

8. Rulla N.V., Samoylov G.M. and Studinskiy M.M. *Proizvodstvo trub* [The production of pipes]. *Sbornik statey po teorii i praktike trubnogo proizvodstva* [Collection of articles on the theory and practice of pipe production]. Moscow, 1961, vol. 4. (in Russian).
9. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklyucheni* [Physics of fracture steel near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NmetAU, IT «Sistemnyye tekhnologii», 2014, 01 p. (in Russian).
10. Movchan B.A. *Granitsy kristallitov v litykh metallakh i splavakh* [The boundaries of the crystallites in cast metals and alloys]. Kyiv : Tekhnika, 1970, 212 p. (in Russian).
11. Golikov I.N. and Maslenkov S.B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavak* [Dendritic liquation in steels and alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1977, 224 p. (in Russian).
12. Saratovkin D.D. *Dendritnaya kristallizatsiya* [Dendritic crystallization]. Moscow : Metallurgizdat, 1957, 125 p. (in Russian).
13. Yavoyskiy V.I. *Teoriya protsessov proizvodstva stali* [Theory of steel-making processes]. Moscow : Metallurgizdat, 1963, 820 p. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации в журнале «Д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевой (Украина), д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлиным (Украина)».

Поступила в редколлегию 25.02.2017

Принята в печать 28.02.2017

УДК 669.017:62-405.8

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ИХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В АТМОСФЕРЕ ВОДОРОДА

КАРПОВ В. Ю.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
КАРПОВ В. В.²
КОМИССАРЧУК О. В.³, *аспир.*

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (067) 921-93-80, e-mail: vladkarp@mail.ru

² Научно-исследовательская лаборатория «Сплав», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (067) 921-93-80, e-mail: vladkarp@mail.ru

³ Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (067) 921-93-80

Аннотация. Постановка проблемы. Проблема формирования пористой структуры в литых металлах связана с необходимостью сокращать количество материалов для изготовления изделий при сохранении всех их параметров кроме веса. **Цель статьи** – определение основных параметров процесса изготовления газаров при нескольких центрах кристаллизации. **Методика.** Материалом для исследований служила медь марки М0, которая обрабатывалась в экспериментальной установке с использованием специальных форм с несколькими центрами кристаллизации. Использовались методы исследования – макро- и микроанализ, измерение пористости, определение параметров для получения минимального количества дефектов структуры. **Результаты.** Установлено, что при двух фронтах кристаллизации (аксиальном и радиальном) образцы газаров имеют достаточно однородную структуру, параметры которой зависят от условий процесса получения. Величину пористости и размеры пор можно изменять давлениями насыщения и кристаллизации, степенью теплового контакта с холодильниками. При двух встречных фронтах кристаллизации структура полученных образцов значительно отличается от предыдущей серии. Влияние давлений насыщения и кристаллизации на структуру аналогично, но требуются их более высокие значения для получения однородной структуры. **Научная новизна.** Установлены основные закономерности формирования структуры газаров при двух фронтах кристаллизации различно ориентированных относительно друг друга. Проанализированы дефекты структуры, причины их появления и способы их устранения. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит получать изделия сложной формы с заранее запланированной структурой и свойствами при конкретных параметрах процесса.

Ключевые слова: давление насыщения; кристаллизация; холодильник; пористость; однородность структуры

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В МЕТАЛАХ ЗА ЇХ КРИСТАЛІЗАЦІЇ В АТМОСФЕРІ ВОДНЮ

КАРПОВ В. Ю.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
КАРПОВ В. В.²
КОМИССАРЧУК О. В.³, *аспир.*

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (067) 921-93-80, e-mail: vladkarp@mail

² Науково-дослідна лабораторія "Сплав", Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (067) 921-93-80, e-mail: vladkarp@mail

³ Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (067) 921-93-80

Анотація. Постановка проблеми. Проблема формування пористої структури в литих металах пов'язана з необхідністю скорочувати кількість матеріалів, необхідних для виготовлення виробів, за умови збереження всіх їх параметрів, крім ваги. **Мета статті** – визначення основних параметрів процесу виготовлення газарів при декількох центрах кристалізації. **Методика.** Матеріалом для досліджень служила мідь марки М0, яка оброблялася в експериментальній установці з використанням спеціальних форм із кількома центрами кристалізації. Застосовувалися методи дослідження – макро- й мікроаналіз, вимірювання пористості, визначення параметрів для одержання мінімальної кількості дефектів структури. **Результати.** Установлено, що при двох фронтах кристалізації (аксіальному та радіальному) зразки газарів мають досить однорідну структуру, параметри якої залежать від умов процесу одержання. Величину пористості й розміри пор можна змінювати тисками насичення й кристалізації, ступенем теплового контакту з холодильниками. При двох зустрічних фронтах кристалізації структура отриманих зразків значно відрізняється від попередньої серії. Вплив тисків насичення й кристалізації на структуру аналогічний, але потрібні їх більш високі значення для одержання однорідної структури. **Наукова новизна.** Встановлено основні закономірності формування структури газарів при двох фронтах кристалізації, порізнному орієнтованих відносно один одного. Проаналізовано дефекти структури, причини їх появи й способи їх усунення. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить одержувати вироби складної форми із задалегідь запланованою структурою й властивостями з конкретними параметрами процесу.

Ключові слова: тиск насичення; кристалізація; холодильник; пористість; однорідність структури

STRUCTURIZATION IN METALS AT THEIR CRYSTALLIZATION IN HYDROGEN ATMOSPHERE

KARPOV V.Yu.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

KARPOV V.V.²

KOMISARCHUK O.V.³, *Postgraduate Stud.*

^{1*} Material Science Department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 921-93-80, e-mail: vladkarp@mail.ru

² Scientific researching laboratory "Alloy", National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 921-93-80, e-mail: vladkarp@mail.ru

³ Material Science Department, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 921-93-80

Abstract. Formulation of the problem. The problem of formation of porous structure in cast metals is connected with necessity to reduce quantity of materials for manufacturing of products at preservation all of them parameters except weight. **The purpose** of work-definition of key parameters of process of manufacturing gazars at the several centers of crystallization. **Methods.** As materials for researches copper of mark M0 which was processed in experimental installation with use of special forms with the several centers of crystallization served. Research methods – macro- and the microanalysis, porosity measurement, definition of parameters for reception of a minimum quantity of defects of structure were used. **Results.** It is established, that at two fronts of crystallization (axial and radial) samples gazars have homogeneous enough structure which parameters depend on conditions of process of reception. The size of porosity and the sizes of a time can be changed pressure of saturation and crystallization, degree of thermal contact to refrigerators. At two counter fronts of crystallization the structure of the received samples considerably differs from the previous series. Influence of pressure of saturation and crystallization influence structure similarly, but their higher values for reception of homogeneous structure are required. **Scientific novelty.** The basic laws of formation of structure gazars are established at two fronts of crystallization variously focused rather each other. Defects of structure, the reason of their occurrence and ways of their elimination are analyzed. **Practical significance.** Use of the received results will allow to receive products of the difficult form with in advance planned structure and properties at concrete parameters of process.

Keywords: pressure of saturation; crystallization; a refrigerator; porosity; uniformity of structure

Введение

Продолжая традиции металловедческой школы, заложенной К. П. Буниным и развитой Ю. Н. Тараном в отношении эвтектических сплавов, их ученик В. И. Шаповалов обратил внимание на

новый вид эвтектических реакций – газоевтектическую. На основе этой реакции был разработан новый пористый материал, названный газаром. Основное достоинство газаров – возможность управлять всеми параметрами пор и получать материал из широкого ряда металлов и сплавов. Сейчас исследованиями свойств газаров

занимається лабораторія «Сплав» в Національній металургічеській академії України.

Ізвестно, що проблема взаємодії водороду з металами викликає інтерес у дослідників багато років [1–3]. При кристалізації металів, насичених газом, в частині, водородом, відбувається газозвтеклическа реакція з утворенням пористого матеріалу – газара. Традиційно при отриманні газарів використовували один холодильник – кристалізатор. Вивченням процесів структуроутворення при декількох центрах кристалізації не займались [4–7]. Однак саме ці процеси найбільш важливі при виготовленні складних виробів з газарів, де для різних частин литви необхідно створювати необхідну їм структуру.

Цель исследования

Целью настоящей работы явилось исследование процесса структурообразования при взаимодействии двух фронтов кристаллизации – аксиальном и радиальном и при двух встречных направлениях движения фронтов относительно друг друга.

Материалы и методики

Образцы газаров получали на экспериментальной установке, которая позволяла работать при давлениях газов до 10 МПа и температурах печи до 1 600 К [4; 5]. Полученные образцы газаров разрезались, и исследовалась их макро- и микроструктура, определялась дефектность. Полученные данные использовались для определения параметров получения структуры газаров с минимальным количеством дефектов и неоднородностей в ней. Оценивались параметры процесса и пределы регулирования пористой структуры (пористости, размера пор, их взаимного расположения, мест образования дефектов структуры). Структура образцов изучалась с помощью бинокулярного микроскопа, пористость и параметры пор – с использованием компьютерного оборудования.

Результаты исследований и их обсуждение

Расположение пор внутри газара определяет его анизотропию свойств. При использовании только одного центра кристаллизации структура газара получается однонаправленной, что определяло его свойства в двух взаимно перпендикулярных направлениях [8–10]. При эксплуатации изделий сложной конфигурации, нагрузки, которые прилагаются к их отдельным частям, имеют разное направление, что требует соответствующих свойств этих участков. В этом случае однонаправленная структура в газарах неприемлема.

Рассмотрим формирование структуры образцов газаров с двумя фронтами кристаллизации (аксиальным и радиальным) [11–13]. Для этих целей

использовалась форма с двумя центрами кристаллизации (рис. 1). В процессе исследований были получены образцы, структура которых имела следующий вид (рис. 2).

Хорошо видно, что имеется целая зона в структуре газара, наиболее склонная к образованию дефектов. Это центральная зона, где фронты движутся практически навстречу друг другу, а затем изгибаются и движутся параллельно друг другу. В данном случае процесс получения газара проходил при давлениях насыщения и кристаллизации, равных 0,1 МПа. При увеличении давления кристаллизации происходит уменьшение размера пор и общей пористости образцов.

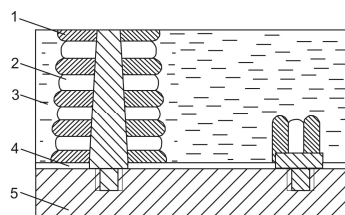


Рис. 1. Схема формы для газаров с двумя центрами кристаллизации: 1 – расплав, 2 – кристалл металла, 3 – газовая пора, 4 – обмазка, 5 – холодильник / Fig. 1. The scheme of the form for gazars with two centres of crystallisation: 1 – melt, 2 – metal crystal, 3 – gas pore, 4 – coating, 5 – refrigerator

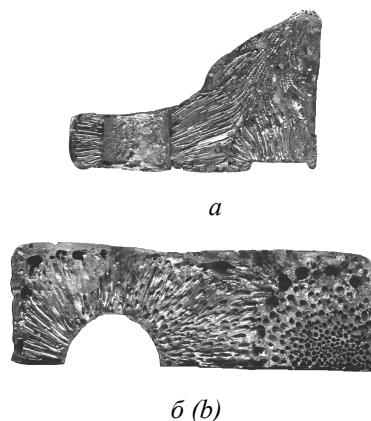


Рис. 2. Вид образцов газара при кристаллизации от двух центров охлаждения при $P_n = P_{кр} = 0,1$ МПа: а – продольное, б – поперечное сечение с видимыми крупными порами слияния / Fig. 2. Kind of samples gazar at crystallisation from two centres of cooling at $P_s = P_{cr} = 0,1$ МПа: а – longitudinal, б – cross-section with a visible large time of merge

Однако видно, что зона дефектности структуры в остаточном виде сохранилась. По параметрам процесса можно получить структуры с пористостью от 40...50 % до 15...20 % при диаметре пор от 1 мм до 0,05 мм. В целом по оценке структуры степень неоднородности составляет незначительную величину, которой можно пренебречь (рис. 3).

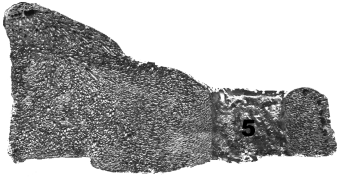


Рис. 3. Вид однородного по структуре образца, полученного при $P_{кр} = 1,0$ МПа / Fig. 3. Kind of the sample homogeneous for structure received at $P_{cr} = 1,0$ MPa

Однако необходимо учитывать, что между центрами кристаллизации существует зона с иной структурой, с более крупными порами (поры слияния). Особенно это важно учитывать при использовании таких изделий при двух противоположно направленных усилиях (разрывающих), которые перпендикулярны направлению роста пор. Это приводит к «расщеплению» образцов вдоль пор, где газар имеет минимальную прочность по сравнению с перпендикулярным направлением приложенных усилий. Если судить по форме образцов, то определенную роль играет степень теплового контакта расплава с холодильниками формы. В случае недостаточного контакта дефектность образцов резко возрастает, что должно учитываться при изготовлении форм для изделий и расположении холодильников. Немаловажную роль играет температура расплава перед заливкой в форму (рис. 4).

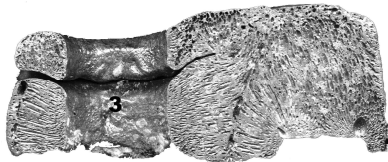


Рис. 4. Вид образца с порами вблизи холодильников при «холодном» расплаве / Fig. 4. Kind of the sample with a time near to refrigerators at "cold" melt

Вторая серия экспериментов проводилась для условий встречного движения фронтов кристаллизации. Схема формы для образцов представлена на рисунке 5.

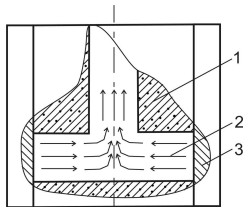


Рис. 5. Схема формы для формирования двух встречных фронтов кристаллизации: 1 – огнеупорная форма, 2 – кристаллизующийся металл, 3 – холодильники-кристаллизаторы / Fig. 5. The scheme of the form for formation of two counter fronts of crystallisation: 1 – the fire-resistant form, 2 – crystallising metal, 3 – refrigerators-crystallizers

Первые эксперименты по получению образцов действительно показали формирование пор в месте встречи фронтов кристаллизации, причем образовывалась одна, но очень крупная пора (рис. 6).

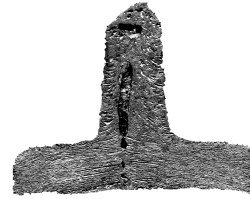


Рис. 6. Вид образца газара при встречных фронтах кристаллизации и параметрах процесса $P_n = P_{кр} = 0,1$ МПа / Fig. 6. Kind of the sample gazar at counter fronts of crystallisation and parametres of process $P_s = P_{cr} = 0,1$ MPa

Аналогично предыдущей серии экспериментов получения образцов была сделана попытка минимизировать этот дефект путем постепенного увеличения давления в ходе кристаллизации до 0,5 МПа со скоростью нарастания порядка 0,05 МПа/с (рис. 7).

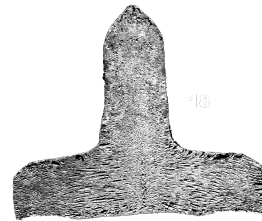


Рис. 7. Вид образца газара при параметрах процесса $P_n = 0,2$ МПа, $P_{кр} = 0,2$ МПа...0,5 МПа / Fig. 7. Kind of the sample gazar at parametres of process $P_s = 0,2$ MPa, $P_{cr} = 0,2$ MPa ... 0,5 MPa

Хорошо видно, что центральная пора исчезла, структура образца практически однородна, но есть заметная разница в диаметрах пор по образцу. С целью выравнивания их размеров по всему объему изделия разово повышали давление кристаллизации до 1,5 МПа (рис. 8). Это приводило к заметному уменьшению размера пор (их диаметра) и снижению общей пористости изделия из газара. В результате была получена однородная пористая мелкодисперсная структура у отливок. Пористость образцов снижалась до 30...35 % при диаметре пор 50...80 мкм.

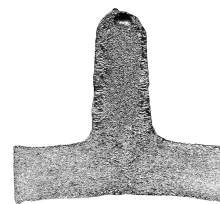


Рис. 8. Вид образца газара при параметрах процесса $P_n = 0,2$ МПа, $P_{кр} = 1,5$ МПа / Fig. 8. Kind of the sample gazar at parametres of process $P_s = 0,2$ MPa, $P_{cr} = 1,5$ MPa

Степень теплового контакта расплава с холодильниками формы также влияет на распределение и возникновение дополнительных дефектов структуры изделий. Скорость движения фронта кристаллизации при хорошем тепловом контакте расплава с холодильниками значительно выше, что сдвигает процессы формирования пор и дефектов отливки в сторону холодильника с плохим тепловым контактом. В этом случае пора может приблизиться к поверхности изделия практически вплотную и вызвать его брак.

Выводы

Проведенные исследования показали, что структурообразование в изделиях сложной формы из газаров с несколькими центрами кристаллизации имеет свои особенности. Прежде всего, необходимо учитывать пространственную ориентацию центров кристаллизации с целью минимизации образования возможных дефектов. При формировании структуры при аксиально-радиальной ориентации происходит

формирование зоны пор слияния в месте встречи двух фронтов кристаллизации. Эта зона особенно опасна при изготовлении изделий с высокой пористостью и порами большого диаметра, что резко снижает их прочность. Для мелкодисперсной структуры этот дефект практически исчезает.

В случае кристаллизации газара при двух встречных фронтах наиболее эффективно снижать дефектность структуры позволяет возрастающее давление при кристаллизации. Другой простой вариант снижения дефектности газаров – проводить их кристаллизацию при высоких давлениях газов. Недостатком способа является заметное снижение пористости газаров (на 15...20 %) и диаметра пор в 1,5...3 раза. Положительный эффект процесса – заметное повышение прочностных свойств изделий.

При разработке любого изделия с несколькими центрами кристаллизации необходимо тщательно изучать направление движения фронтов кристаллизации для минимизации дефектов структуры, вызывающих брак.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галактионова Н. А. Водород в металлах : монография / Н. А. Галактионова. – Москва : Металлургия, 1962. – 268 с. – Режим доступа: <http://lib.sumdu.edu.ua/library/>
2. Водород в металлах. Прикладные аспекты / Под ред. Г. Альфельда, И. Фелькля. – Т. 2. – Москва : Мир, 1981. – 289 с. – Режим доступа: http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/webirbis/cgi-icm/cgiirbis_64.exe
3. Чернега Д. Ф. Диффузия водорода в жидкой меди / Д. Ф. Чернега, К. И. Ващенко, Д. Ф. Иванчук // Известия вузов. Цветная металлургия, 1973. – № 4. – С. 120–122. – Режим доступа: <http://www.chipmaker.ru/files/file/4907/>
4. Карпов В. В. Физико-механические свойства газаров / В. В. Карпов, В. Ю. Карпов, В. И. Шаповалов // ВМ-2007. – Донецк, 2007. – С. 581–585. – Режим доступа: <http://naukarus.com/pyataya-mezhdunarodnaya-konferentsiya>
5. Шаповалов В. И. Литые пористые сплавы: производство, структура и применение / В. И. Шаповалов // Металл и литье Украины. – № 2. – 1995. – С. 2–10. – Режим доступа: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn
6. Banhart J. Manufacturing, characterization and application of cellular metals and metal foams / J. Banhart // Progress in Material Science. – Vol. 46. – 2001. – Pp. 559–632. – Режим доступа: <http://publica.fraunhofer.de/>
7. Yuan Liu. Theoretical analysis of bubble nucleation in GASAR materials / Liu Yuan, Li Yanxiang // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – Vol. 13. – № 4. – 2003. – Pp. 830–834. – Режим доступа: <http://www.tsinghua.edu.cn/publish/mseen>
8. Шаповалов В. И. Легирование водородом : монография / В. И. Шаповалов. – Днепропетровск : Журфонд, 2013. – 385 с. – Режим доступа: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/detail.php3?doc_id=1539755
9. Yuan Liu. Metal-gas eutectic growth during unidirectional solidification / Liu Yuan, Li Yanxiang // Metallurgical and Materials Transactions. – A. – Vol. 37. – № 9. – 2006. – Pp. 2871–2877. – Режим доступа: <http://ntb.misis.ru:591/opac/index.php?url>
10. Шаповалов В. И. Газоармированные материалы (газары) – 30-летний путь проблем и прогресса / В. И. Шаповалов // Металл и литье Украины. – 2011. – № 3 (214). – С. 3–11. – Режим доступа: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/104400>
11. Карпов В. Ю. Металлы и водород / В. Ю. Карпов // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 3. – С. 92–96. – Режим доступа: <http://irbis.sstu.ru/cgi-bin/irbis64r>
12. Карпов В. В. Формирование отливок газаров со сложной структурой / В. В. Карпов, С. И. Губенко, В. Ю. Карпов // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2012. – Вып. 64. – С. 324–329. – Режим доступа: https://www.znu.edu.ua/faculty/fizyky/bls/1-referats_of_starodubov_2012
13. Карпов В. Ю. Формирования структуры медных газаров сложной формы / В. Ю. Карпов, С. И. Губенко, В. В. Карпов // Металл и литье Украины. – 2016. – № 2. – С. 9–16. – Режим доступа: <https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fsmm.pgasa.dp.ua>

REFERENCES

1. Galaktionova N.A. *Vodorod v metalakh* [Hydrogen in metals]. Moscow : Metallurgy, 1962, 268 p. (in Russian)
2. *Vodorod v metalakh* [Hydrogen in metals]. Under edition by Al'feld G. and Felkl' I. Moscow : World, 1981, 289 p. (in Russian)
3. Chernega D.F., Vahenko K.I. and Ivanchuk D.F. *Diffuziyi vodoroda v zhidkoy medi* [Hydrogen diffusion in liquid copper]. *Izvestiya vuzov* [News of High schools]. Nonferrous metallurgy, 1973, no. 4, pp. 120–122. (in Russian)
4. Karpov V.V., Karpov V.Yu. and Shapovalov V.I. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva gazarov* [Physico-mechanical properties gasars]. BOM-2007, Donetsk, 2007, pp. 581–585. (in Russian)

5. Shapovalov V.I. *Litye poristye splavy: proizvodstvo, struktura i primeneniye* [Cast porous alloys: manufacture, structure and application]. *Metall i lityo Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine]. No. 2, 1995, pp. 2–10. (in Russian)
6. Banhart J. Manufacturing, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Material Science*, vol. 46, 2001, pp. 559–632. (in English)
7. Yuan Liu and Yanxiang Li. Theoretical analysis of bubble nucleation in GASAR materials. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 13, no. 4 (2003), pp. 830–834. (in English)
8. Shapovalov V.I. *Legirovaniye vodorodom* [Alloyage hydrogen]. Dnipropetrovsk : Zhurfond Publ., 2013, 385 p. (in Russian)
9. Yuan Liu and Yanxiang Li. Metal-gas eutectic growth during unidirectional solidification. *Metallurgical and Materials Transactions, A*, vol. 37, no. 9, 2006, pp. 2871–2877. (in English)
10. Shapovalov V.I. *Gazoarmirovannyye materialy (gasary) – 30-letniy put' problem i progressa* [Gasreinforced materials (gasars) – is 30-year-old way of problems and progress]. *Metall i lityo Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine]. 2011, no. 3 (214), pp. 3–11. (in Russian)
11. Karpov V.Yu. *Metally i vodorod* [Metals and hydrogen]. *Teoriy i praktika metalurgii* [Theory and practice of metallurgy]. 2012, no. 3, pp. 92–96. (in Russian)
12. Karpov V.V., Gubenko S.I. and Karpov V.Yu. *Formirovaniye otlivok gazarov so slozhnoy stukturoy* [Formation cast gasars with difficult structure] *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye* [Building construction, materials science, mechanical engineering]. PSACEA, 2012, vol. 64, pp. 324–329. (in Russian)
13. Karpov V.Yu., Gubenko S.I. and Karpov V.V. *Formirovaniye stuktury mednykh gasarov slozhnoy formy* [Formations of structure copper gasars the difficult form]. *Metall i lityo Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine]. 2016, no. 2, pp. 9–16. (in Russian)

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. С. Н. Губенко (Украина), д-ром техн. наук, проф. В. И. Шаповаловым (Украина).

Поступила в редколлегию 12.04.2017

Принята в печать 15.04.2017