

А. А. Найден, А. С. Иванов

## ПОРИСТЫЕ ЛИТЫЕ МАТЕРИАЛЫ (ГАЗАРЫ). ВАРИАНТЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В РКТ

Газары – новый вид пористых литых материалов, которые изготавливаются на основе металлов и их сплавов, некоторых видов керамики. В основе процесса лежит газозвтектическое превращение в системе металл-водород. Процесс исследования и создания газаров был начат в 1979 году в Национальной металлургической академии Украины и в настоящий момент продолжается в таких странах, как Украина, США, Китай, Япония, Южная Корея, Польша и др. Технологический процесс производства газаров заключается в том, что заданный материал (металл, сплав, керамика) расплавляют в атмосфере водорода (или другого активного газа) при определенном давлении. После насыщения расплава активным газом до определенной концентрации начинается процесс кристаллизации, при котором запускается процесс порообразования. Поскольку рост пор происходит перпендикулярно фронту кристаллизации, то на их расположение влияет ориентация отвода тепла. Так, например, для получения радиальной пористости необходим радиальный отвод тепла. Для получения различных структур, помимо процесса направленной кристаллизации, важным фактором является давление в камере кристаллизации, от которого также зависит морфология газара. Поровая структура газаров разнообразна. Существуют газары с продольными, цилиндрическими, сферическими, коническими порами. Можно чередовать слои пористости и монолитного металла. Размеры пор газаров находятся в пределах от 10 мкм до 10 мм при общей пористости от 7 до 55 (75)%. Однако существует возможность получать поры и более меньшего диаметра. Механические свойства газаров имеют ряд преимуществ перед традиционными пористыми материалами, получаемыми различными способами. Последующая обработка газаров не отличается от обработки аналогичного непористого материала, что также является преимуществом перед традиционными пористыми материалами. А в случае, когда диаметр пор составляет менее 50 мкм, наблюдается превышение механических свойств газара в сравнении с монолитным материалом такого же химического состава. Это обусловлено тем, что поры образовались при кристаллизации, и при воздействии давления на газар происходит локальное упрочнение. В настоящий момент газары уже нашли свое применение как легкие и прочные конструкционные материалы, фильтры, теплообменники, демпферы, подшипники скольжения, катализаторы, фрикционные материалы и т.д. Использование газаров в ракетной технике поможет существенно уменьшить массу элементов конструкции ракеты-носителя без уменьшения прочностных свойств. Возможность сварки и пайки газаров позволяет найти им применение в конструкциях топливных систем, систем подачи сжатых газов, а также компонентов топлива, создавать на основе газаров фильтрующие элементы, в том числе системы распыления и смешения топлива.

**Ключевые слова:** газары, газозвтектическое превращение, звтектика, пористость.

Газари – новий вид пористих литих матеріалів, які виготовляють на основі металів та їх сплавів, деяких видів кераміки. В основі процесу лежить газозвтектичне перетворення у системі метал-водень. Процес дослідження і створення газарів було розпочато у 1979 році в Національній металургійній академії України та на цей час триває в таких країнах, як Україна, США, Китай, Японія, Південна Корея, Польща та ін. Технологічний процес виготовлення газарів полягає в тому, що заданий матеріал (метал, сплав, кераміка) розплавляють у атмосфері водню (або іншого активного газу) за певного тиску. Після насичення розплаву активним газом до необхідної концентрації починається процес кристалізації, під час якого запускається процес пороутворення. Оскільки ріст пор відбувається перпендикулярно до фронту кристалізації, то на їх розташування впливає орієнтація відведення тепла. Так, наприклад, для отримання радіальної пористості потрібно радіальне відведення тепла. Для одержання різних структур, крім процесу спрямованої кристалізації, важливим фактором є тиск у камері кристалізації, від якого також залежить морфологія газару. Порова структура газарів різноманітна. Є газари з позовжніми, циліндричними, сферичними, конічними порами. Можна чергувати шари пористості і монолітного металу. Розміри пор газарів лежать у межах від 10 мкм до 10 мм за загальної пористості від 7 до 55 (75)%. Проте можна одержувати пори і меншого діаметра. Механічні властивості газарів мають низку переваг перед традиційними пористими матеріалами, які одержують різними способами. Подальше оброблення газарів не відрізняється від оброблення аналогічного непористого матеріалу, що також є перевагою перед традиційними пористими матеріалами. А в разі, якщо діаметр пор становить менше 50 мкм, спостерігається перевищення механічних властивостей газару у порівнянні з монолітним матеріалом такого ж хімічного складу. Це зумовлено тим, що пори утворювалися під час кристалізації і під час

впливу тиску на газар, відбувається локальне зміцнення. На цей час газари вже застосовують як легкі та міцні конструкційні матеріали, фільтри, теплообмінники, демпфери, підшипники ковзання, каталізатори, фрикційні матеріали та ін. Використання газарів у ракетній техніці допоможе істотно зменшити масу елементів конструкції ракети-носія без зменшення міцнісних властивостей. Можливість зварювання та паяння газарів дозволяє застосувати їх у конструкціях паливних систем, систем подачі стиснутих газів, а також компонентів палива, створювати на основі газарів фільтрувальні елементи, у тому числі системи розпилювання та змішування палива.

**Ключові слова:** газари, газоевтектичне перетворення, евтектика, пористість.

*Gasars is a new type of porous cast materials manufactured on the basis of metals and their alloys, some types of ceramics. The basis of the process is gas-eutectic conversion in the system metal-hydrogen. The process of investigation and creation of gasars was commenced in 1979 in the National Metallurgical Academy of Ukraine and is currently continued in Ukraine, the USA, China, Japan, South Korea, Poland and others. The gasars production technological process consists in melting the specified material (metal, alloy, ceramics) in hydrogen (or other active gas) atmosphere at a certain pressure. After the melt is saturated with active gas to a certain concentration, the crystallization process begins at which the pore formation process is launched. As the pores growth occurs perpendicular to crystallization front, the orientation of heat withdrawal influences pores location. So, for example, to obtain radial porosity, radial heat withdrawal is required. To obtain various structures, along with directed crystallization process, the pressure in crystallization chamber is an important factor, which drives the gasar morphology. The porous structure of gasars is diverse, there are the gasars with longitudinal, cylindrical, spherical, conical pores. It is possible to alternate the porosity layers and monolithic metal layers. The dimensions of gasars pores are in the limits from 10  $\mu\text{m}$  to 10 mm at total porosity from 7 to 55 (75%). However, there is a possibility to obtain the pores with smaller diameter. The mechanical properties of gasars have a number of advantages as compared with conventional porous materials produced by different methods. Subsequent processing of the gasars does not differ from analogous non-porous materials, which is also an advantage over conventional porous materials. And in case when the diameter of pores is less than 50  $\mu\text{m}$ , the exceedance of mechanical properties of gasars as compared with monolithic materials of the same chemical composition is observed. This is caused by the fact that the pores were formed during crystallization and at the action of pressure on a gasar, local hardening occurs. At present, the gasars have already found application as light and strong structural materials, filters, heat exchangers, dampers, slide bearings, catalyst elements, friction materials, etc. The use of gasars in space hardware will help to considerably reduce the mass of launch vehicle structural elements without worsening strength properties. The possibility of welding and soldering the gasars allows finding their application in the structure of propellant systems, compressed gas and propellants supply systems, creating filtering elements based on the gasars, including propellant spraying and mixing systems.*

**Key words:** gasars, gas-eutectic conversion, eutectics, porosity.

## Введение

Газары – новый вид пористых литых материалов, которые изготавливаются на основе металлов и их сплавов, некоторых видов керамики. В основе процесса лежит газоевтектическое превращение в системе металл-водород (распад жидкости одновременно на твердую и газообразную фазы), имеющее место при кристаллизации металлов и сплавов, насыщенных газом до определенной концентрации.

Механические свойства газаров имеют ряд преимуществ перед традиционными пористыми материалами, получаемыми различными способами. Последующая обработка газаров не отличается от обработки аналогичного непористого материала, что также является преимуществом перед традиционными пористыми материалами.

Использование газаров в ракетной тех-

нике поможет существенно уменьшить массу элементов конструкции ракеты-носителя без уменьшения прочностных свойств. Возможность сварки и пайки газаров позволяет найти им применение в конструкциях топливных систем, систем подачи сжатых газов, а также компонентов топлива, создавать на основе газаров фильтрующие элементы, в том числе системы распыления и смешения топлива.

## Этапы технологии

Технологический процесс заключается в том, что заданный материал (металл, сплав, керамика) расплавляют в автоклаве и атмосфере водорода (или другого «активного» газа при определенном давлении). В течение заданного промежутка времени расплав насыщается водородом до необходимой концентрации.

Наиболее универсальным газом для получения газаров является водород, который можно использовать для большинства металлов. Перспективно использование газообразных углеводородов, например метана, хотя при этом будет наблюдаться насыщение материала углеродом. Кислород и комбинация водорода с кислородом (водяной пар) также могут быть использованы для получения газаров в приемлемом диапазоне давлений и массового производства газаров.

Можно использовать и азот, но он образует с некоторыми металлами химические соединения, что резко ограничивает его использование в газар-технологии. Более перспективно его использование в комбинации с водородом в виде аммиака и ему подобных соединений.

Сразу же после заливки давление в автоклаве либо сохраняют прежним, либо изменяют (увеличивают или уменьшают в зависимости от того, какую структуру и пористость надо получить) и доводят до заданного.

Если необходимо получить структуру сотового типа, состоящую из цилиндрических пор, то давление оставляют неизменным до конца кристаллизации. Если же необходимо получать более сложную структуру с изменяющимся в объеме порами (конусные поры, эллипсоидальные, сферические), то следует менять давление непосредственно при кристаллизации.

При переходе расплава, насыщенного водородом, в кристаллическое состояние растворимость в нем водорода скачкообразно уменьшается на значение, равное разности между содержанием водорода в жидкости и растворимостью его в кристаллах. Этот объем будет выделяться в виде газовых пузырьков непосредственно на фронте кристаллизации. Пузырьки растут одновременно с кристаллами, образуя сотовую или более сложную структуру. В этом и заключается принципиальное отличие этого процесса от кипения или простого выделения газа из пересыщенных жидкостей.

Кроме перечисленных выше условий, большое значение для получения необходимой структуры имеет ориентация отвода тепла от кристаллизующегося расплава. Так как образование пористой структуры идет по аналогии с эвтектической кристаллизацией,

поры всегда ориентированы перпендикулярно фронту кристаллизации. Поэтому для получения пор с радиальной ориентацией необходим радиальный отвод тепла, а для получения аксиальной ориентации пор – аксиальная ориентация теплоотвода.

### Оборудование для получения газаров

Основные типы этих устройств можно разделить по принципу разливки металла и способу плавления и кристаллизации.

По способу разливки металла в кристаллизатор: поворотные печи на 90 и 180°, стационарные со стопорным механизмом разливки, методом вытягивания из расплава, намораживанием в водоохлаждаемый кристаллизатор, непрерывная разливка в кристаллизатор.

По методу нагрева и плавления установки для получения газаров бывают индукционные, резистивные, нагрев плазмой или электрической дугой и переplавкой монолитного стержня стационарным индуктором.

Принципиальная схема лабораторной установки для получения газаров, использующая индукционный нагрев и разливку в кристаллизатор с помощью поворота корпуса на 180°, представлена на рис. 1.

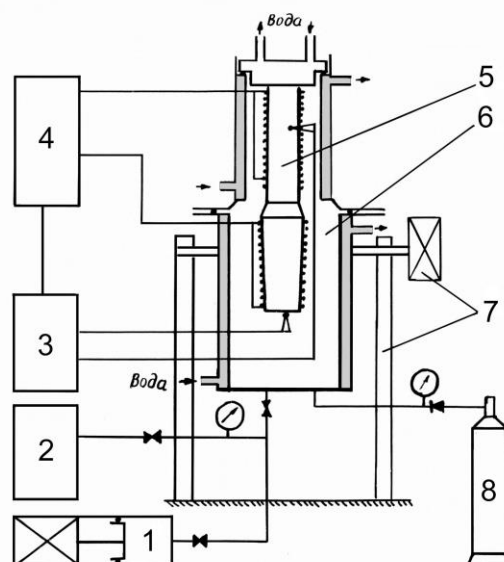


Рис. 1. Схема лабораторного устройства для получения газаров:

- 1 – система баростабилизации и бароциклирования;
- 2 – система вакуумирования;
- 3 – система контроля и регулирования температуры;
- 4 – система электропитания;
- 5 – корпус кристаллизатора;
- 6 – корпус печи;
- 7 – рама с поворотным механизмом;
- 8 – баллон с газом;



8 – система подачи газа

Все эти устройства должны гарантировать несколько главных параметров, определяющих степень пористости, форму и размеры пор:

- уровень исходного вакуума перед наполнением активным газом (водород и другие газы);
- парциальное давление активного газа в период насыщения;
- температура и время насыщения;
- температура металла перед разливкой;
- скорость и достаточно низкая турбулентность заливки металла в кристаллизатор;
- контролируемая скорость кристаллизации;
- контролируемое давление газа во время кристаллизации.

Второстепенными параметрами, но часто заметно влияющими на поровую структуру, являются:

- степень влажности и чистоты активного газа и стенок литейной формы;
- материал разливочных устройств и их покрытие.

### Структура газаров

Поровая структура газаров чрезвычайно разнообразна как по форме пор (рис. 2, 3), так и по всем другим морфологическим характеристикам:

- размер пор в диаметре от 10 мкм до 10 мм, по длине от 10 мкм до 500 мм;
- пористость от 5 до 75%;
- ориентация пор: изотропная, радиальная, параллельная, комбинированная;
- проницаемость: от полностью герметичной до полностью проницаемой;
- поверхность пор чаще всего зеркально чистая и гладкая, свободная от примесей;
- возможно получение чередующихся пористых и монолитных слоев в одном изделии;
- поверхность отливки может иметь открытые поры или полностью монолитную корочку контролируемой толщины.

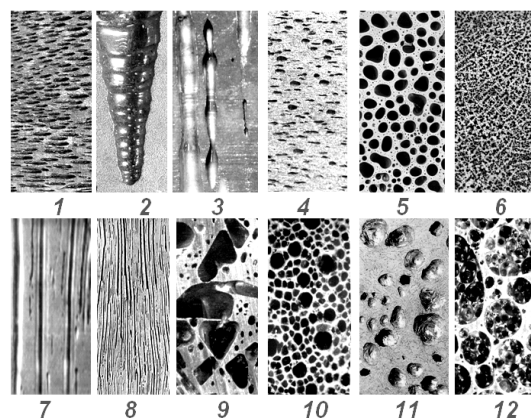


Рис. 2. Разнообразие типов структуры газаров: 1 – эллипсоидальная; 2 – коническая гофрированная; 3 – цилиндрическая гофрированная; 4 – сферическая с эллипсоидальной; 5 – неправильная глобулярная; 6 – антидендритная; 7 – цилиндрическая; 8 – волнистая цилиндрическая; 9 – алмазная; 10 – полиэдрическая; 11 – сферическая; 12 – пенообразная



Рис. 3. Возможные структуры газаров

### Свойства газаров

Поскольку структура газаров формируется из жидкого состояния и базовый материал не содержит вспенивающих добавок, резко снижающих мехсвойства, то прочность газаров намного превосходит прочность других пористых материалов, в частности спеченных [1]. Особенно поражает тот факт, что при сравнительно высокой пористости (до 30%) и размерах пор до 150 мкм, прочность газара превосходит прочность монолитного материала, полученного в аналогичных условиях. Это поразительное свойство газаров вызвало вначале недоверие в кругах материаловедов. Но после многочисленных испытаний на самом высоком уровне (Массачусетский технологический институт (США), 1995 г.) это свойство газаров было признано во всем мире. Пока этот факт не нашел глубокого теоретического объяснения.

Можно только предположить, что данное явление является следствием своеобразного макроструктурного упрочнения. Иными словами, в результате естественных процессов при кристаллизации газаров формируется арочная структура (подобная ажурной структуре мостов и башен), приводящая к оптимальному варианту распределения напряжений в макрообразце.

Исследования показали, что механические свойства газаров в 5–20 раз превосходят свойства спеченных порошковых материалов той же пористости и имеют на 20–40% большую удельную прочность. Так, например, испытания на сжатие пористого титана показали следующее: при плотности 39–43% спеченного титанового порошка его максимальная нагрузка составила 3200 кг, напряжение 410 МПа, а титановый газар с плотностью 43–46% разрушился при усилии 9500 кг и напряжении 780 МПа [1]. Причем в большом диапазоне пористости падение прочности с повышением пористости идет пропорционально. Интересным фактом является то, что при небольшом размере пор (менее 50 мкм) наблюдается заметное упрочнение материала по сравнению с монолитом, имеющим тот же химический состав [2] (рис. 4).



Рис. 4. Вид разрывных образцов до и после испытаний: монолитный (внизу), пористый (вверху)

Ударная вязкость и прочность газаров, как любого структурированного металла, сильно зависят от ориентации пор в образце (рис. 5, 6). Испытания показали, что при определенной пористости и диаметре пор магистральная трещина в образце поперек пор практически не распространяется и

разрушить его очень тяжело.



Рис. 5. Внешний вид медных газаров после испытаний на ударную вязкость



Рис. 6. Структура излома медного газара после испытаний на ударную вязкость

В январе 2014 г. учеными из КНР и Национальной металлургической академии Украины [3] были опубликованы результаты испытаний на сжатие газаров из алюминий-магниевого сплава. Испытания показали, что с увеличением содержания Mg до 35% механические свойства такого сплава резко ухудшались, и сплав становится хрупким и неподходящим для практического применения. Однако при содержании Mg от 3 до 6% сплавы и их пористые образцы имеют большую сжимающую силу, чем плотные образцы, из-за существования пор. Это дает возможность использовать их в промышленности в тех же самых условиях, что и традиционные сплавы.

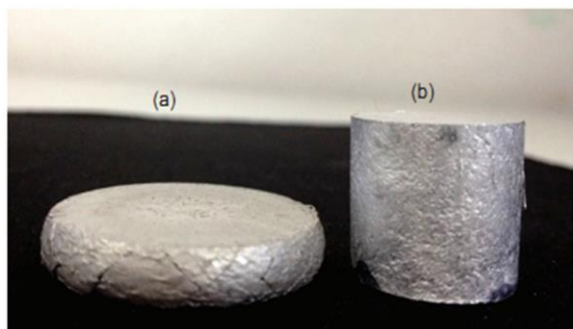


Рис. 7. Образец из сплава АМг3 после испытаний на сжатие: (а) – образец после испытаний; (б) – образец до испытаний

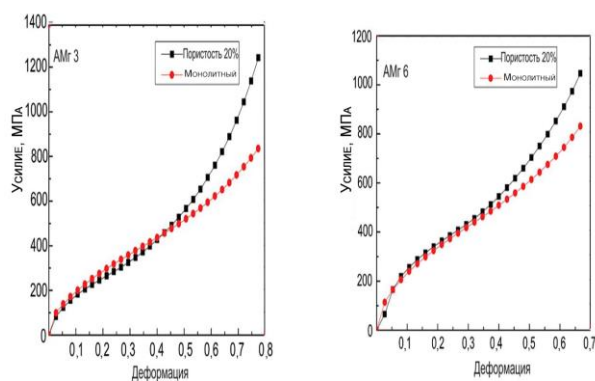


Рис. 8. Результаты испытаний на сжатие пористого и непористого образцов из сплавов АМг3 и АМг6

Исследовалась теплопроводность газов из меди по сравнению с монолитными литыми образцами [4].

Замеры проводились в два этапа на неотожженных образцах и тех же образцах после отжига при 773 К 8 ч в вакууме 5–10 Па. Образцы изготавливали из заготовок газаров, которые до этого не подвергались термической и механической обработке.

Построен график зависимости влияния пористости на относительную теплопроводность меди (рис. 9).

Полученные данные позволяют судить, что относительная теплопроводность неотожженных образцов (кривая 2) ниже по сравнению с теплопроводностью монолитного образца (кривая 1). Для отожженных образцов (кривая 3) характерно увеличение теплопроводности по сравнению с монолитом. Хорошо видно, что наибольшее повышение теплопроводности газа наблюдается в интервале пористости 40–60%. Возможно, это вызвано тем, что цилиндрические поры газа начинают работать как тепловые трубки, поскольку в них остается молекулярный водород.

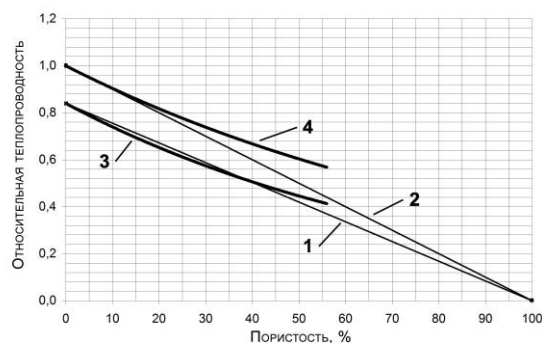


Рис. 9. Зависимость влияния пористости на относительную теплопроводность меди: 1 – теплопроводность монолитного образца с уменьшающимся сечением; 2 – отожженный монолит; 3 – относительная теплопроводность неотожженных образцов; 4 – относительная теплопроводность отожженных образцов

### Применение газаров в РКТ

Возможность регулировать форму и ориентацию пор в газарах позволяет достичь большей эффективности и равномерности распыления или смешивания жидкостей и газов в двигателях, химических реакторах, кондиционерах и т.п. Например, в жидкостных ракетных двигателях (рис. 10) для достижения как можно более полного сгорания топлива.

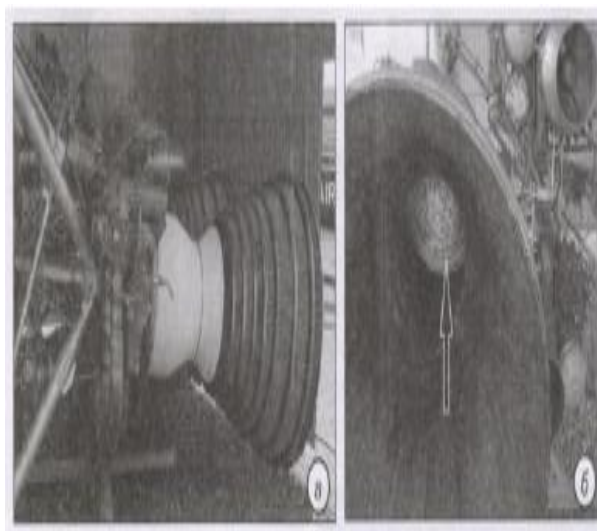


Рис. 10. Ракетный двигатель тягой 50 т (гидразин-амил): а – общий вид; б – камера сгорания и сопла изнутри, стрелкой указан распылитель-смеситель топлива и окислителя (США, Аризона, 2009 г.) [1]



Внутренние стенки камер сгорания жидкостных реактивных двигателей работают в сверхкритических температурных условиях и требуют очень интенсивного охлаждения. Если стенки камеры изготовлены из газара с радиальными порами (рис. 11), то при испарении топлива, просачивающегося сквозь поры, достигается очень высокая скорость охлаждения и около стенки камеры сгорания создается низкотемпературный газовый поток, предохраняющий двигатель от прогара [1].



Рис. 11. Экспериментальная камера сгорания ракетного двигателя (кислород-керосин) с транспирационным охлаждением внутренней стенки, выполненной из газара на основе медного сплава (радиальные поры 25-30 мкм)

Применение в конструкции ракетносителей элементов с уменьшенной массой: продольные и поперечные силовые элементы, фитинги. Использование фитингов, продольных и поперечных силовых элементов из газаров позволит в среднем сократить массу одного элемента на 10–15%.

Газары позволяют создать фильтроэлементы для газов и жидкостей, устойчивые к гидроударам и компонентам ракетного топлива (низкокипящим, высококипящим), например системы подачи сжатых газов, компонентов топлива на ступенях РН и наземного технологического оборудования. По сравнению с фильтроэлементами, изготовленными из других материалов (сетки, порошковые, перфорирован-

ные, композитные неметаллические), газары обладают более простыми технологическими свойствами в плане монтажа конструкции.

Производство облегченных тепловых трубок и теплообменников с повышенным коэффициентом теплопередачи позволяет их использовать на космических объектах (спутниках, телескопах, обитаемых станциях), получать композитные панели в демпферных устройствах, виброгасителях (конструкции спутников, обтекателей), изготавливать подшипники и узлы трения, стойкие к температурным воздействиям, имеющие большой запас прочности и сопротивление трению.

Поскольку процесс получения газаров базируется на процессах вакуумной металлургии, использование модульного принципа построения установки позволит производить замену модулей, что даст возможность использовать оборудование и в других процессах, связанных с вакуумной техникой (нанесение покрытий, получение порошков, дегазация металлов, получение чистых и сверхчистых сплавов и т.д.).

Также при накоплении достаточного технологического опыта и знаний можно экспортировать готовые изделия и технологию.

### Заключение

Процесс производства газаров управляем, позволяет формировать монолитно-пористые изделия как на поверхности, так и в середине образца. Поры могут иметь форму шаров, цилиндров, ломаных разветвленных каналов (некоторые сплавы), а сам материал легко обрабатывается механически и хорошо сваривается. Открытые и сквозные поры формируются дополнительной обработкой поверхности заготовки травлением или электроискровым способом.

Механические характеристики газаров обладают рядом преимуществ в сравнении с традиционными материалами.

При использовании газаров при производстве РН можно снизить массу конструкции, а также стоимость выведения килограмма полезного груза.

Использование предлагаемой технологии в РКТ может рассматриваться для узлов, работающих на сжатие или в качестве фильтров и виброгасителей. Для рассмотрения вариантов использования необходимы дополнительные экспериментальные данные по физико-механическим характеристикам газаров в сравнении со сплошными материалами или аналогичными пористой структуры.

#### **Список использованной литературы**

1. Шаповалов В. И. Легирование водородом. – Д.: Журфонд, 2013. – 385 с.

2. Shapovalov V. TERMES 2006 // International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, July 4–8, 2006, Vancouver, Canada. – P. 529.

3. Komissarchuk Olga, Xu Zhengbin, Hao Hai, Zhang Xinglu, Karpov V. Pore structure and mechanical properties of directionally solidified porous aluminum alloys // Research & Development. – Vol. 11, No.1, January 2014.

4. Карпов В. В., Карпов В. Ю. Влияние пористости на теплопроводность газаров // Теория и практика металлургии. – 2003. – № 4.

Статья поступила 23.01.2019