

УДК 669.018

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОАРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

ТРОФИМЕНКО В. В.<sup>1</sup>, к. т. н., доц.,  
ТРОФИМЕНКО А. В.<sup>2\*</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38(056)7535829, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2\*</sup> Кафедра двигателестроения, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, Днепро, 49107, Украина, тел. +38(056)3749841, e-mail: [antrof2005@gmail.com](mailto:antrof2005@gmail.com), ORCID ID 0000-0001-5312-9658

**Аннотация. Постановка задачи.** Проблема преобразования лучистой энергии (например, Солнца) в электрическую или тепловую связана, в первую очередь, с необходимостью применения новых материалов с высокой теплопроводностью и эффективностью поглощения световых лучей. Поглощательная способность традиционных материалов может быть повышена только специальной окраской (чернением). Однако чернение заметно снижает теплопроводность и не дает стабильных характеристик из-за изменения цвета покрытия или его разрушения. Применение металлов и сплавов, имеющих сотовую структуру, позволяет резко увеличить удельную площадь поверхности конструкции и способствует более глубокому проникновению лучей в объем материала. **Цель работы:** выяснение особенностей поглощения и испускания лучистой энергии газоармированным металлом с сотовой структурой при ориентации пор перпендикулярно поверхности образца. **Результаты.** Установлено, что материал с аксиально-цилиндрической пористостью интенсифицирует поглощение излучения, приближаясь по характеру процесса поглощения к абсолютно черному телу. С прекращением действия светового излучения пористый образец охлаждается в 2–3 раза быстрее монолитного, т. е. сотовая структура имеет большую площадь свободной поверхности, способной излучать поглощенную ранее энергию. Показано, что окружающая среда (вакуум, водород) существенно влияют на поглощательную способность анизотропно-пористых металлов и сплавов. **Научная новизна.** Обнаружены аномальные теплофизические свойства в газоармированных материалах с сотовой структурой на образцах структурно-анизотропных пористых металлов и сплавов. **Практическая значимость.** Сотовая структура и высокая теплопроводность в направлении ориентации пор могут сделать газары конкурентноспособными при изготовлении поглотителей солнечной энергии как на Земле, так и в Космосе. Обладая развитой поверхностью, газары очень быстро отдают и принимают тепло при контакте с жидкостями и газами. Поэтому их использование в теплообменниках резко уменьшит металлоемкость и повысит тепловую эффективность энергетических устройств.

*Ключевые слова:* водород; газоармированный сплав; сотовая структура; поглощение; излучение; лучистая энергия

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ І ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОАРМОВАНИХ МЕТАЛІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСТРОЯХ

ТРОФИМЕНКО В. В.<sup>1</sup>, к. т. н., доц.,  
ТРОФИМЕНКО А. В.<sup>2\*</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра металознавства, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(056)7535829, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2\*</sup> Кафедра двигунобудування, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38(056)3749841, e-mail: [antrof2005@gmail.com](mailto:antrof2005@gmail.com), ORCID ID : 0000-0001-5312-9658

**Анотація. Постановка проблеми.** Проблема перетворення енергії випромінювання (наприклад, Сонця) на електричну або теплову пов'язана, в першу чергу, з необхідністю використання нових матеріалів із високою теплопровідністю і ефективністю поглинання світлових променів. Поглинальна здатність традиційних матеріалів може бути підвищена тільки спеціальним фарбуванням (чорнінням). Однак чорніння зменшує теплопровідність і не дає стабільних характеристик через зміни кольору покриття або його руйнування. Використання металів і сплавів із сотовою структурою дозволяє різко збільшити питому площину поверхні конструкції і сприяє більш глибокому занурюванню променів в об'єм матеріалу. **Мета роботи:** з'ясування особливостей поглинання і випромінювання променевої енергії газоармованим металом із сотовою структурою за орієнтування пор перпендикулярно поверхні зразка. **Результати.** Встановлено, що матеріал з аксіально-циліндричною пористістю інтенсифікує поглинання випромінювання, наближаючись за характером процесу поглинання до абсолютно чорного тіла. З припиненням дії випромінювання пористий зразок охолоджується у 2...3 рази швидше, ніж монолітний, завдяки сотовій структурі, яка має більшу ступінь чорноти, за рахунок чого випромінює більше енергії. Показано, що навколишнє середовище (вакуум, водень) суттєво впливає на поглинальну здатність анизотропно-пористих металів і сплавів. **Наукова новизна.** Виявлено аномальні теплофізичні властивості в газоармованих матеріалах із сотовою структурою на зразках структурно-анізотропних металів і сплавів. **Практична значимість.** Сотова структура і

висока теплопровідність у напрямку орієнтації пор можуть зробити газари конкурентоздатними для виготовлення поглиначів сонячної енергії як на Землі, так і в Космосі. Маючи розвинуту поверхню, газари дуже швидко віддають і приймають тепло під час контакту з рідинами і газами. Тому їх використання в теплообмінниках різко зменшить металоємність і підвищить теплову ефективність енергетичних пристроїв.

*Ключові слова:* водень; газозармований сплав; сотова структура; поглинання; випромінювання; промениста енергія

## FEATURES OF STRUCTURE AND USE INCLUDE GAS METALS IN POWER DEVICES

TROFYMENKO V.V.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
TROFYMENKO A.V.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1</sup> Chairs of Materials Technology, State Higher Educational Institution «Ukrainian State Chemical-Technological University», Gagarin's av., 8, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 7535829, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2\*</sup> Chair Engine Building. Dniprovskiy National University named by O. Gonchar, Gagarin's av., 72. Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 3749841, e-mail: [antrof2005@gmail.com](mailto:antrof2005@gmail.com), ORCID ID 0000-0001-5312-9658

**Abstract. Problem statement.** The problem transformation of radiant energy (for example, solar) in the electric or thermal is connected, first of all, with necessity application of new materials with high heat conductivity and efficiency of absorption light beams. The absorption ability of traditional materials can be raised only special a black paint covering. However the black paint considerably reduces heat conductivity and does not give stable characteristics because change a color covering or its destruction. Application of metals and the alloys having cellular structure, allows to increase sharply the specific area of a surface a design and deeper penetration of beams into material volume. **The work purpose:** finding-out of features absorption and emission of radiant energy include gas metal with cellular structure at orientation a time perpendicularly surface of the sample. **Results.** It is established that the material with axial-cylindrical porosity intensifies radiation absorption, coming nearer on character process of absorption to absolutely black body. With cancellation of light radiation the porous sample is cooled in 2...3 times faster monolithic since the cellular structure has the big area of the free surface, capable to radiate the energy absorbed earlier. It is shown that environment (the vacuum, hydrogen) make essential impact on absorption ability of anisotropic-porous metals and alloys. **Scientific novelty.** Are found out abnormal the heat physical properties of include gas materials with cellular structure on samples of structurally-anisotropic porous metals and alloys. **Practical importance.** The cellular structure and high heat conductivity in a direction orientation of a time can make a gazars competitive at manufacturing absorbers of solar energy both on the Earth, and in space. Possessing the developed surface, gazars very quickly give and accept heat at contact to liquids and gases. Therefore their use in heat exchangers will sharply reduce metal consumption and will raise thermal efficiency of power devices.

*Keywords:* hydrogen; include gas alloy; cellular structure; absorption; radiation, radiant energy

### Введение

В определенных эксплуатационных условиях весьма привлекательным является использование пористых композиций, образованных объемным сочетанием газовых пор и металлической матрицы. Практически широко используются и в литературе подробно описаны структуры и свойства многих видов пористых композиционных материалов [1]. Разработаны различные модельные представления для оценки свойств пористых сред [2]. Обозначен ряд параметров, совокупность которых дает полное представление о свойствах пористого материала [3].

Однако существующие методы производства подобных материалов пока остаются весьма дорогостоящими и трудоемкими, а сами материалы не в полной мере отвечают требованиям конструкторов. Газоармирование является одним из новых и эффективных методов создания контролируемой пористости [4]. Он заключается в расплавлении металлов или сплавов в атмосфере водорода с последующей кристаллизацией и осуществлением так называемого газозвтектического превращения (распад жидкости одновременно на

твердую и газообразную фазы). Термодинамическим фундаментом газозвтектических реакций является особый тип диаграммы состояния металл – газ, открытый К. П. Буниным с соавторами при исследовании системы железо – водород [5; 6] и используемый как научная основа для получения литых пористых материалов с управляемой структурой.

При ведении направленной кристаллизации поры приобретают вытянутую в направлении отвода тепла форму, создавая газозармированный материал с анизотропными свойствами. Классический вариант структуры газаров при направленной кристаллизации – это вытянутые эллипсоидальные поры, ориентированные в направлении кристаллизации.

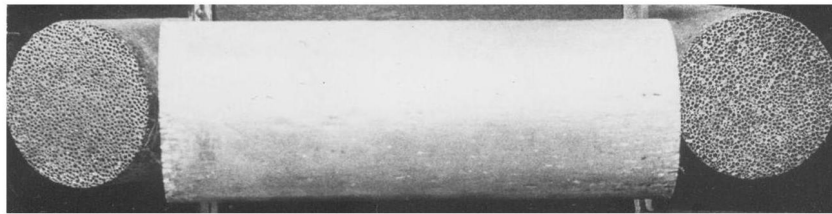
Кроме того, в зависимости от параметров процесса можно получать сферические, эллипсоидальные и цилиндрические поры диаметром от 5 микрон до 10 мм [1]. Кроме того, осуществлена возможность получения в одной отливке чередующихся слоев с различной (заданной) пористостью и пористо-монолитных структур. Такое строение газаров делает их универсальными в плане гидро-, газо- и светопрозрачности [7]. Материалы, полученные таким способом, обладают рядом

уникальних свойств, обусловленных как варьированием в широких пределах структурой порового пространства, так и наличием в порах газообразного водорода, обладающего аномально высокой подвижностью в металлах, особенно при низких температурах. Это дало повод использовать их в энергопередающих и энергоаккумулирующих системах [7; 8].

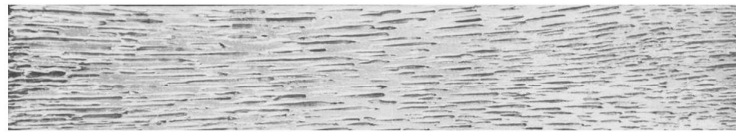
В теплообменных аппаратах, в частности, в солнечном воздушонагревателе, рабочая поверхность поглотителя выполнена в виде капиллярной структуры с тупиковыми порами из газоармированного металла [9]. Капиллярная структура поглотителя интенсифицирует как поглощение излучения, приближая поглотитель по характеру процесса поглощения к абсолютно

черному телу, так и теплоотдачу воздушного потока за счет его турбулизации. Это повышает КПД воздушонагревателя. Поэтому задача определения наиболее рациональных геометрических параметров (диаметра и длины капилляра) является актуальной и необходимой в применении газоармированного металла для теплообменников.

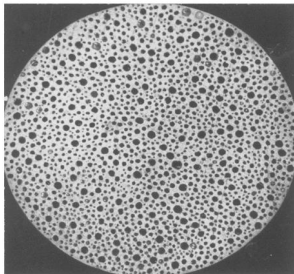
В холодильниках-излучателях космических энергоустановок задача создания поверхности излучателя со степенью излучательной способности, близкой к абсолютно черному телу, также является важной. Существующие методы чернящего покрытия не решают этой задачи, так как анодирование и плазменное покрытие поверхности излучателя со временем разрушаются.



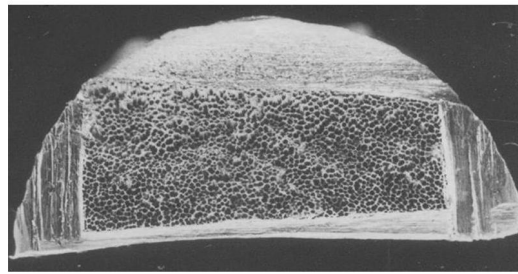
а



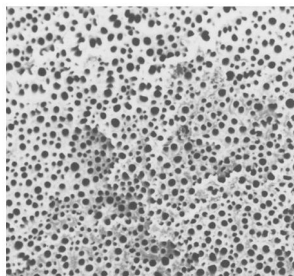
б



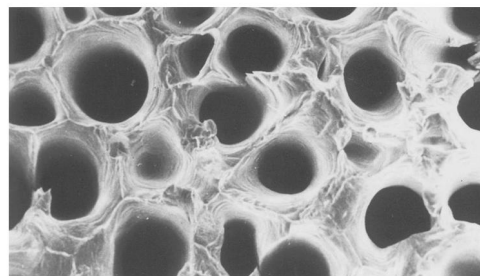
в



г



д



е

Рис. 1. Макро- и микроструктура образцов газаров: а – общий вид; б – продольное сечение; в – поперечное сечение; г – излом, д, е – микроструктура / Fig. 1. The macro- and microstructure of samples gazars: а – the general view; b – the longitudinal section; c – the cross-section, d – the break; e, f – the microstructure

Закрепление тонкого слоя газоармированного металла на поверхности ребер-излучателей приводит к желаемому результату, что объясняется увеличением приведенной степени черноты поверхности излучателя [10; 11].

### Цель работы

Целью работы является исследование особенностей поглощения и испускания лучистой энергии газоармированными образцами с сотовой структурой при ориентации пор перпендикулярно плоскости образца.

### Материал и методики исследований

В качестве модельного материала для исследования служили газоармированные образцы меди, бронзы и магния с сотовой структурой при ориентации пор перпендикулярно плоскости образца (рис. 1).

Исследуемые образцы с пористостью 45...55 % и диаметром пор 0,1...2,0 мм представляли собой цилиндры диаметром 30 мм, высота определялась из условия, что масса пористого образца должна быть

равна массе монолита. Пористость образцов определяли гидростатическим взвешиванием. Торцевую поверхность образцов шлифовали и травили в 10 % спиртовом растворе уксусной кислоты в течение 1...2 минут до появления матовой окисной пленки. Травлением достигалось вскрытие пор, завальцованных при шлифовании, и устранение металлического блеска.

Диаметр пор и толщину межпоровых перегородок определяли с изломом с помощью стереоскопического микроскопа МБС-9 и по фрактографиям, снятым на растровом микроскопе РЕМ-106И.

В числе варьируемых параметров эксперимента были выбраны расстояния от источника света до торцевой поверхности образца и угол, образующийся падающими лучами с поверхностью. Для определения влияния окружающей среды на способность образцов поглощать и излучать лучистую энергию остановились на следующих условиях проведения эксперимента: воздух, вакуум, водород. Для проведения экспериментов в вакууме и водороде изготовлена вакуумная ячейка (рис. 2).

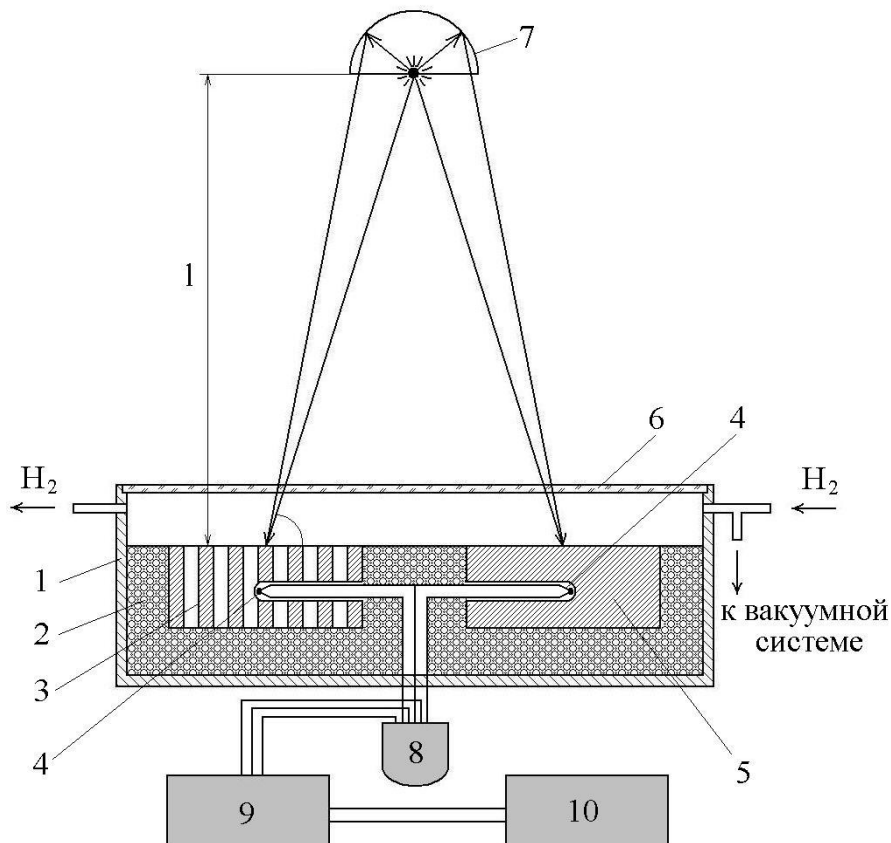


Рис. 2. Экспериментальная ячейка: 1 – корпус, 2 – пенопластовая обойма, 3 – образец газара, 4 – термопара, 5 – монолитный образец, 6 – прозрачная верхняя стенка, 7 – источник света, 8 – термостат со льдом, 9 – автоматический потенциометр КСП-4, 10 – универсальный измерительный прибор Р-4833 / Fig. 2. Experimental cell: 1 – the case, 2 – the foam plastic holder, 3 – the sample of gazara, 4 – the thermocouple, 5 – the monolithic sample, 6 – the transparent top wall, 7 – the light source, 8 – the thermostat with ice, 9 – the automatic potentiometer КСП-4, 10 – the universal measuring device R-4833

Для ввода термопар в образцах параллельно основанию на половине высоты были просверлены отверстия диаметром 2,5 мм и длиной 15 мм. Температура образцов регистрировалась ХА-термопарами: простой при определении абсолютной температуры образцов, дифференциальной – при определении разности температур газара и монолита. Свободные концы термопар пропускались через термостат со льдом.

Для обеспечения теплоизоляции боковой поверхности и уменьшения теплообмена с окружающей средой исследуемые образцы помещались в пенопластовую обойму, плотно прилегающую к образцу.

В качестве источника лучистой энергии была использована лампа накаливания мощностью 150 Вт, помещенная в отражатель.

В числе варьируемых параметров эксперимента были выбраны:

– расстояние  $l$  от источника света до поверхности образца, см;

– угол ( $\alpha$ ), образующийся падающими лучами с поверхностью шлифа, град.

Первоначально расстояние от источника излучения до поверхности шлифа было выбрано произвольно. В последующих экспериментах это расстояние в 2 раза увеличивали и уменьшали. Предполагалось, что угол падения лучей к поверхности шлифа должен влиять на количество поглощенной образцами энергии.

Таким образом, в эксперименте использовались следующие параметры:

$l = 13,5; 6,75 \text{ и } 27,0 \text{ см};$

$\alpha = 60; 45 \text{ и } 90^\circ.$

### Результаты исследований и их обсуждение

Как следует из результатов экспериментов, представленных в виде графика на рисунке 3, кривые изменения разности температур ( $\Delta T$ ), характеризующие кинетику нагрева газара и монолита, в зависимости от расстояния  $l$  и угла  $\alpha$  имеют общие закономерности для всех значений  $l$  и  $\alpha$ :

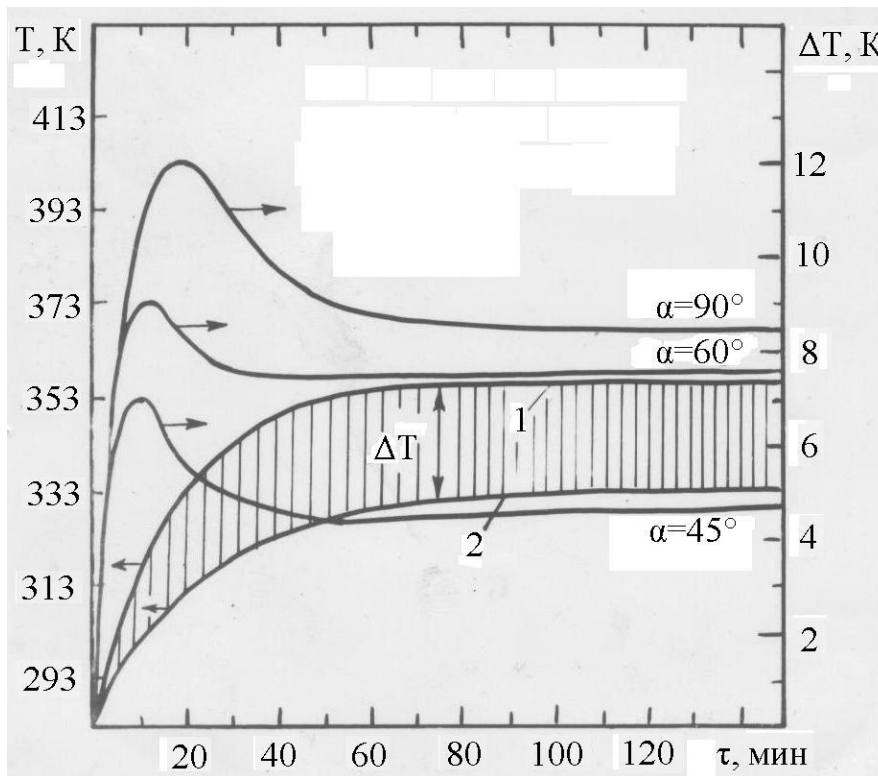


Рис. 3. Влияние расстояния от источника света и угла наклона плоскости шлифа на кинетику нагрева газара и монолита: 1 – абсолютная температура газара, 2 – абсолютная температура монолита / Fig. 3. Influence of distance from a light source and a plane angle of slope grind on kinetics of heating of the gazar and a monolith: 1 – the absolute temperature of a gazar, 2 – the absolute temperature of a monolith

– кривые  $\Delta T$  имеют максимум и область, в которой  $T$  меняется незначительно, оставаясь в течение 3...5 часов приблизительно на одном уровне;

– во всех вариантах эксперимента ( $l$  и  $\alpha$ ) газар нагревается до более высоких температур, чем монолит;

– кривая  $\Delta T$  достигает максимума при наименьшем расстоянии до источника ( $l = 6,79 \text{ см}$ ) и в случае, когда лучи, падающие от источника, направлены параллельно каналам пор ( $\alpha = 90^\circ$ ).

Такой характер кривых можно объяснить следующим. Лучи, попадающие в поры, прежде чем

выйти обратно многократно отражаются от их стенок, прогревая образец на глубину пор. Кроме того, стенки пор, образующие на поверхности шлифа монолитные перегородки, частично поглощают, а частично отражают энергию падающего светового потока подобно монолиту. Таким образом, газарам присуще объемное поглощение энергии теплового

излучения в то время как монолиту свойственно поверхностное поглощение энергии.

В результате этого через 17 минут газар нагревается до температуры 353 К в то время как монолит имеет температуру 330 К (для  $l = 6,79$  см и  $\alpha = 90^\circ$ ) (рис. 4).

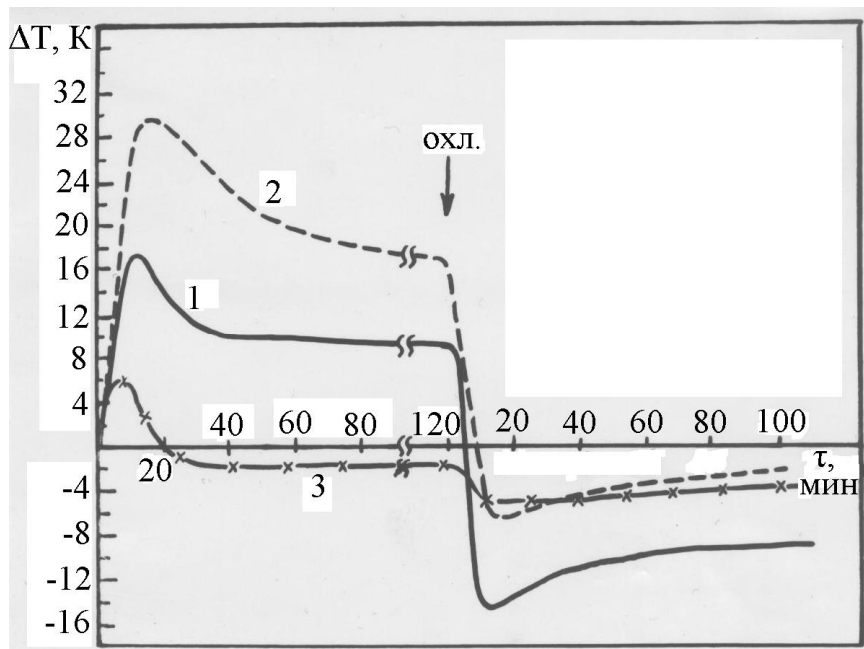


Рис. 4. Кинетика нагрева и охлаждения в различных условиях: 1 – на воздухе, 2 – в вакууме, 3 – в атмосфере водорода / Fig. 4 Kinetics of the heating and cooling in various conditions: 1 – on air, 2 – in vacuum, 3 – in the hydrogen atmosphere

Кроме того, поглощательная способность монолита определяется частотой (длиной волны) излучения – монолит может поглощать излучение не всего набора частот полного излучения, в то время, как поры газаров «работают» подобно абсолютно черному телу – порами может поглощаться излучение любой частоты.

Последующее понижение  $\Delta T$  (т. е. сближение температур газара и монолита) связано с тем, что с повышением температуры образцов увеличивается их излучательная способность, которая уменьшает скорость повышения внутренней энергии образцов, а, соответственно, и температур, особенно для газара, имеющего большую площадь свободной поверхности, чем монолит. И хотя температура обоих образцов медленно повышается, между ними сохраняется постоянная разность  $\Delta T \approx K$ .

Изменение угла падения лучей на поверхность шлифов приводит к понижению разности температур образцов  $\Delta T$  и к понижению абсолютных температур газара и монолита. Причем для газара это изменение сказывается в большей степени.

Для монолита это объясняется тем, что поток лучистой энергии, поглощаемый им, пропорционален  $\cos \alpha$  (закон Ламберта). Для газара в случае попадания излучения в крупную пору образца, наклоненного к источнику под углом  $45^\circ$ , лучи,

попадающие на участок поверхности поры, могут выйти наружу, остальные лучи поглощаются порой. Поэтому газары, имеющие поры меньшего диаметра, сохраняют более высокую температуру при изменении угла  $\alpha$ .

Увеличение расстояния от источника излучения до поверхности шлифов также приводит к уменьшению  $\Delta T$  образцов и абсолютной температуры.

С прекращением действия светового излучения система образец – окружающая среда оказывается в неравновесном состоянии: внутренняя энергия образца повышена. Вследствие этого образцы, охлаждаясь, отдают воздуху часть своей энергии, нагревая его. Причем газары охлаждаются быстрее монолита. Это связано с тем, что газары имеют большую площадь свободной поверхности, способной излучать поглощенную ранее энергию.

Аналогичные эксперименты в вакууме и атмосфере водорода показывают, что среда оказывает существенное влияние на поглощательную способность газаров (рис. 4).

Так, в вакууме эта способность увеличивается. Это связано с отсутствием конвекции газа у поверхности образцов.

В атмосфере избыточного водорода  $\Delta T$  смещено в область отрицательных значений, что связано с

постоянным омыванием холодным водородом поверхности образцов.

В целом характер кривых, обусловленный природой газаров и монолита, не меняется.

### Выводы

Экспериментально показано, что сотовая структура газаров придает им аномальные теплофизические свойства:

– нагрев газоармированных образцов под действием световых лучей происходит намного быстрее, чем монолитных;

– под воздействием излучения газары имеют более высокую температуру, чем монолитные образцы;

– охлаждение газаров происходит намного быстрее монолита;

– на теплофизические свойства газаров оказывают воздействие параметры структуры: размер пор, их ориентация, общий объем пор;

– газары могут служить перспективным материалом для теплообменников в вакууме и газовой среде;

– при наличии испарения с поверхности газара или прокачки сквозь него охлаждающего газа температура газара всегда ниже температуры монолитного металла.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении : монография / С. В. Белов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 247 с.
2. Карнаухов А. П. Структурные модели пористых металлов / А. П. Карнаухов // Моделирование пористых материалов. – Новосибирск : СО АН СССР. Ин-т катализа, 1976. – С. 42–59.
3. Пористые проницаемые материалы : справочник // [С. В. Белов, П. А. Витязь, В. К. Шелег, В. М. Капцевич и др.]. – Москва : Metallurgiya, 1987. – 335 с.
4. Шаповалов В. И. Легирование водородом : монография // В. И. Шаповалов. – Днепропетровск : Журфонд, 2013. – 385 с.
5. Бунин К. П. О диаграмме железо – водород / К. П. Бунин, В. И. Шаповалов, В. В. Трофименко // ДАН УССР. – 1976. – № 3. – С. 267–269.
6. Bunin K. P. Investigation of the Fe – H system at high temperatures and pressures / K. P. Bunin, V. I. Shapovalov, V. V. Trofimenko // High temperatures – high pressures. – 1977. – № 6. – Pp. 639–640.
7. Трофименко В. В. Особенности свойств и перспективы использования пористых литых материалов / В. В. Трофименко, А. Л. Чуприна // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2006. – Вып. 36. – С. 95–101.
8. Трофименко А. В. Компактные аккумуляторы водорода для топливных элементов энергетических установок / А. В. Трофименко, В. В. Трофименко, В. П. Гумницкий // Космическая техника. – КБ «Южное», 2001. – Вып. 1. – С. 37–42.
9. Трофименко В. В. Перспективы применения газоармированных металлов в энергетических устройствах / В. В. Трофименко, А. В. Трофименко // Теплотехника, энергетика и экология в металлургии : коллект. монография в 2 книгах. – Кн. 1. – Днепр : Нова ідеологія, 2017. – С. 77–80.
10. Morozov Yu. D. Solar dynamic Rankine space power plant using vapour-liquid metallic techniques / Yu. D. Morozov, V. F. Prisyakov, A. N. Privalov, A. V. Trofimenko // Space Technology. – Vol. 16. – № 4. – 1996. – Pp. 169–176.
11. Morozov Yu. D. Analysis of solar and nuclear power systems for space stations / Yu. D. Morozov, V. F. Prisyakov, A. V. Trofimenko // Paper IAF-94-R.1-367.

### REFERERNCES

1. Belov S.V. *Poristyye metallyi v mashinostroenii* [Porous metals in mechanical engineering]. Moscow : Mashinostroyeniye Publ, 1981, 247 p. (in Russian).
2. Karnauhov A.P. *Strukturnyye modeli poristyykh metallov* [Structural models of porous metals]. *Modelirovaniye poristyykh materialov* [Modeling of porous materials]. Novosibirsk : UO AS USSR. Institut of Catalysis, 1976, pp. 42–59. (in Russian).
3. Belov S.V., Vityaz P.A., Sheleg V.K., Kaptsevich V.M. and oth. *Poristyye pronitsaemye materialy* [Porous permeable materials]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1987, 335 p. (in Russian).
4. Shapovalov V.I. *Legirovaniye vodorodom* [Doping with hydrogen]. Dnipropetrovsk : Zhurfond Publ., 2013, 385 p. (in Russian).
5. Bunin K.P., Shapovalov V.I. and Trofimenko V.V. *O diagramme zhelezo - vodorod* [About the iron – hydrogen diagram]. SAS USSR, 1976, no. 3, pp. 267–269. (in Russian).
6. Bunin K.P., Shapovalov V.I. and Trofimenko V.V. Investigation of the Fe – H system at high temperatures and pressures. *High temperatures – high pressures*, 1977, no. 6, pp. 639–640.
7. Trofimenko V.V. and Chuprina A.L. *Osobennosti svoystv i perspektivy ispolzovaniya poristyykh litykh materialov* [Features of the properties and prospects for the use of porous cast materials]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Material Science, Mechanical Engineering]. 2006, iss. 36, pp. 95–101. (in Russian).
8. Trofimenko A.V., Trofimenko V.V. and Gumnitskiy V.P. *Kompaktnyye akkumulyatoryi vodoroda dlya toplivnykh elementov energeticheskikh ustanovok* [Compact hydrogen accumulators for fuel cells of power plants]. *Kosmicheskaya tehnik* [Space Technology]. CB «Yuzhnoe», 2001, iss. 1, pp. 37–42. (in Russian).
9. Trofimenko V.V. and Trofimenko A.V. *Perspektivy primeneniya gazoarmirovannykh metallov v energeticheskikh ustroystvakh* [Prospects for the use of gas-reinforced metals in power devices]. *Teplotehnika, energetika i ekologiya v metallurgii* [Heat engineering, power engineering and ecology in metallurgy]. Book 1, Dnipro : Nova Ideologiya Publ., 2017, pp. 77–80. (in Russian).

10. Morozov Yu.D., Prisiakov V.F., Privalov A.N. and Trofymenko A.V. Solar dynamic Rankine space power plant using vapour-liquid metallic techniques. Space Technology, 1996, vol. 16, no. 4, pp. 169–176.

11. Morozov Yu.D., Prisiakov V.F. and Trofymenko A.V. Analysis of solar and nuclear power systems for space stations. Paper IAF-94-R.1.-367.

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. О. Б. Гириньым (Украина); д-ром техн. наук, проф. А. Ф. Саниным (Украина).*

Поступила в редколлегию 08.11.17

Принята к печати 13.11.17