его расходные характеристики одиночных сеток, КПСМ и ПСМ, имеет диапазон отклонения для КПСМ не более $\pm 10\%$, но, как правило, укладывается в диапазон 10% . Уменьшение диапазона отклонений размеров ячеек (среднего размера пор $d_{п.ср}$) от номинального значения с учетом жесткой внутренней структуры КПСМ, получаемой сваркой сеточных слоев между собой, позволяет стабилизировать качество КПСМ, производимого как для объема партии заготовок, так и от одной к другой партии заготовок КПСМ, что невозможно обеспечить в случае использовании набора отдельных сеток.

Применение лазерной импульсной сварки для соединения элементов конструкции из КПСМ друг с другом или с силовыми конструктивными элементами позволяет получать места соединений, равноценные по своим характеристикам со стороны как проницаемого поля, так и каркасных элементов конструкции. При этом не происходит загрязнение внутренней пористой структуры КПСМ и прожогов.

КПСМ, основанные на металлических сетках из коррозионно-стойких сталей (марок 12Х18Н10Т, 03Х18Н9Т-ВИ и близких им по составу), работают при температурах от $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кратковременно), по тонкости очистки от $1\text{...}2\text{ мкм}$ (при применении в комбинации с пористыми лентами ФНС или ПНС на основе порошковых материалов) до 1000 мкм и более, на перепадах давления от долей до сотен атмосфер. КПСМ на такой основе совместимы с большинством рабочих сред, встречающихся в космической промышленности.

Внутрибаковые устройства капиллярного типа на основе КПСМ. Для многократного запуска КЖРД в условиях действия малой гравитации наряду с разделительными устройствами в виде эластичных мешков, металлических сильфонов и диафрагм в качестве внутрибачковых устройств используют капиллярные внутрибачковые устройства. В 1990-е годы на основе КПСМ по проекту АО «НПО Лавочкина» совместно с организациями «Проект КПСМ» — «НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана» (в кооперации) был изготовлен фазоразделитель внутрибачкового устройства капиллярного типа (ВБУ КТ) для топливной системы двигательной установки (ДУ) космического

аппарата (КА) «Купон», выведенного на геостационарную орбиту в 1997 г.

Бескаркасный фазоразделитель, выполненный в виде усеченного конуса почти полностью из КПСМ, представлен на рис. 1. Высота фазоразделителя — 290 мм, большее основание имеет диаметр 122 мм, а меньшее основание — 42 мм. Пористые элементы КПСМ были соединены с конструктивными элементами фазоразделителя лазерной импульсной сваркой.

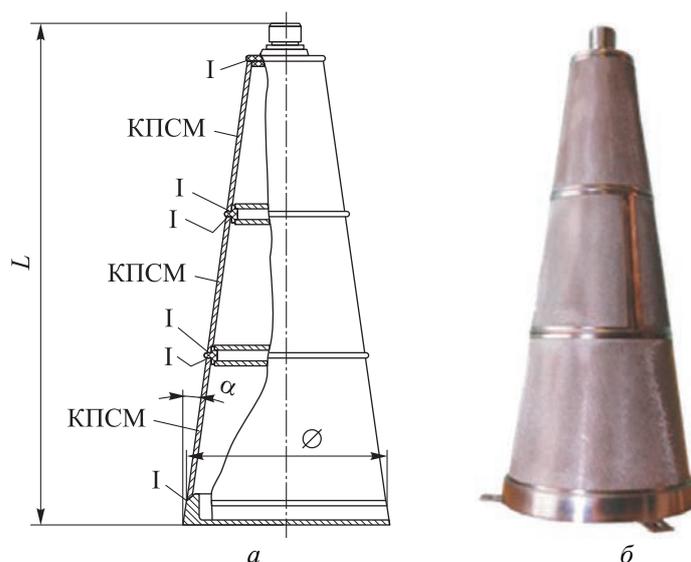


Рис. 1. Конструктивная схема (а) и общий вид (б) фазоразделителя ДУ КА «Купон» на основе КПСМ (I — места лазерной сварки)

Функциональные слои фазоразделителя набраны из мелкоячеистой коррозионностойкой тканой сетки с квадратными ячейками номинальным размером 40 мкм. Благодаря применению бескаркасной конструкции масса фазоразделителя стала меньше на 50 %, чем масса его каркасного варианта. Кроме того, применение КПСМ позволило сделать сетчатое поле сепарирующих поверхностей фазоразделителя без поверхностных дефектов в виде вмятин, выпуклостей или складок, которые характерны для сетчатых экранов из мелкоячеистых тканых сеток. Скорее всего, это стало первым использованием КПСМ (ПСМ) для систем такого назначения.

Следует отметить, что при написании фактически своего научного наследия для профильных специалистов по применению ВБУ КТ [4] д-р техн. наук В.М. Поляев, один из основоположников в нашей стране разработки и получения ПСМ, не нашел примеров применения ПСМ или КПСМ в таких устройствах ни в России, ни за рубежом. Представленным примером использования КПСМ в конструкции

отечественного фазоразделителя ВБУ КТ фактически проведена временная граница между эрой прежних разработок такого плана из моносеток (сеточных разделителей) и появлением новых разработок для устройств топливозабора из КПСМ.

В США при изготовлении сетчатых фазоразделительных экранов осуществлялось гофрирование сеток, что позволило получить бескаркасный фазоразделитель с объемной структурой пористой среды для КА «Викинг-орбитер» (1975). Способ крепления такого сепарирующего экрана к конструктивным элементам фазоразделителя, к сожалению, неизвестен, но можно предположить, что применялась пайка.

В настоящее время применение ВБУ КТ предусмотрено в фазоразделителе топливных баков ДУ КА «Луна-Ресурс-1» (ОА) (рис. 2). Функциональный набор содержит сетки из КПСМ с номинальным размером ячейки 40 мкм. Сепарирующие экраны из КПСМ соединены с элементами конструкции фазоразделителя и между собой с помощью лазерной импульсной сварки. Достигнутый технологический уровень получения КПСМ и проведения сборочно-сварочных работ с ним позволил создать топливный бак с ВБУ КТ, конструкция которого защищена патентом [5, 6].



Рис. 2. Технологический макет фазоразделителя топливных баков, изготовленного с применением КПСМ:

а — внутренний сепарирующий экран и нижняя часть внешнего сепарирующего экрана;
б — фазоразделитель в сборе со стороны верхней части внешнего сепарирующего экрана

Изготовитель КПСМ и фазоразделителя — ООО «Центр высоких технологий в машиностроении при МГТУ им. Н.Э Баумана» (ООО «ЦВТМ») в кооперации с предприятиями, входящими в неформальное объединение предприятий «Проект КПСМ».

Следующим, наиболее весомым, в том числе и в количественном отношении, примером применения КПСМ в космической технике служат конструкции фазоразделителей (ФР), из которых формируется капиллярное заборное устройство (КЗУ) торового исполнения для дополнительного топливного бака (ДТБ) разгонного блока «Бриз-М» [7].

На рис. 3 представлен комплект фазоразделителей четырех типоразмеров по диаметру и 20 типоразмеров по исполнению для комплектования КЗУ для ДТБ, показанного на рис. 4.



Рис. 3. Фазоразделители на основе КПСМ для торового КЗУ:

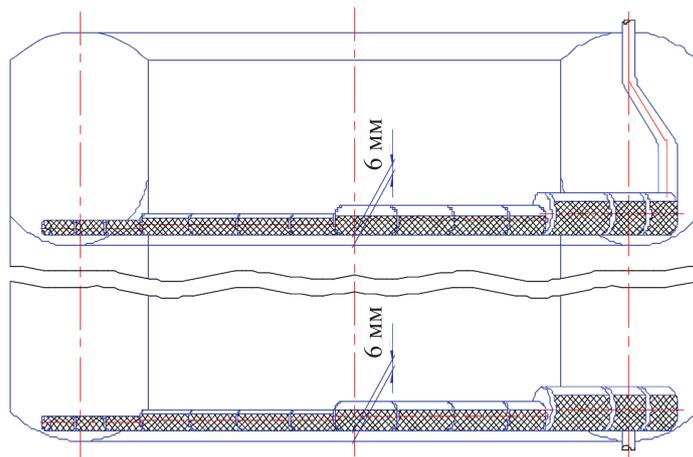
а — четыре типоразмера ФР по диаметрам и исполнению; *б* — двадцать типоразмеров ФР для одного комплекта КЗУ

Как и в случае с коническим ФР для КА «Купон», сформированное торовое КЗУ из ФР на основе КПСМ — первая и единственная длинномерная конструкция для такого применения. Положительный результат ее использования заключается в том, что происходит самозаращивание или регенерация места прорыва газовой среды через структуру КПСМ [8]. Впервые в мире продемонстрирована работоспособная длинномерная торовая конструкция внутрибакового заборного устройства из комбинированного пористо-сетчатого металла, действующая на принципиально новом, отличном от механизма забора топлива сеточными разделителями, физическом явлении — самозаращивании места прорыва газовой фазы с последующей устойчивой работой устройства вплоть до работоспособности в пульсирующем режиме. Данное КЗУ применяется в ракетно-космическом комплексе «Протон-М»/«Бриз-М» с первого (коммерческого) пуска в 2001 г.

В настоящее время поставлено 120 комплектов фазоразделителей, куда входят около 8500 штук ФР. Высочайшая, с учетом возможностей технологии получения КПСМ, равномерность структуры КПСМ обеспечивает их надежную работу. Разброс по неравномерности основного функционального структурного показателя (максимального размера пор $d_{п\ max}$), определяющего капиллярную удерживающую способность ФР и КЗУ в целом, находится в пределах $\pm 10\%$ от партии к партии материала КПСМ и в пределах (в основном) диапазона $\pm 5\%$ в партии. Установлено, что применение КЗУ из КПСМ



а



б

Рис. 4. Капиллярное заборное устройство торового исполнения на основе КПСМ в ДТБ РБ «Бриз-М»:

а — внешний вид ДТБ РБ «Бриз-М»; б — условная схема расположения КЗУ в ДТБ

обеспечивает сокращение конструктивно невырабатываемых остатков жидких компонентов топлива — АТ (азотный тетроксид) + НДМГ (несимметричный диметилгидразин) в топливных баках разгонного блока «Бриз-М» от 5 до 15 раз при отклонении вектора осевой перегрузки от продольной оси изделия в любой плоскости. Кроме того, единичные ФР или фрагменты КЗУ из КПСМ почти в 2 раза легче аналогичных элементов КЗУ, выполненных по традиционной каркасно-сетчатой схеме.

Фильтрующие устройства на основе КПСМ. В пневмогидравлических системах современных жидкостных ракетных двигательных

установок широко применяются фильтрующие устройства на основе мелкоячеистых металлических сеток и пористых лент из ПНС или ФНС. Для подобных конструкций фильтров также актуальна во многих случаях замена моносеток на КПСМ, учитывая его преимущества над моносетками.

Конические фильтры двустороннего действия приведены на рис. 5 [9]. Конический бескаркасный фильтр на основе КПСМ создан для очистки компонентов топлива (жидкого кислорода + керосина) под программу «Морской старт» (Sea Launch). Этот фильтр отличается широким эксплуатационным температурным диапазоном: от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ при установке его в узел для очистки жидкого кислорода и до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ — при размещении в узле для очистки керосина. Фильтр на основе КПСМ сеток значительно стабильнее в работе, имеет меньшую массу, более прост в эксплуатации (при контроле и монтаже), чем аналог на основе сеток, который он заменил. Заказчику и со-разработчику (на тот момент ЗАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва») поставлено 119 единиц изделий.



Рис. 5. Конические фильтры двустороннего действия из КПСМ для очистки жидкого кислорода и высококипящего компонента топлива с различными узлами соединения

В АО «НПО Лавочкина» при участии специалистов МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках кооперации «Проект КПСМ» разработана инновационная конструкция топливного фильтра на основе КПСМ (рис. 6, *а*), которая защищена патентом [10]. Его фильтроэлементы (рис. 6, *б*) выполнены в виде дисков, плоская наружная поверхность которых является фильтрующей. В фильтроэлементе в качестве функциональных слоев используется фильтровая сетка С685. Фильтроэлементы, опирающиеся на подложку из высокопористого КПСМ, собраны в фильтрующие секции, число которых в фильтре может быть различным. При эксплуатации фильтров с применением КПСМ с жесткой проницаемой структурой в наземных условиях можно осуществлять регенерацию его фильтроэлементов от загрязнений

продувкой или промывкой в направлении среды, обратном эксплуатационному. Обратная продувка (промывка) для регенерации материалов типа ПСМ, КПСМ будет эффективна при среднем размере пор от 40 мкм и выше (грубее).

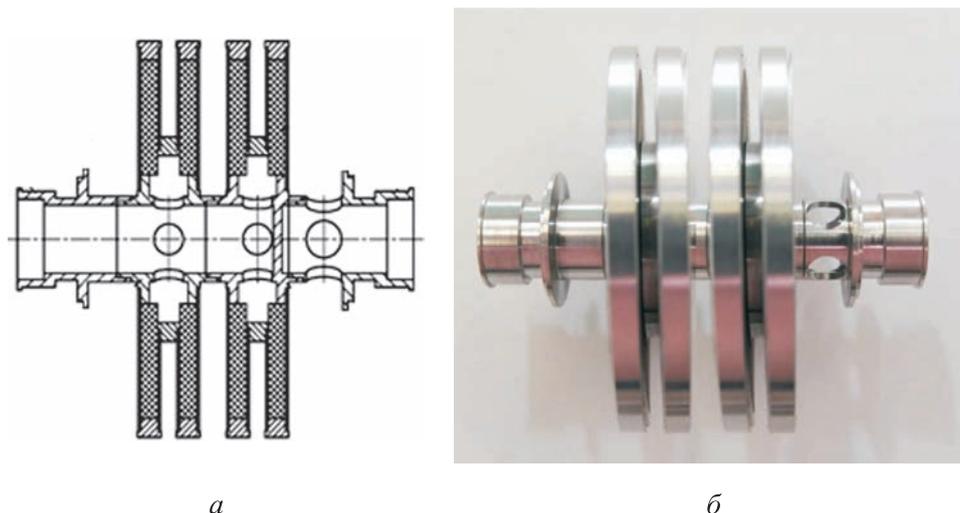


Рис. 6. Фильтр-элемент на основе КПСМ:

а — схема фильтра в сборе; *б* — фильтрующая секция из фильтроэлементов на основе КПСМ

Конструкции фильтров и их фильтроэлементов на основе КПСМ, используемых в разных отраслях промышленности и областях применения, приведены в статье [11], в том числе фильтр для газовой промышленности серии ГПФН с фильтроэлементом из КПСМ (рис. 7, б). Стойка панели управления контрольно-измерительного пункта (КИП) сухих газодинамических уплотнений (СГУ) компрессора газоперекачивающего агрегата с четырьмя фильтрами, оснащенными фильтроэлементами из КПСМ, показана на рис. 7, а. Всего поставлено по кооперации с ООО «ГИРАС» более 30 комплектов этих фильтров, получивших положительные отзывы специалистов газовой промышленности по результатам их эксплуатации в составе стоек панели управления КИП.

Надежность функционирования изделий, в составе которых используется КПСМ, напрямую связана с выполнением соединения как элементов из КПСМ друг с другом, так и элементов из КПСМ с концевыми деталями фильтроэлементов или фильтров. Разработки, посвященные этой важной задаче, представлены в работе [12]. Проведенные ООО «ЦВТМ» в кооперации с другими организациями работы в этом направлении позволили выйти на завершающий этап создания полуавтоматического сварочно-сборочного комплекса изделий, содержащих элементы из КПСМ.



a

б

Рис. 7. Применение фильтров серии ГПФН:

a — стойка КИП СГУ компрессора Н-370-14-1 с четырьмя фильтрами серии ГПФН, оснащенными фильтроэлементами из КПСМ, КЦ-2 КС «Воскресенская» ООО «Газпром Трансгаз Москва»; *б* — фильтроэлемент из КПСМ для фильтров серии ГПФН перед установкой в корпус фильтра

Современное состояние применения КПСМ в космической технике. В данной статье приведены практически все примеры использования КПСМ в космической технике, что противоречит утверждениям о широком и успешном применении конструкций на основе ПСМ или КПСМ еще с 1970-х годов. Представленные положительные результаты применения КПСМ в космической технике и реально незначительное использование КПСМ на практике требуются всесторонне проанализировать. По мнению авторов статьи, сложившая ситуация с производством КПСМ и недостаточно широким его внедрением в космическую технику обусловлена следующим:

- давлением традиционного подхода к выбору типа внутрибаковых устройств для топливных систем космических ЖРДУ многоразового включения. Давно освоены проектирование и изготовление металлических разделительных диафрагм и эластичных вытеснительных устройств. Имеется обширная положительная статистика их использования в космических ЖРДУ;

- недостаточной теоретической подготовкой инженерных кадров в области проектирования и технологии изготовления ВБУ КТ с применением КПСМ;

- ограниченной по масштабам производственной базой КПСМ, которую представляет единственный в стране цех пористого проката (ЦПП) АО «Выксунский металлургический завод»;

- частно-предпринимательским подходом к производству проницаемых материалов на «ВМЗ».

Трудно поправимый ущерб выпуску ПСМ и КПСМ был нанесен в 1990-е годы, когда в стране резко упало производство объектов, для которых создавался ЦПП. В отношении последнего обстоятельства следует отметить, что производственная база изготовления КПСМ, который не являлся основной продукцией ЦПП, поддерживалась и функционировала только благодаря совместной работе по кооперации с «Проект КПСМ» и до последнего времени удовлетворяла весь небольшой спрос предприятий РФ в материалах ПСМ и КПСМ. Цех пористого проката как участник разработки и выпуска ряда технических условий на ПСМ и КПСМ являлся гарантом производства таких материалов. Речь идет о технических условиях:

ТУ 14-1-5046–91 «Лист пористый сетчатый», ставший основой поставки партии продукции «Лист пористый сетчатый: лист 12X18N10T (ПСМ П24) на фильтроматериалы для очистки высокотемпературных газов»;

ТУ 14-1-5024–91 «Лист пористый сетчатый» на группу фильтроматериалов на номинальную тонкость очистки рабочих жидкостей до 70...135 мкм для фильтроэлементов (фильтров) с опорным каркасом;

ТУ 14-1-5019–91 «Лист комбинированный пористый сетчатый. Опытная партия» на КПСМ на номинальную тонкость очистки рабочих жидкостей до 115...135 мкм для изготовления защитных фильтров встроенного монтажа 6Ц.1000 (разработчик ММКБ «Родина») в виде цилиндров и усеченных конусов, выдерживающих повышение перепада давления до 12,0 МПа без специального каркаса;

ТУ 92-04.03.018–90 «Лист пористый сетчатый. Опытная партия» на КПСМ на номинальную тонкость очистки рабочих жидкостей до 20...25 мкм и до 2...3 мкм, при этом в плоскости листа которого могли быть особые «фольгированные зоны» для проведения сварки при изготовлении изделий, а также в составе могли находиться группы комбинированных материалов (фильтровальная никелевая сетка, никелевая лента производства АО «ВМЗ») для повышения тонкости очистки до 2...3 мкм; материал по составу мог использоваться с кислородом или другими взрывопожароопасными средами.

Все эти ТУ были основаны на фильтроматериалах, полученных сваркой давлением при горячей прокатке в вакууме.

Учитывая области применения КПСМ, задаче наращивания выпуска КПСМ-изделий должно быть уделено внимание на государственном уровне — как к организации, так и к финансированию такого производства.

Следует обратить внимание на два направления развития технологии производства КПСМ, которые должны обеспечить повышение рентабельности производства и расширение номенклатуры изготавливаемого материала: выпускать проницаемый материал в виде плоских листов разверток. При этом предприятия-потребители КПСМ-

изделий, производящих серийную продукцию, должны формировать трех-, пятилетние планы их приобретения и выделять средства на формирование задела в виде плоских листов или плоских разверток. Тогда стоимость изготовления КПСМ-изделий или не изменится на момент поставки, или даже может оказаться ниже, чем при годовом заказе.

Для соединения ПСМ между собой или с конструктивными элементами изделия следует провести исследования в области технологий сварки или соединения другими способами. Это направление совпадает с исследованиями технологии получения ПСМ путем диффузионного прессования, при применении которого введение окантовочной ленты нежелательно, так как она не позволяет организовать равномерное по площади усилие на прессуемый набор сеток при плоском пуансоне.

Следует отметить, что уже существуют определенные достижения в разработке фильтроматериалов и фильтроэлементов из металлических сеток, полученных с помощью метода диффузионной сварки прессованием. Данная технология расширяет возможности изготовления проницаемых пористых сетчатых металлов с отличными от ПСМ свойствами. Она отражена в ОСТ 92-9683-89 «Пластины пористые фильтровальные из металлических сеток полотняного плетения. Общие технические условия», сокращенно называемые пористые фильтровальные пластины (ПФП). Такая технология позволяет получать проницаемые материалы диффузионной сваркой с малым обжатием. Характеристика получаемых материалов по тонкости очистки охватывает диапазон от 63 мкм до 1000 мкм при высоких показателях по пористости (от 62 % до 84 %) и очень хорошей гидравлике. На основе применения ПФП по ТУ 92-03.05.010-90 «Фильтроэлементы сферические. Технические условия (введены впервые)» были созданы фильтроэлементы сферические (ФЭС), предназначенные для предохранения внутренних полостей пневмогидросистем от попадания инородных частиц.

Результаты опытных работ по получению КПСМ диффузионной сваркой прессованием в вакууме показали, что можно использовать невысокие удельные давления ($0,1 \text{ кг/мм}^2$), что обеспечивает получение материалов с высокой пористостью. Например, при обжатии двух одинаковых наборов сеток, каждый из которых имел исходную суммарную толщину 0,522 мм, один был подвергнут прокатке, а другой — прессованию, получились КПСМ толщиной 0,3 мм и 0,51 мм соответственно.

Создание специализированного производства ПСМ и КПСМ с высокотехнологичным оборудованием должно расширить номенклатуру типов КПСМ, снизить их стоимость, привести к росту потребления и, следовательно, повышению рентабельности производства.

Заключение. Рассмотрены этапы создания КПСМ и его применение в различных изделиях космической отрасли и не только. Комбинированный пористо-сетчатый металл (материал) по своим техническим свойствам целесообразно применять во многих отраслях народного хозяйства, чему должно способствовать создание специализированных предприятий по изготовлению КПСМ. Для широкого продвижения КПСМ в производство разнообразной продукции необходимо активизировать разработку технологии сварки пористых структур на технологических установках. Следует внедрять в производство проницаемых материалов метод диффузионной сварки пресованием, в том числе без включения в их состав присадочного материала, а также проводить систематизацию получаемых проницаемых материалов, изготавливаемых разными способами, с определением областей применения [13, 14] каждого из их типоразмеров.

Многолетний опыт отработки технологии производства новых видов проницаемых материалов [15] показал необходимость проводить их систематизацию на основе требуемых технических характеристик, таких как пористость, фильтрационные, сепарирующие свойства и т. д., а также рекомендовать области применения для каждого вида [16].

Коллектив авторов данной статьи анонсирует представление материалов, посвященных методам испытаний изделий из КПСМ с капиллярной структурой и соответствующему испытательному оборудованию.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарович В.И. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Металлургия, 1983, 64 с.
- [2] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: Справочное издание*. Москва, Металлургия, 1987, 335 с.
- [3] Новиков Ю.М., Большаков В.А. Концепция создания высоконадежных фильтров для объектов повышенной опасности. *Экология и промышленность России (ЭКиП)*, 2001, ноябрь, с. 27–31.
- [4] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М., Синцов А.Л., Сухоставец В.Ф. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов*. В.М. Поляев, ред. Москва, УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997, 328 с.
- [5] *Топливный бак и его заборное устройство*. Патент РФ № 2657137 на изобретение. Дата приоритета 19.09.2016 г.; дата опубликования 26.03.2018 г.
- [6] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Корольков А.В., Сапожников В.Б. Топливный бак с капиллярным внутрибаковым устройством космической двигательной установки. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2021, № 4 (54), с. 15–21.
- [7] Новиков Ю.М., Большаков В.А., Партола И.С. Стабильность параметров созданных из комбинированных пористых сетчатых металлов длинномерных капиллярных устройств для забора компонентов топлива. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 11 (668), с. 106–113. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2015-11-106-113>

- [8] Большаков В.А., Новиков Ю.М., Партола И.С. Средства обеспечения сплошности жидких компонентов топлива в системе питания РБ «Бриз-М» с дополнительным (сбрасываемым) топливным баком. *XXXIV научные чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского: сб. докладов*. РАН, Государственный музей истории космонавтики им. К.Э. Циолковского. Калуга, 1999, с. 78–86.
- [9] Новиков Ю.М., Большаков В.А., Гаврилов С.В., Махмудбеков И.Л., Ушаков В.В., Санин М.Л., Бессонов В.А. К вопросу разработки конических бескаркасных фильтроэлементов двустороннего действия из КПСМ под задачи по очистке топлива для изделия по программе «SEA LAUNCH». *Проблемы и технологии создания и использования космических систем и комплексов на базе малых космических аппаратов и орбитальных станций: сб. тезисов доклада Второго межведомственного научно-практического семинара*. Москва, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, 1998, с. 112.
- [10] *Фильтр*. Патент на изобретение RU № 26355802. Дата приоритета 31.05.2016 г., дата опубликования 16.11.2017 г.
- [11] Девисиллов В.А., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Комбинированные пористые сетчатые металлы и изделия из них. *Безопасность в техносфере*, 2020, т. 9, № 2, с. 43–48.
- [12] Новиков Ю.М., Александров Л.Г., Богданов А.А., Большаков В.А., Константинов С.Б., Новиков М.Ю. Проницаемые структуры на основе комбинированного пористого сетчатого металла и сварочная технология производства изделий из них для двигательных установок космических летательных аппаратов. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2021, № 1 (51), с. 44–51.
- [13] Корольков А.В., Ефремов Н.В., Сапожников В.Б., Новиков Ю.М., Большаков В.А., Александров Л.Г., Константинов С.Б., Партола И.С. Участие ФЭСТ в решении инженерных и научных задач космонавтики (к 60-летию факультета электроники и системотехники Московского государственного университета леса). *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2019, т. 23, № 4, с. 14–22. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-4-14-22>
- [14] Пелевин Ф.В. Диффузионно-вакуумная технология изготовления крупных осесимметричных узлов из металлических сетчатых материалов для теплообменных трактов. *Космическая техника и технологии*, 2021, № 4, с. 66–77. DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-4-66-77
- [15] Третьяков А.Ф. Методика проектирования технологических процессов изготовления изделий из пористых материалов с заданными свойствами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-02-1588>
- [16] Авраамов Н.И., Корольков А.В., Маслов В.А. и др. Математическая модель комбинированного пористо-сетчатого материала как фазоразделителя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 4–16. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-4-16

Статья поступила в редакцию 08.12.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Александров Л.Г., Константинов С.Б., Платов И.В., Новиков Ю.М., Большаков В.А., Партола И.С. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкциях фазоразделительных и фильтрующих устройств космических жидкостных ракетных двигательных установок: современное состояние и проблемы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-3-2259>

Александров Лев Григорьевич — канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор отдела двигательных установок АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: гидродинамика и теплообмен в энергетических установках летательных аппаратов. Автор около 30 научных публикаций. e-mail: aia@laspace.ru

Константинов Сергей Борисович — канд. техн. наук, доцент, главный специалист отдела перспективных научных исследований и разработок АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование космической техники и систем. Автор около 40 научных публикаций. e-mail: konstantinov@laspace.ru

Платов Илья Вячеславович — канд. техн. наук, инженер-конструктор отдела двигательных установок АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование, гидродинамика и теплообмен в энергетических установках летательных аппаратов. Автор около 40 научных публикаций. e-mail: aia@laspace.ru

Новиков Юрий Михайлович — канд. техн. наук, начальник комплекса ООО «ЦВТМ при МГТУ им. Н.Э. Баумана», руководитель «Проект КПСМ». Область научных интересов: проектирование, гидродинамика и теплообмен в энергетических установках летательных аппаратов. Автор около 40 научных публикаций. e-mail: jum.nov@yandex.ru

Большаков Владимир Александрович — заместитель начальника комплекса ООО «ЦВТМ при МГТУ им. Н.Э. Баумана», заместитель руководителя «Проект КПСМ». Область научных интересов: проектирование, гидродинамика и теплообмен в энергетических установках летательных аппаратов. Автор около 20 научных публикаций. e-mail: bolshakov-va@yandex.ru

Партола Игорь Станиславович — д-р техн. наук, заместитель начальника отделения ЖРД. Область научных интересов: проектирование, гидродинамика и теплообмен в ЖРД летательных аппаратов. Автор около 10 научных публикаций. e-mail: kerc@elnet.msk.ru

Use of combined porous mesh material in phase separation and filtering devices design for space liquid propellant rocket propulsion systems: current state and problems

© L.G. Alexandrov¹, S.B. Konstantinov¹, I.V. Platov¹, Yu.M. Novikov²,
V.A. Bolshakov², I.S. Partola³

¹Lavochkin Science and Production Association JSC, Khimki, 141400, Russia

²Tsentr Vysokikh Tekhnologiy v Mashinostroenii pri MGTU imeni N.E. Baumana,
Moscow, 105005, Russia

³JSC "Keldysh Research Center", Moscow, 125438, Russia

The article presents justification for the need to design and develop porous mesh materials to replace the fine-mesh metal single-layer mono-grids used in various technical structures. Evolution of the porous mesh materials composition is described depending on the technical requirements imposed. It is noted that a special role is given to the requirement to the method of connecting the porous mesh material and the main structure of a technical product in terms of reliability, tightness and absence of harmful effects on its internal structure. It is demonstrated that this requirement is successfully implemented in composition of the combined porous mesh material (metal) with edges specially prepared for using the joining method based on the laser pulse welding. Examples are provided of the use of welded structures based on combined porous mesh material in space, aviation and gas industries in the Russian Federation. Current problems of specialized production of the porous mesh materials are considered, and recommendations are provided that should assist in overcoming these.

Keywords: *combined porous mesh material, propulsion system, filter, intra-tank device, manufacture method, manufacture cost*

REFERENCES

- [1] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. *Poristye setchatye materialy* [Porous mesh materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [2] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy: Spravochnoe izdanie* [Porous permeable materials: Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 335 p.
- [3] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. Kontseptsiya sozdaniya vysokonadezhnykh filtrov dlya obyektov povyshennoy opasnosti [The concept of creating super-reliable filters for high-risk facilities]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii (EKiP) — Ecology and Industry of Russia*, 2001, November, pp. 27–31.
- [4] Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M., Sintsov A.L., Sukhostavets V.F. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Capillary systems of liquid extraction from the spacecraft tanks]. V.M. Polyayev, ed. Moscow, UNPTs "ENERGOMASH" Publ., 1997, 328 p.
- [5] *Toplivnyi bak i ego zabornoe ustroystvo* [Fuel tank and its intake device]. Patent of RF No. 2657137 for the invention. Priority date: 19.09.2016; publication date: 26.03.2018.
- [6] Alexandrov L.G., Konstantinov S.B., Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. *Toplivnyi bak s kapillyarnym vnutribakovym ustroystvom kosmicheskoy dvigatelnoy ustanovki* [Space vehicle fuel tank with propellant management device]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2021, no. 4 (54), pp. 15–21.

- [7] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A., Partola I.S. Stabilnost parametrov sozdannykh iz kombinirovannykh poristykh setchatykh metallov dlennomernykh kapillyarnykh ustroystv dlya zabora komponentov topliva [Stability of parameters of long capillary fuel intake devices made of combined porous mesh metals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2015, no. 11 (668), pp. 106–113. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2015-11-106-113>
- [8] Bolshakov V.A., Novikov Yu.M., Partola I.S. Sredstva obespecheniya sploshnosti zhidkikh komponentov topliva v sisteme pitaniya RB “Briz-M” s dopolnitelnym (sbrasyvaemym) toplivnym bakom [Means of ensuring continuity of liquid fuel components in the power supply system of the “Briz-M” US with an additional (resettable) fuel tank]. In: *XXXIV Nauchnye chteniya, posvyaschennyye razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo: sb. dokladov* [XXXIV scientific readings devoted to the development of scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky: collection of reports]. Kaluga, RAS, Tsiolkovsky State Museum of the History of Cosmonautics Publ., 1999, pp. 78–86.
- [9] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A., Gavrilov S.V., Makhmudbekov I.L., Ushakov V.V., Sanin M.L., Bessonov V.A. K voprosu razrabotki konicheskikh beskarkasnykh filtroelementov dvustoronnego deystviya pod zadachi po ochistke topliva dlya izdeliya po programme “Sea Launch” [On the development of conical frameless double-acting filter elements from CPMM for the tasks of fuel purification for the product under the “SEA LAUNCH” program]. In: *Problemy i tekhnologii sozdaniya i ispolzovaniya kosmicheskikh sistem i kompleksov na baze malykh kosmicheskikh apparatov i orbitalnykh stantsiy: sb. tezisov dokladov Vtorogo mezhvedomstvennogo nauchno-prakticheskogo seminar* [Problems and technologies of creation and use of space systems and complexes based on small spacecraft and orbital stations: collection of abstracts of the Second Interdepartmental scientific and practical seminar]. Moscow, Khrunichev SRPSC Publ., 1998, 112 p.
- [10] *Filter* [Filter]. Patent for invention RU No. 26355802. Priority date: 31.05.2016, publication date 16.11.2017.
- [11] Devisilov V.A., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. Kombinirovannyye poristyye setchatyye metally i izdeliya iz nikh [Combined porous mesh metals and products made from them]. *Bezopasnost v tekhnosfere – Safety in Technosphere*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 43–48.
- [12] Novikov Yu.M., Alexandrov L.G., Bogdanov A.A., Bolshakov V.A., Konstantinov S.B., Novikov M.Yu. Pronitsaemye struktury na osnove kombinirovannogo poristogo setchatogo metalla i svarohnaya tekhnologiya proizvodstva izdeliy iz nikh dlya dvigatelnykh ustanovok kosmicheskikh letatelnykh apparatov [Permeable structures on the basis of combined porous metal mesh and welding production technology of products made of them for space vehicle propulsion system]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2021, no. 1 (51), pp. 44–51.
- [13] Korolkov A.V., Efremov N.V., Sapozhnikov V.B., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A., Alexandrov L.G., Konstantinov S.B., Partola I.S. Uchastie FEST v reshenii inzhenernykh i nauchnykh zadach kosmonavтики (k 60-letiyu fakulteta elektroniki i sistemotekhniki Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa) [Participation of Faculty of Electronics and Systems Engineering in solving engineering and scientific issues of cosmonautics (To the 60th anniversary of the Faculty of Electronics and Systems Engineering of the Moscow State Forest University)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 14–22. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-4-14-22>

- [14] Pelevin F.V. Diffuzno-vakuumnaya tekhnologiya izgotovleniya krupnykh osesimmetrichnykh uzlov iz metallicheskiy setchatykh materialov dlia teploobmennykh traktov [Diffusion-vacuum technology of manufacturing large axisymmetric assemblies of metal mesh materials for heat exchange paths]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2021, no. 4, pp. 66–77. <https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2021-4-66-77>
- [15] Tretyakov A.F. Metodika proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya izdeliy iz poristykh materialov s zadannymi svoystvami [Design technique of manufacturing process of porous material products with desired properties]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-02-1588>
- [16] Avraamov N.I., Korolkov A.V., Maslov V.A., et al. Matematicheskaya model kombinirovannogo poristo-setchatogo materiala kak fotorazdelitelya [Mathematical simulation of using a combination of mesh and porous materials as a phase separator]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 4–16. <https://10.18698/0236-3941-2019-3-4-16>

Alexandrov L.G., Cand. Sc. (Eng.), Leading Design Engineer, Department of Propulsion Systems, Lavochkin Science and Production Association JSC; author of about 30 scientific publications. Research interests: hydrodynamics and heat transfer in aerial vehicles power plants. e-mail: aia@laspace.ru

Konstantinov S.B., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Chief Specialist, Department of Advanced Scientific Research and Development, Lavochkin Science and Production Association JSC; author of about 40 scientific publications. Research interests: design of space equipment and systems. e-mail: konstantinov@laspace.ru

Platov I.V., Cand. Sc. (Eng.), Design Engineer, Department of Propulsion Systems, Lavochkin Science and Production Association JSC; author of about 40 scientific publications. Research interests: design, hydrodynamics and heat transfer in aerial vehicles power plants. e-mail: aia@laspace.ru

Novikov Yu.M., Cand. Sc. (Eng.), Head of Complex, Tsentr Vysokih Tehnologii v Mashinostroenii pri MGTU imeni N.E. Baumana; Head of the CPMM Project; author of about 40 scientific publications. Research interests: design, hydrodynamics and heat transfer in aerial vehicles power plants. e-mail: jum.nov@yandex.ru

Bolshakov V.A., Deputy Head of Complex, Tsentr Vysokih Tehnologii v Mashinostroenii pri MGTU imeni N.E. Baumana; Deputy Head of the CPMM Project; author of about 20 scientific publications. Research interests: design, hydrodynamics and heat transfer in aerial vehicles power plants. e-mail: bolshakov-va@yandex.ru

Partola I.S., Dr. Sc. (Eng.), Deputy Head, Department of Liquid Propellant Rocket Engines, JSC “Keldysh Research Center”; author of about 10 scientific publications. Research interests: design, hydrodynamics and heat transfer in aerial vehicles LPR engines. e-mail: kerc@elnet.msk.ru