



УДК 669.715:621.746.0012

Трегубенко Г. Н. /д. т. н./,  
Поляков Г. А., Лелеко Д. В.,  
Трегубенко А. В., Тенигин В. О.

Национальная металлургическая академия Украины

## Исследование влияния технологических факторов на процесс образования газовой пористости в отливках из алюминия и его сплавов

*Исследованы закономерности поведения водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов в зависимости от таких технологических факторов как внешнее давление газовой фазы, скорость затвердевания, массы и размеров отливки, перегрева металла, материала формы, скорости заливки, состава жидкого и твердого металла, а также толщины удаляемого слоя при термо- и механической обработке. Результаты работы можно применять на практике с целью оптимизации технологического процесса и более эффективного использования дорогостоящего оборудования для получения качественных отливок из алюминия и его сплавов. Библиогр.: 9 назв.*

**Ключевые слова:** технология, алюминий, кристаллизация, водород, газовая пористость, отливка

*The regularities of the hydrogen in the crystallization behavior of aluminum and its alloys according to process factors, such as the external pressure of the gas phase, the rate of solidification of the casting weight and dimensions, heat the metal mold material, pouring rate, composition of the liquid and solid metal, and the thickness of the sacrificial layer and the thermo – mechanical processing. The results can be put into practice in order to optimize the process and more efficient use of expensive equipment to produce quality castings of aluminum and its alloys.*

**Keywords:** technology, aluminum, crystallization, hydrogen gas porosity, casting

Алюминий является одним из важнейших металлов как для экономики Украины, так и других стран. Сейчас в мире производится около 40 млн тонн алюминия в год, и по объемам его потребления он уступает только стали. Алюминий используется практически во всех областях человеческой деятельности, поэтому актуальной задачей является получение качественных металлоизделий из алюминия и его сплавов.

Анализ закономерностей взаимодействия газов с алюминием и его сплавами позволяет заключить, что преобладающая часть дефектов при их производстве в той или иной мере связана с газами. При этом основное негативное влияние на качество изделий из алюминия и его сплавов оказывает водород, содержание которого в металле составляет не менее 90 % от общего объема газов. Основным его источником является атомарный водород, образующийся при диссоциации водяного пара адсорбируемого из воздуха, шихты, стенок тиглей или формы, а также его реакции с алюминием. Помимо водорода расплавленный алюминий может поглощать оксид и диоксид углерода, азот, кислород и другие газы.

Дефекты литого металла можно разделить на две группы: газовая пористость и неметаллические включения. Газовая пористость значительно ухудшает механические и эксплуатационные свойства алюминия и его сплавов. Поэтому минимизация количества газовых пор и их размеров при производстве алюминия является очень важной и актуальной задачей.

Основное влияние на процесс образования газовой пористости оказывает выделяющийся при кристаллизации водород, что связано с резким скачкообразным изменением его растворимости с 0,69 (расплав) до 0,036 см<sup>3</sup>/100 г (твердая фаза). Поэтому растущие кристаллы содержат намного меньше водорода, избыток которого выделяется в оставшуюся жидкую фазу.

В реальных промышленных условиях при плавке алюминия и его сплавов содержание водорода в расплаве значительно превышает его растворимость при температуре солидус, поэтому для полного или частичного предотвращения вредного влияния газов на свойства изделий необходимо проведение ряда технологических мероприятий. Например, применение полу- или непрерывного

литья для получения слитков из алюминия и его деформируемых сплавов, в которых грубая газовая пористость – сравнительно редкое явление [1]. Что же касается производства качественных отливок из алюминия и его литейных сплавов, то для снижения газовой пористости применяют различные виды рафинирования [2-4], давление на металл после его заливки в форму, ускорение процесса затвердевания, усиление питания отливок и обеспечение направленного их затвердевания [5].

Однако в настоящее время указанные достаточно дорогие технологические мероприятия для получения качественных отливок проводят без предварительной их привязки к оптимальной величине газовой пористости (I-III балла по ГОСТ 1583-93 «Сплавы алюминиевые литейные» [6]). Это приводит к значительному удорожанию технологического процесса за счет не оптимального использования дорогостоящего оборудования (увеличивается время рафинирования, используются завышенные давления или скорости охлаждения и т. п.). Поэтому целью настоящей работы являлось определение максимальной величины исходного содержания водорода в расплаве, при которой при кристаллизации будет еще формироваться оптимальная пористость (I-III балла по ГОСТ 1583-93) и отсутствовать газовые раковины на поверхности отливок из алюминия и его сплавов, производимых при разных технологических условиях.

При затвердевании отливок из алюминия и его сплавов, в обычных условиях, скорость кристаллизации большая, но не достаточно высокая, чтобы зафиксировать весь исходный водород в твердой фазе. В этом случае происходит частичная его фиксация, в большей степени, чем меньше отливка и выше ее коэффициент объемного затвердевания

$$[H]_S = \psi[H]_T + [H]_{суд}, \quad (1)$$

где  $[H]_S$  – содержание водорода в твердой фазе,  $см^3/100$  г металла;  $[H]_T$  – растворимость водорода в твердом металле при температуре солидус,  $см^3/100$  г металла;  $\psi$  – степень пересыщения твердого раствора водородом;  $[H]_{суд}$  – содержание водорода связанного в гидриды существующих при температурах кристаллизации,  $см^3/100$  г металла.

Вскоре после начала затвердевания металла перед движущимся фронтом кристаллизации образуется обогащенный водородом пограничный диффузионный слой и устанавливается стационарный режим. Для стационарного распределения, когда количество водорода скапливающееся в расплаве у фронта затвердевания в единицу времени будет равно его количеству, диффундирующему от фронта кристаллизации через пограничный слой в объем жидкой фазы, можно записать [7]

$$[H]_{(x)} = [H]_{об} \left[ 1 + \frac{1 - \kappa}{\kappa} \exp\left(-\frac{v_{кр}}{D_H} x\right) \right], \quad (2)$$

где  $[H]_{(x)}$  – локальная концентрация водорода в расплаве в пределах диффузионного слоя на расстоянии  $x$  от фронта кристаллизации,  $см^3/100$  г металла;  $[H]_{об}$  – текущая концентрация водорода в объеме расплава,  $см^3/100$  г металла;  $\kappa$  – эффективный коэффициент распределения водорода, равный  $[H]_s / [H]_{об}$ ;  $v_{кр}$  – линейная скорость кристаллизации,  $см/с$ ;  $D_H$  – коэффициент диффузии водорода в жидкой фазе,  $см^2/с$ .

Уравнение (2), при условии  $x = 0$ , превращается в выражение для определения концентрации водорода в расплаве на фронте кристаллизации

$$[H]_{ф.к.} = \frac{[H]_{об}}{\kappa} = \frac{[H]_{об}^2}{[H]_s}, \quad (3)$$

где  $[H]_{ф.к.}$  – содержание водорода в расплаве на фронте кристаллизации,  $см^3/100$  г металла.

Если при кристаллизации алюминия и его сплавов еще не происходит газовой выделение, тогда, пренебрегая избытком водорода в диффузионном слое и его недостатком в наружной корке отливки, учитывая их очень малую толщину и то, что эти величины практически компенсируют друг друга, можно записать балансовое уравнение для перераспределения водорода

$$\chi\psi[H]_T + (1 - \chi)[H]_{об} = [H]_0, \quad (4)$$

где  $\chi$  – доля закристаллизовавшегося металла;  $[H]_0$  – исходное содержание водорода в расплаве,  $см^3/100$  г металла.

Отсюда

$$[H]_{об} = \frac{[H]_0 - \chi\psi[H]_T}{1 - \chi} \quad (5)$$

Из выражений (2), (3) и (5) следует, что по мере затвердевания отливок из алюминия и его сплавов содержание водорода в объеме расплава и на фронте кристаллизации увеличивается. При этом если  $[H]_{ф.к.}$  превысит предел растворимости водорода в жидком металле на некоторое пересыщение, то может начаться образование новой фазы – газовых пузырей. Величина пересыщения расплава водородом зависит от условий, при которых происходит образование пузырька. Для начала газовой выделение

необходимо, чтобы суммарное равновесное давление газов на фронте кристаллизации превысило величину противодавления, препятствующую образованию газовых пузырей [1]

$$P_z > P_{вн} + P_{ф} + P_{к}, \quad (6)$$

где  $P_z$  – суммарное равновесное давление газов, Па;  $P_{вн}$  – внешнее давление газовой фазы, Па;  $P_{ф}$  и  $P_{к}$  – ферростатическое и капиллярное давление, Па.

Учитывая, что основное влияние на процесс образования газовой пористости в отливках из алюминия и его сплавов оказывает водород, то можно пренебречь выделением других газов в пузырьри. Если рассматривать верхний слой металла в форме в ходе ее заливки, то в правой части неравенства (6) можно пренебречь влиянием ферростатического давления. В равной степени, учитывая уменьшение величины капиллярного давления с ростом зародышей газовой фазы, исключение последнего слагаемого в (6) ужесточает условия газовой выделении. Тогда на основании закона Сиверта и неравенства (6) получим условие образования газовой пористости при кристаллизации алюминия и его сплавов

$$\frac{[H]_{ф.к.}^2}{k_H^2} > P_{вн}, \quad (7)$$

где  $k_H$  – константа равновесия реакции растворения водорода в жидком алюминии, Па<sup>1/2</sup>·см<sup>3</sup>/100 г.

Используя выражения (1), (3) и (5), неравенство (7) можно записать следующим образом

$$[H]_0 > \chi \psi [H]_T + (1 - \chi) \sqrt{\psi [H]_T k_H \sqrt{P_{вн}} + [H]_{сид.}}, \quad (8)$$

На основании математической модели Куманина-Вейника, применяемой для теоретической оценки пористости отливок [8], можно определить связь между ее оптимальной величиной по ГОСТ 1583-93 и  $\chi$  из неравенства (8)

$$\chi_1^{\max} = 1 - \frac{P}{\gamma_2} \approx 1 - \frac{\sum S_n}{\gamma_2}, \quad (9)$$

где  $\chi_1^{\max}$  – максимальная доля закристаллизованного металла, при которой еще нет газовой

деления;  $\gamma_2$  – коэффициент пропорциональности в модели Куманина-Вейника;  $P$  – величина оптимальной газовой пористости;  $\sum S_n$  – суммарная площадь пор на 1 см<sup>2</sup> поверхности макрошлифа, см<sup>2</sup>.

Для определения максимальной величины исходного содержания водорода в расплаве, при которой при кристаллизации будет еще формироваться оптимальная газовой пористость в отливках из алюминия и его сплавов, следует в выражениях (8) и (9) подставлять необходимую величину  $\sum S_n$  в соответствии с табл. Б. 1 ГОСТа 1583-93 [6], в которой приведено допустимое количество пор на 1 см<sup>2</sup> поверхности шлифа и их диаметр в зависимости от номера эталона степени пористости.

Для того, чтобы в процессе производства отливок из алюминия и его сплавов (например, при термо- или механической обработке) на их поверхности не образовывались газовые раковины (открытая пористость), необходимо, чтобы газовой выделение начиналось не сразу, а после образования беспузыристой корки нужной толщины

$$\chi_2^{\max} = \frac{\kappa_{об} S_{нов} \sqrt{\tau}}{V} - \frac{\Delta T_0 C}{w}, \quad (10)$$

где  $\chi_2^{\max}$  – доля закристаллизованного металла, образовавшаяся к моменту образования беспузыристой корки нужной толщины;  $\kappa_{об}$  – коэффициент объемного затвердевания для металла, залитого при температуре кристаллизации, м/с<sup>0,5</sup>;  $S_{нов}$  и  $V$  – площадь поверхности и объем отливки, соответственно, м<sup>2</sup> и м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, прошедшее с момента соприкосновения расплава с формой до образования беспузыристой корки необходимой толщины, с;  $\Delta T_0$  – перегрев металла выше температуры затвердевания, °С;  $C$  – теплоемкость жидкого алюминия или его сплавов, Дж/°С;  $w$  – количество тепла затвердевания, Дж.

Время, необходимое для образования беспузыристой корки, можно выразить следующим образом

$$\tau = \tau_3 + \tau_k = \frac{H}{v_3} + \left( \frac{d}{\kappa_l} \right)^2, \quad (11)$$

где  $\tau_3$  – время заливки расплава в форму, с;  $\tau_k$  – время, прошедшее с момента наполнения формы до образования беспузыристой корки, с;  $H$  – высота отливки, м;  $v_3$  – скорость заливки, м/с;  $d$  – необходимая толщина беспузыристой корки, м;  $\kappa_l$  – коэффициент линейного затвердевания для металла, залитого при температуре кристаллизации, м/с<sup>0,5</sup>.

Таким образом, на основании выражений (8)- (11) можно записать:

$$[H]_0^{\max 1} = \left(1 - \frac{\sum S_n}{\gamma_2}\right) \psi[H]_T + \frac{\sum S_n}{\gamma_2} \sqrt{\psi[H]_T k_H \sqrt{P_{\text{вн}}} + [H]_{\text{зуд.}}}, \quad (12)$$

$$[H]_0^{\max 2} = \chi_2^{\max} \psi[H]_T + (1 - \chi_2^{\max}) \sqrt{\psi[H]_T k_H \sqrt{P_{\text{вн}}} + [H]_{\text{зуд.}}}, \quad (13)$$

$$\chi_2^{\max} = \frac{K_{\text{об}} S_{\text{нов}}}{V} \sqrt{\frac{H}{\nu_3} + \frac{d^2}{\kappa_l^2}} - \frac{\Delta T_0 C}{w}, \quad (14)$$

где  $[H]_0^{\max 1}$  – максимальная величина исходного содержания водорода в расплаве, при которой при кристаллизации будет еще формироваться оптимальная газовая пористость,  $\text{см}^3/100 \text{ г}$ ;  
 $[H]_0^{\max 2}$  – максимальная величина исходного содержания водорода в расплаве, при которой в процессе производства отливок на их поверхности не образуются газовые раковины,  $\text{см}^3/100 \text{ г}$ .

Для определения по полученным выражениям (12)-(14) максимальной величины исходного содержания водорода в расплаве, при которой будет еще формироваться оптимальная газовая пористость и отсутствуют газовые раковины на поверхности отливок из алюминия и его сплавов, необходимо выбрать наименьшее значение из рассчитанных  $[H]_0^{\max 1}$  и  $[H]_0^{\max 2}$ .

Правомерность применения на практике полученных выражений (12)-(14) подтверждается анализом экспериментальных данных приведенных в работе [9].

#### Выводы

В работе установлено влияние на поведение водорода и формирование газовой пористости при кристаллизации алюминия и его сплавов, внешнего давления газовой фазы, скорости затвердевания, массы и размеров отливки, перегрева металла, материала формы, скорости заливки, состава, теплофизических и физико-химических свойств жидкого

и твердого металла, а также толщины удаляемого слоя при термо- и механической обработке.

На основании полученных выражений можно теоретически рассчитывать максимальную величину исходного содержания водорода в расплаве, при которой при кристаллизации будет еще формироваться оптимальная пористость (I-III балла по ГОСТ 1583-93) и отсутствуют газовые раковины на поверхности отливок из алюминия и его сплавов, производимых при разных технологических условиях.

Применение на практике результатов работы позволит оптимизировать технологический процесс и более эффективно использовать дорогостоящее оборудование для получения качественных отливок из алюминия и его сплавов.

#### Библиографический список

1. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах / Д. Ф. Добаткин, Р. И. Габидуллин, Б. А. Колачев и др. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
2. Физико-химические процессы рафинирования алюминия и его сплавов / В. И. Наполков, С. В. Махов, Б. П. Бобрышев, В. С. Моисеев – М.: Теплотехник, 2011. – 490 с.
3. Электроплавка алюмосиликатов / М. И. Гасик, Б. И. Емлин, Н. С. Климкович, С. И. Хитрик – М.: Металлургия, 1971. – 304 с.
4. А.с. 1286638 СССР, МКН<sup>4</sup> С22С1/02. Способ получения алюминиево-кремниевых сплавов / М. И. Гасик, А. В. Венцовский, Б. О. Вайсман и др. – Оpubл. 12.04.1979, бюл. № 4.
5. Хрычиков В. Е., Меняйло Е. В. Литейное производство черных и цветных металлов – Днепропетровск: НМетАУ, 2010. – 89 с.
6. ГОСТ 1583-93 (ДСТУ 2839-94) «Сплавы алюминиевые литейные». Разработан Донецким гос. ин-том цветных металлов. Дата введения с 01.01.1997 г.
7. Мазур В. И., Мазур А. В. Введение в теорию сплавов – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2009. – 264 с.
8. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. II. Формирование макроскопического строения отливки. – М.: Машиностроение, 1979. – 335 с.
9. Альтман М. Б., Лебедев А. А., Чухров М. В. Плавка и литье легких сплавов. – М.: Металлургия, 1989. – 680 с.

Поступила 26.02.2013

## **АВТОРАМ!**

*Продажа авторских экземпляров журнала.*

**контактный телефон: 056-744-81-66**

**(факс): 0562-46-12-95**