

## Формирование структуры медных газаров сложной формы

Рассмотрены особенности формирования структуры медных газаров сложной формы. Показано, что при наличии нескольких фронтов кристаллизации в одной форме они взаимодействуют между собой с образованием дефектной зоны в виде пор слияния. Выявлены отличия в структуре при формировании отливок в зависимости от ориентации холодильников. Рассмотрены способы устранения дефектной зоны отливок.

**Ключевые слова:** газар, давление насыщения, кристаллизация, расплав, пористость, поры слияния

**В**ведение. Во всём мире ведутся научно-технические работы, связанные с разработкой и производством пористых материалов из металлов, сплавов и керамики. Пористые сплавы (ПС) представляют собой особый класс функциональных материалов современного машиностроения. Это связано с тем, что только они имеют в своём составе газовую фазу как полноправную структурную составляющую, определяющую большинство свойств этих материалов. Структура ПС формируется в результате газозвтектического превращения [1-3]. Появление нового литого материала – газара с регулируемой пористостью и размером пор привлекло большой интерес исследователей. Однако первоначально получаемые отливки имели простую форму (цилиндр, кольцо) с однонаправленным расположением пор [4, 5]. Современное производство, как правило, требует применения изделий сложной формы. Поскольку пористая структура в газарах определяется направлением кристаллизации, была предпринята попытка разместить несколько холодильников в объёме одной литейной формы. Целью работы было изучение процесса формирования пористой структуры медных газаров при использовании следующих ориентаций холодильников в форме: двух аксиальных, аксиальной и радиальной, двух встречных, а также изменения направления кристаллизации.

**Материалы и методики исследований.** Для исследований использовалась установка в виде автоклава с печью ( $T$  печи до 1700 К), в котором создавалось регулируемое давление (вакуум, давление аргона, водорода до 10 МПа) [6]. Давление газовой фазы измерялось образцовым манометром МО 0,15; температура контролировалась вольфрам-рениевой термопарой ВР5/20. Расплав выливался в специальные формы, где создавались необходимые условия для формирования заданной структуры газара.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Схема процесса кристаллизации газара с двумя аксиальными холодильниками представлена на рис.1. Изучение дендритной структуры отливок газаров с двумя аксиальными фронтами кристаллизации показало, что для начального периода кристаллизации каждого фронта характерно радиальное расположение столбчатых кристаллов (рис. 2, а, в). Затем каждый фронт кристаллизации развивается в одном

направлении, где направление роста дендритов расположено параллельно друг другу. В зависимости от параметров процесса (давления насыщения расплава –  $P_{\text{нас}}$ , давления кристаллизации –  $P_{\text{кр}}$ , температуры расплава и времени его выдержки перед разливкой) структура отливки заметно изменялась (рис. 2, б, в, г). Хорошо видно, что степень теплового контакта расплав-холодильник также оказывает заметное влияние на общую структуру отливки (рис. 2, а, б), поэтому ему уделялось особое внимание при подготовке экспериментов. Установлено, что с повышением давления кристаллизации ( $P_{\text{кр}}$ ) структура газаров становится более равномерной, но их пористость снижается с 45-55 до 30-40 % с уменьшением диаметра пор в 1,5-3,0 раза. Однако механические свойства отливок при этом заметно возрастают в 1,5-2,0 раза [7]. Температура расплава влияла на формирование подкорковых пузырей и в целом на качество самой отливки (рис. 2, в, г). В процессе затвердевания газара при взаимодействии двух аксиальных (параллельных) фронтов кристаллизации рост газозвтектических колоний имеет следующие стадии: 1 – радиальный рост от каждого кристаллизатора, 2 – поворот растущих колоний при встрече фронтов кристаллизации на угол 30-60°, величина которого зависит от соотношения интенсивностей кристаллизации каждого фронта; 3 – параллельный рост колоний в пределах каждого фронта. Расплав вытесняется в область между двумя фронтами кристаллизации. Зона слияния в слитке не содержит крупных пор по сравнению с размерами пор

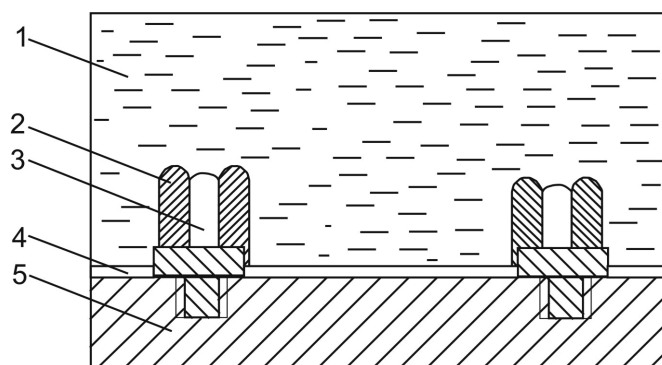
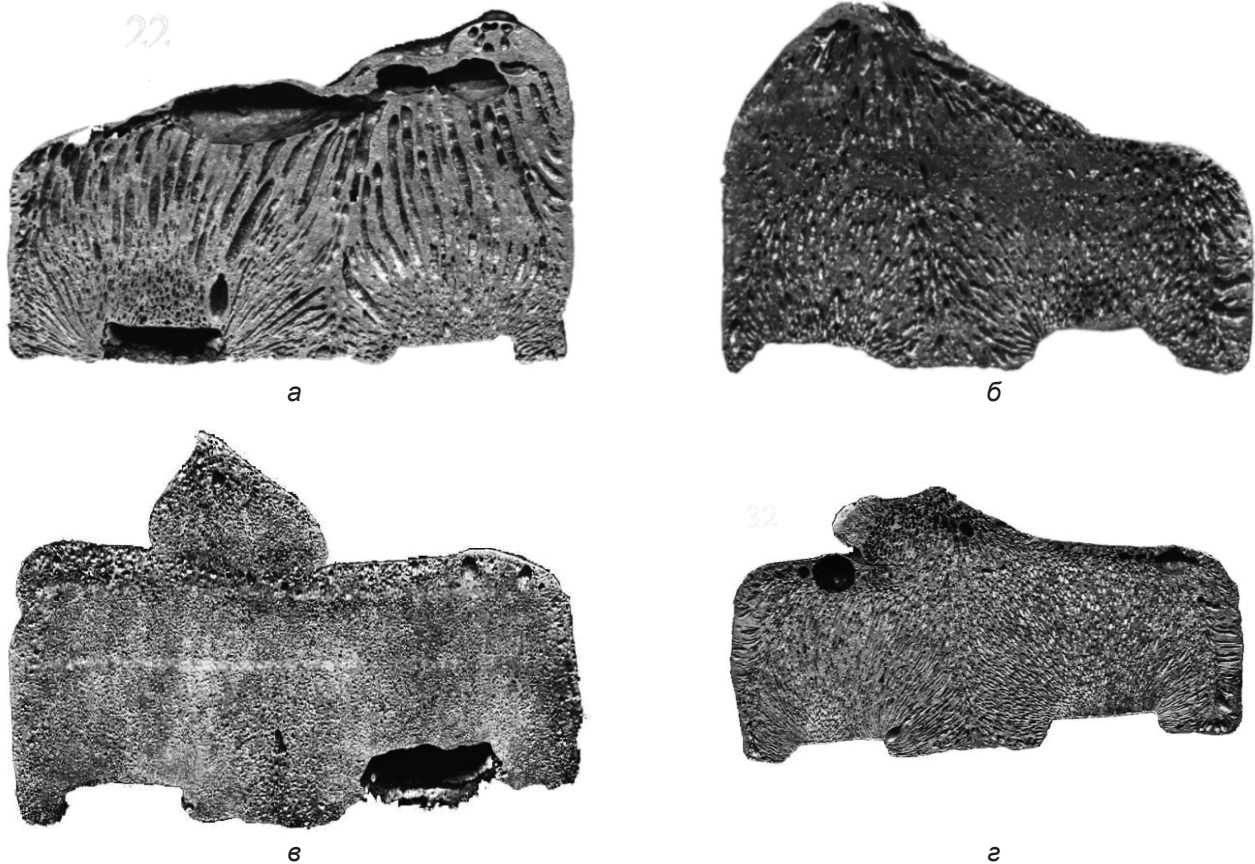


Рис. 1. Схема процесса кристаллизации газара с двумя аксиальными холодильниками



**Рис. 2.** Виды структур отливок медных газаров, полученных при различных параметрах плавки: а –  $P_{\text{нас.}} = 0,2$  и  $P_{\text{кр.}} = 0,05$  МПа; б –  $P_{\text{нас.}} = 0,25$  и  $P_{\text{кр.}} = 0,1$  МПа; в –  $P_{\text{нас.}} = 0,3$  и  $P_{\text{кр.}} = 0,25$  МПа; г –  $P_{\text{нас.}} = 0,3$  и  $P_{\text{кр.}} = 0,15$  МПа

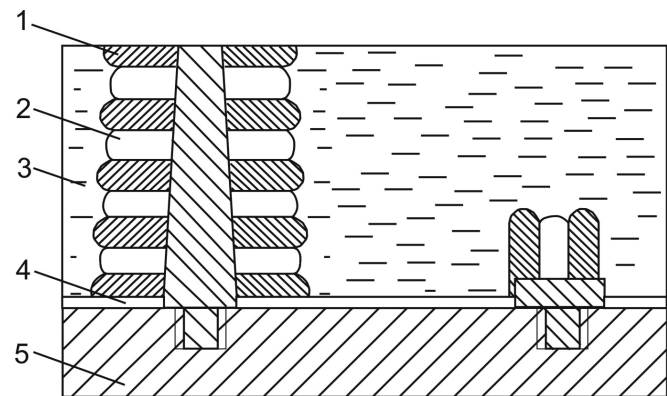
основного газара, зависящими от соотношения давления насыщения и кристаллизации.

При схеме кристаллизации газара с аксиальным и радиальным холодильниками кристаллизации (рис. 3) происходит взаимодействие фронтов кристаллизации, однако не вполне ясно, как в результате изменится структура всей отливки. Анализ макроструктуры отливки свидетельствует об однородном направлении роста кристаллов металла в пределах каждого из двух фронтов кристаллизации – радиального и аксиального. Столбчатые кристаллы твёрдого раствора водорода в меди располагаются практически параллельно друг другу либо радиально в начальный период кристаллизации каждого из двух фронтов, которые начинают развиваться перпендикулярно друг к другу. Затем вследствие их взаимного влияния дендриты изгибаются и поворачиваются. Далее кристаллизация развивается под углом около  $45^\circ$  по отношению к начальному направлению каждого фронта (рис. 4). В каждом из двух фронтов вдоль дендритов металла расположены поры, хотя размеры пор и их тип несколько отличаются и зависят от параметров процесса. Особый интерес представляет зона встречи двух фронтов – аксиального и радиального, для которой характерно наличие зоны более крупных пор (рис. 4).

В процессе затвердевания газара при взаимодействии радиального и аксиального фронтов кристаллизации рост газозвтектических колоний имеет следующие стадии: 1 – радиальный рост от каждого

кристаллизатора, 2 – параллельный рост колоний в пределах каждого фронта, 3 – поворот колоний в процессе роста при встрече фронтов кристаллизации на угол  $30-110^\circ$ , величина которого зависит от соотношения интенсивностей кристаллизации каждого фронта, 4 – совместный (параллельный) рост колоний каждого фронта кристаллизации. В слитке образуется зона пор слияния, которые имеют больший диаметр, чем поры основного газара. Расплав в процессе затвердевания вытесняется в область аксиальной кристаллизации, а уровень зоны радиальной кристаллизации остаётся на уровне его заливки.

Наиболее однородная и дисперсная пористая структура, как в пределах фронтов кристаллизации,



**Рис. 3.** Схема кристаллизации газара с аксиальным и радиальными холодильниками кристаллизации



Рис. 4. Макроструктура медного газа с радиальным и аксиальным фронтами кристаллизации и наличием крупных пор слияния: а – продольное сечение; б – поперечное сечение отливки ( $P_{нас.} = 0,1$ , а  $P_{кр.} = 0,05$  МПа)

так и в зонах их встречи, получается при увеличении давления насыщения и кристаллизации (рис. 4, 5), а не только скорости кристаллизации, как в обычных эвтектиках. На рисунках хорошо видно, что увеличение объема металла наблюдается в той части слитка, где проходила аксиальная кристаллизация и вытеснение жидкого металла.

Зона радиальной кристаллизации имеет высоту залитого жидкого металла. Это свидетельствует о том, что затвердевание газа в этой зоне идет по всей его высоте, что приводит к вытеснению жидкого металла в зону аксиальной кристаллизации. Однако снижение прочности газаров по зоне пор слияния значительно больше (в 1,5-2,5 раза) по отношению к образцам с двумя аксиальными холодильниками при тех же параметрах плавки [7].

При кристаллизации газаров с двумя холодильниками (рис. 6), два фронта кристаллизации движутся навстречу друг другу с образованием зоны пор слияния в центре отливок. В месте встречи фронтов кристаллизации происходит их изгиб и затем рост кристаллов продолжается в вертикальном направлении. Исследования показали, что при соотношении давлений  $P_{кр.} \leq P_{нас.}$  структура слитков медного газа имеет заметные дефекты в виде укрупнённых пор на стыке двух фронтов кристаллизации (рис. 7, а, б).

Наилучшие результаты с точки зрения получения однородной структуры отливки получены при изменяющемся давлении  $P_{кр.}$ . После заливки расплава с давлением водорода  $P_{нас.} = 0,05$  МПа, его начинают кристаллизовать с возрастающим давлением  $P_{кр.}$ . Давление  $P_{кр.}$  изменяли со скоростью 0,01 МПа/с до величины – 0,5 МПа. В структуре такой отливки отсутствуют поры слияния двух фронтов, хорошо видна равномерная пористость и однородная структура



Рис. 5. Макроструктура медного газа, полученного при различных параметрах процесса: а, б –  $P_{нас.} = 0,2$ , а  $P_{кр.} = 0,1$  МПа; в –  $P_{нас.} = 0,3$  и  $P_{кр.} = 0,4$  МПа; г –  $P_{нас.} = P_{кр.} = 0,3$  МПа

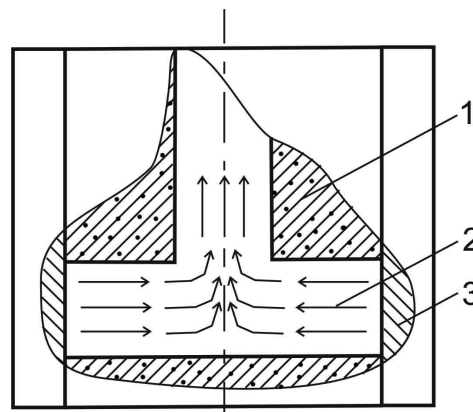
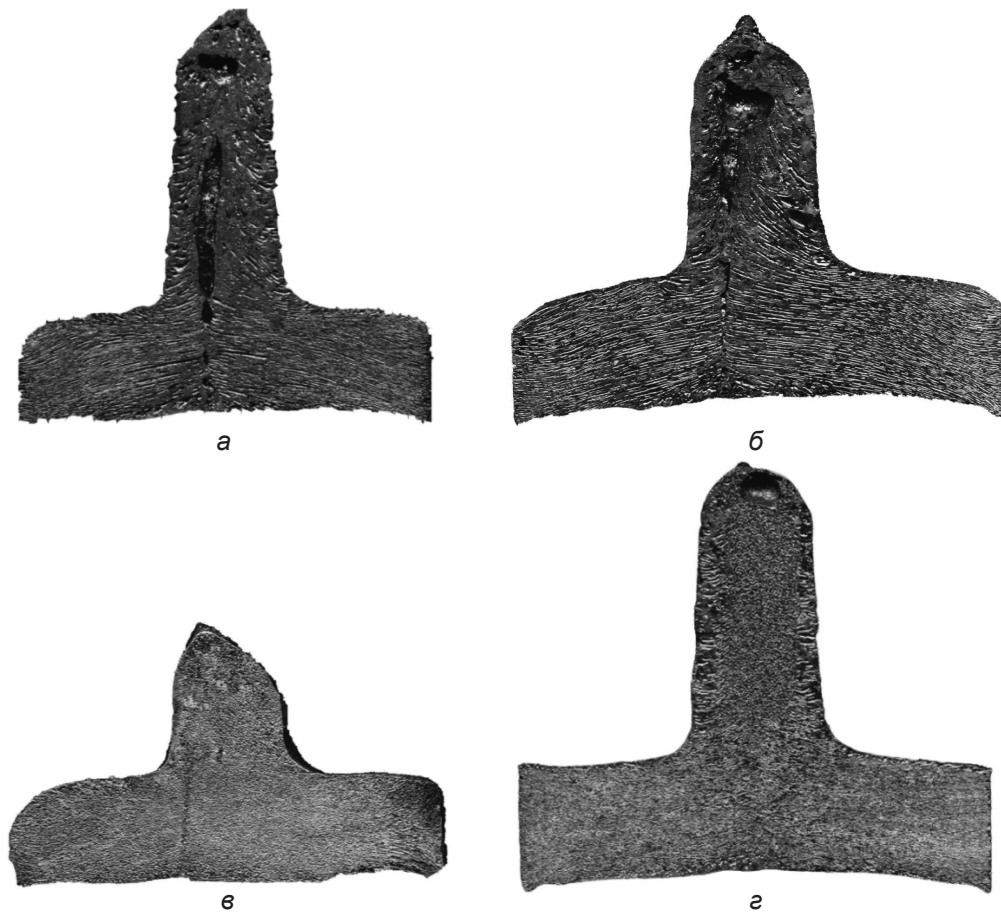


Рис. 6. Схема кристаллизации газа с двумя холодильниками



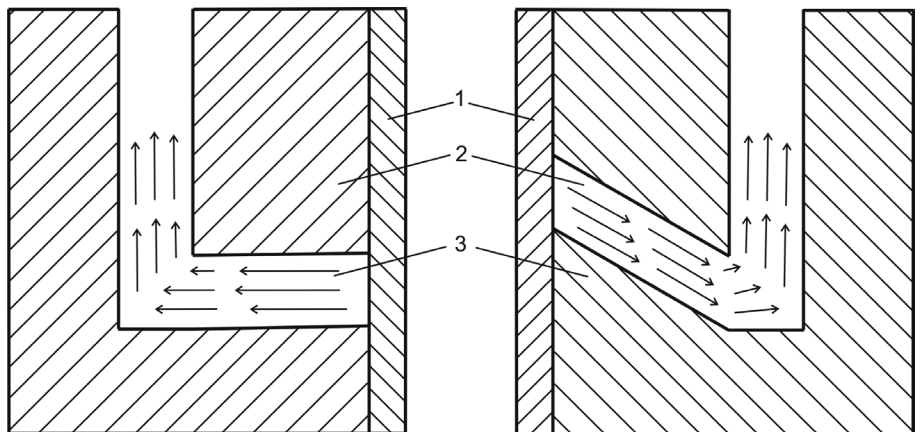
**Рис. 7.** Вид структур газаров, полученных при низких давлениях; а –  $P_{\text{нас.}} = 0,1$ , а  $P_{\text{кр.}} = 0,05$  МПа; б –  $P_{\text{нас.}} = P_{\text{кр.}} = 0,15$  МПа; в –  $P_{\text{нас.}} = P_{\text{кр.}} = 0,8$  МПа; г –  $P_{\text{нас.}} = P_{\text{кр.}} = 1,4$  МПа

газовзвешиваемых колоний (рис. 7, в, г). Таким образом, увеличение давления  $P_{\text{кр}}$  в  $1,5 \div 10$  раз по отношению к  $P_{\text{нас}}$  приводит к получению более однородной пористой структуры отливки газа.

С целью исключения появления грубых пор слияния и получения однородной структуры слитков необходимо повышать давление кристаллизации. При этом есть опасность снизить общую пористость, однако можно получить выигрыш по прочностным характеристикам газара.

Была поставлена задача определить условия проявления этого эффекта при более высоких давлениях насыщения ( $P_{\text{нас}}$ ) и установить необходимость проведения кристаллизации газара с нарастающим давлением. Давление кристаллизации ( $P_{\text{кр}}$ ) в данных экспериментах было равно давлению насыщения ( $P_{\text{нас}}$ ) и изменялось от 0,5 до 1,4 МПа. Установлено, что с повышением давлений насыщения и кристаллизации структура слитка газара становится более однородной, пористость – более равномерной, а диаметр пор в зонах кристаллизации и диаметр пор слияния практически не отличаются. Наиболее однородная структура отливки наблюдалась при давлениях насыщения и кристаллизации, равных  $1,3 \div 1,4$  МПа (рис. 7, г).

При кристаллизации газаров с изменением направления кристаллизации определяющим фактором формирования структуры слитков является направление теплоотвода. Поэтому для изменения направления роста пор необходимо менять направление теплоотвода, что можно реализовать при помощи дополнительных кристаллизаторов, которые включаются при приближении к ним фронта кристаллизации. Однако если форма имеет изгибы и один кристаллизатор (рис. 8), то фронт кристаллизации газара должен повторить изгибы формы, и в результате получается изогнутая пористая структура отливки, характер которой должен зависеть от угла изгиба формы.



**Рис. 8.** Форма, которая имеет изгибы и один кристаллизатор

Макроструктура полученных отливок свидетельствует о том, что изменение направления изгиба формы по отношению к направлению теплоотвода практически не влияет на направление роста газозвтектических колоний в начальный период кристаллизации газа (рис. 9).

В момент поворота фронта кристаллизации в обоих случаях изменился характер структуры отливок. В этот период затвердевания по-видимому возникли трудности с отводом водорода в процессе кристаллизации, что привело к блокированию роста газозвтектических колоний и образованию структуры грубого конгломерата фаз (рис. 9). Повышение давлений процесса способствовало получению более однородной и дисперсной пористости в структуре отливок. В них также наблюдается зона роста газозвтектических колоний в направлении, противоположном отводу тепла, независимо от угла изгиба формы (рис. 9). Затем при изгибе фронта кристаллизации направленный рост колоний подавляется и образуется пористая ненаправленная структура газа (рис. 9, а, б), что связано с затруднённой отвода водорода.

Очевидно, угол изгиба формы  $90^\circ$  оказался более благоприятным для ухода водорода, чем угол  $60^\circ$ , так как в последнем случае наблюдали более крупные поры структуры грубого конгломерата. Эти эксперименты наглядно показали необходимость качественного прогрева формы во избежание формирования вторичных фронтов кристаллизации от её стенок (рис. 9, б). Видно, что в данном эксперименте форма была недостаточно прогрета и это привело к формированию заметного встречного фронта кристаллизации с образованием значительной поры.

В процессе кристаллизации газара структура слитка Г-образной формы при изменении фронта кристаллизации формируется по двум стадиям: 1 – рост газозвтектических колоний в направлении, противоположном отводу тепла от кристаллизатора независимо от угла изгиба формы; 2 – рост колоний и образование либо ненаправленной пористой структуры, либо структуры грубого конгломерата разной степени дисперсности в зависимости от величины давления  $P_{кр.}$ . Формирование структуры таких слитков газара связано с изменением условий отвода водорода в процессе кристаллизации, которые более благоприятны для угла поворота фронта кристаллизации  $90^\circ$ .

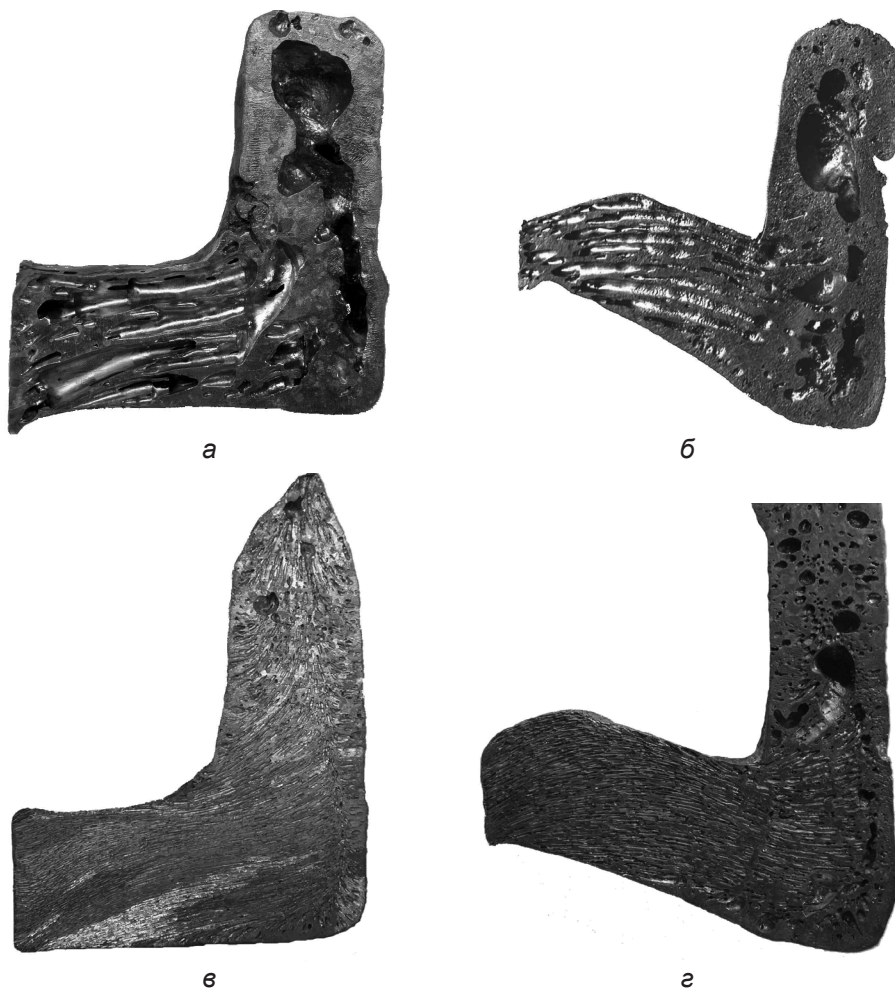
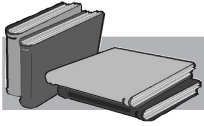


Рис. 9. Общий вид макроструктуры слитков из медного газара с изгибающим (90 и  $60^\circ$  от вертикали) фронтом кристаллизации; а, б –  $P_{нас.} = 0,2$  МПа,  $P_{кр.} = 0,05$  МПа; в, г –  $P_{нас.} = P_{кр.} = 0,3$  МПа

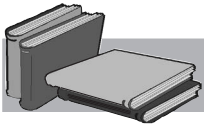
## Выводы

Показаны возможности получения отливок сложной формы из медных газаров. В местах встречи фронтов кристаллизации образуются зоны пор слияния, размеры которых значительно превышают размеры пор в газозвтектических колониях. Уменьшению размеров пор слияния способствует повышение давлений кристаллизации  $P_{кр.}$  и насыщения  $P_{нас.}$ . Для стабильного протекания газозвтектического превращения и обеспечения наиболее однородной и стабильной структуры слитка медного газара как при наличии двух взаимодействующих фронтов кристаллизации, так и при изменении направления фронта кристаллизации необходимо обеспечить: минимальное движение расплава в ходе кристаллизации; постоянство и стабильность температурного градиента в форме с расплавом; постоянство или стабильность изменения во времени давления кристаллизации; свободный уход расплава и водорода от фронта кристаллизации; отсутствие зон перемерзания для свободного ухода избыточного водорода; повышение давлений до  $P \approx 1,3-1,4$  МПа.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Шаповалов В. И. Взаимодействие водорода с медью, магнием и алюминием при высоких температурах и давлениях / В. И. Шаповалов, Н. П. Сердюк. – Изв. вуз. Цветные металлы, 1982. – № 1. – С. 69-73.
2. Карпов В. Ю. Возможность получения пористого материала на базе сплава АМг3 / В. Ю. Карпов, В. В. Карпов // Теория и практика металлургии. – № 4, 5 (53,54). – 2006. – С. 69-73.
3. Карпов В. В. Физико-механические свойства газаров / В. В. Карпов, В. Ю. Карпов, В. И. Шаповалов // Тезисы международной конференции ВОМ-2007, Донецк, Май 21-25. 2007. – С. 581-585.
4. Карпов В. Ю. Газары – новый вид литых пористых материалов // Литье: Технологии и оборудование. – № 2. – 2011. – С. 92-95.
5. Карпов В. В. Формирование отливок газаров со сложной структурой: сборник научных трудов. Выпуск 64. / В. В. Карпов, С. И. Губенко, В. Ю. Карпов // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ПДАБА, 2012. – С. 324-329.
6. Шаповалов В. И. Литые пористые сплавы: производство, структура, свойства, применение / В. И. Шаповалов // Металл и литье Украины. – 1995. – № 2. – С. 2-10.
7. Шаповалов В. И. Легирование водородом / В. И. Шаповалов. – Днепропетровск: Журфонд, 2013. – 385 с.



## REFERENCES

1. Shapovalov V. I., Cerduk N. P. (1982). *Vzaimodeistvie vodoroda s medu, magniem I aluminiem pri visokix temperaturax I davleniyx [Hydrogen interaction with copper, magnesium and aluminum at high temperatures and pressures]*. Izvesriy vuzov. Cvetnay metalurgiy, vol 1, 69-73 (in Russian).
2. Karpov V. U., Karpov V. V. (2006) *Vozmoznosti polucheniya poristogo materiala na baze splava AМg3 [Possibility of producing a porous material based alloy АМg3]*. Teoriy i praktika metalurgii, Vol 4, 5. (53,54), 69-73. (in Russian).
3. Karpov V. U., Karpov V. V., Shapovalov, V. I. (2007). *Fiziko-mexanicheskie svoistva gazarov [Physical and mechanical properties Gasarov]* Tezisi Medunarodnoi konhperensii BOM-2007(Doneck, May 21-25, pp. 581-585). (in Russian).
4. Karpov V. U. (2011). *Gazari – noviy vid litix poristix materialov [Gazary - a new kind of cast porous materials]*. Lityo: Texnologii i oborudovanie, 2, 92-95. (in Russian).
5. Karpov V. V., Gubenko S. I., Karpov V. U. (2012). *Formirovanie otlivok gazarov so slohnoy struktyroy [Formation Gasarov castings with complex structure]*. Stroytelstvo, materialovedenie, mashinostroenie, sbornik nauchnix trudov. Vipusk 64, PDABA, 324-329. (in Russian).
6. Shapovalov V. I. (1995) *Litie poristie splavi: proizvodstvo, struktura, svoistva, primenenie [Cast porous alloys: production, structure, properties, applications]*. Metal I litie Ukraini, 2, 2-10. (in Russian).
7. Shapovalov V. I. (2013). *Legirovanie vodorodom [Doping of hydrogen]*. Dn-vsk: Zurfond (in Russian).

### Анотація

Карпов В. Ю., Губенко С. І., Карпов В. В.  
Формування структури мідних газарів складної форми

Розглянуто особливості формування структури мідних газарів складної форми. Показано, що при наявності декількох фронтів кристалізації в одній формі вони взаємодіють між собою з утворенням дефектної зони у вигляді пір злиття. Виявлено відмінності в структурі при формуванні виливків залежно від орієнтації холодильників. Розглянуто способи усунення дефектної зони виливків.

### Ключові слова

газар, тиск насичення, кристалізація, розплав, пористість, пори злиття

### Summary

Karpov Y., Gubenko S., Karpov V.  
Structure formation for complex-shape copper gasars

The peculiarities of the complex-shape copper gasars structure formation are examined. It is shown that in the presence of several crystallization fronts in one mold they interact and defective zone in the form of merger pores appears. The differences of structure during the castings formation depending on coolers orientation are found out. The methods of castings' defective zone reduce are considered.

### Keywords

gasar, saturation pressure, crystallization, melt, porosity, pores of the merger

Поступила 16.02.2016