

---

## ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 621.746.6:669.715-41

**Ф. М. Котлярский**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### О ВЛИЯНИИ ГАЗОВОЙ ПОРИСТОСТИ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Показано, что локальная негерметичность отливок из наводороженных алюминиевых сплавов, формирующихся в условиях недостаточного питания, может быть следствием неравномерного участия газовых пузырьков в компенсации усадки затвердевания. Проанализирована роль факторов, влияющих на этот процесс.*

**Ключевые слова:** негерметичность отливок, алюминиевые сплавы, газовые пузырьки, наводороживание.

*Показано, що локальна негерметичність виливків з наводнених алюмінієвих сплавів, які формуються в умовах недостатнього живлення, може бути наслідком нерівномірної участі газових бульбашок в компенсації усадки тверднення. Проаналізована роль факторів, які впливають на цей процес.*

**Ключові слова:** герметичність виливків, алюмінієві сплави, газові бульбашки, наводнення.

*It is grown that local leakade of casting made of hydrogenated aluminum alloys, which are formed under insutticient power supplies, may be a consequence of irregular participation of gas bubbles in compensation of solidification shrinkage. The vole of influencing factors analysed.*

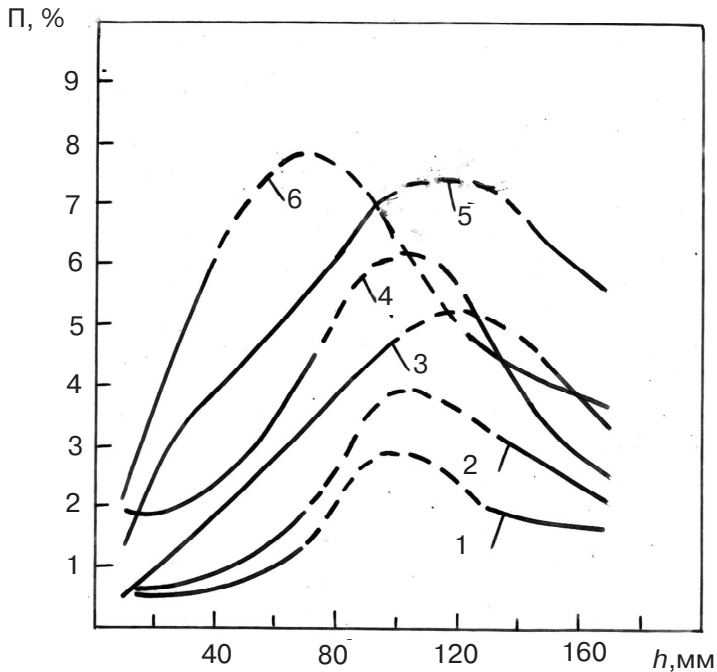
**Keywords:** casting tightness, aluminum alloys, gas bubbles, hydrogenation.

Известны примеры получения герметичных бесприбыльных отливок из алюминиевых сплавов путем наводороживания расплава и компенсации усадки затвердевания рассредоточенной газовой пористостью [1, 2], а также теоретические обоснования этого эффекта [3, 4].

В то же время опыт литья наводороженных алюминиевых сплавов в ФТИМС НАН Украины говорит о том, что для достижения стопроцентной герметичности требуется тщательная отработка технологических режимов с привлечением внешних воздействий типа вакуума, давления и др. Наиболее часто негерметичность фиксируется в местах окончания затвердевания. При литье бесприбыльных цилиндрических отливок диаметром 50 и высотой 200 мм таким местом обычно является средний по высоте центральный слой (нижняя и верхняя части затвердевают быстрее благодаря торцевым эффектам). Экспериментальные данные, полученные путем продувки сжатым воздухом в воде вырезанных дисков толщиной от 10 до 2 мм из сплава АК5М2, представлены на рисунке. Участки с протяженностью сквозного канала в

## Затвердевание сплавов

осевом направлении меньше 10 мм условно считались герметичными, больше 10 мм – негерметичными. Следует отметить, что после 10 мм протяженность негерметичного участка возрастала лавинообразно до определенной длины, отмеченной на графиках пунктирными линиями. Как видно, на кривых 1-5 длина такого участка составляла около 40 мм и не зависела от величины пористости. В отдельных случаях она достигала 80 мм (кривая 6).



Распределение пористости (П) по высоте (h) бесприбыльной цилиндрической отливки диаметром 50 мм из сплава АК5М2 в зависимости от режимов наводороживания расплава и кристаллизации отливки: 1 – часовая выдержка под увлажненным асбестом при температуре 1060 °С, заливка при 850 °С и кристаллизация под избыточным давлением 0,5 МПа; 2 – часовая выдержка под увлажненным асбестом при температуре 1060 °С, заливка при 730 °С и кристаллизация половины общего времени затвердевания под избыточным давлением 0,5 МПа, вторую половину времени – под атмосферным давлением; 3 – погружение в расплав формовочной смеси (3 мин), выдержка 30 мин, заливка при 750 °С; 4 – погружение формовочной смеси, выдержка 5 мин, заливка при 750 °С; 5 – продувка расплава водяным паром, выдержка 5 мин, заливка при 750 °С; 6 – продувка водяным паром, выдержка 5 мин, заливка при 730 °С, после образования сплошного кристаллического каркаса вакуумирование до 0,05 МПа; во всех случаях толщина стенки чугунного кокиля составляет 4 мм; протяженность сквозных каналов в осевом направлении: — — от 2 до 10 мм, - - - — больше 10 мм

Одна из возможных причин данного явления описана в работе [5], на которой следует остановиться более подробно. Анализируя процесс компенсации усадки затвердевания сплава дисперсной газовой фазой после прекращения поступления расплава из питающего узла, В. И. Белик рассматривает этот процесс отдельно для условий объемного и последовательного затвердевания. Высказанные им соображения могут быть в полном объеме использованы и в нашем случае, когда при низкой интенсивности теплоотвода (толщина стенки кокиля 4 мм) кристаллический каркас в исследуемых силуминах образуется по принципу объемного затвердевания, а затем уже эвтектика внутри этого каркаса затвердевает последовательно. Причем, на обоих этапах образуются газовые пузырьки у фронта кристаллизации за счет перераспределения водорода между твердой и жидкой фазами. Если в условиях объемного затвердевания все газовые пузырьки на равных участвуют в

## Затвердевание сплавов

процессе компенсации усадки, то при последовательном затвердевании эвтектики этот процесс существенно усложняется, особенно в части использования ранее образовавшихся пузырьков. В питании самого поверхностного слоя также участвуют все пузырьки. Однако, по мере утолщения этого слоя количество пузырьков, участвующих в компенсации усадки затвердевания, будет уменьшаться, так как они, оказавшись в затвердевшем металле, исключаются из этого процесса. Особого внимания заслуживает ситуация, которая возникает при затвердевании последнего центрального слоя. Мало того, что к этому моменту расположенные там пузырьки увеличились по сравнению с другими до максимальных размеров в результате участия в компенсации усадки предыдущего затвердевания практически всей эвтектики, им же предстоит еще в большей мере взять на себя центральный слой. Эта ситуация усугубляется для отливки типа цилиндра или шара, у которых затвердевание последних порций расплава ускоряется, а, следовательно, больше водорода эвтектики остается в пересыщенном состоянии. При таком ходе затвердевания велика вероятность того, что в центральной зоне отливки размеры некоторых пузырьков (или хотя бы одного) под действием растущего отрицательного давления достигнут критического значения, вслед за чем происходит разрыв расплава с образованием осевого канала, нарушающего герметичность. В момент разрыва из-за падения отрицательного давления полость разрыва увеличивается за счет одновременного сокращения объема всех остальных растянутых усадкой действующих пузырьков [6].

Ориентируясь на изложенные в работе [6] соображения, проанализируем факторы изменения силового состояния затвердевающей отливки, то есть перехода положительного давления в отрицательное. Для упрощения расчетов предположим, что питание отливки прекращается мгновенно и к этому времени поступление газа в пузырьки также прекращается, а температура выравнивается.

Исходный объем пузырька  $V_0 = \frac{4}{3}\pi R_0^3$ , где  $R_0$  – начальный радиус пузырька.

Исходное давление газа в пузырьке  $P_0 = P_k + P_b$ , где  $P_k = 2\sigma / R_0$  – капиллярное давление;  $\sigma$  – поверхностное натяжение расплава;  $P_b$  – внешнее давление, включающее металлостатическое ( $P_m$ ), атмосферное ( $P_a$ ) и избыточное ( $P_{ii}$ ).

В процессе усадки объем пузырька  $V$  будет увеличиваться, а давление  $P$  газа в нем падать, но для принятых условий

$$V \cdot P = \text{const} = V_0 \cdot P_0 = \frac{4}{3}\pi R_0^3 \left( \frac{2\sigma}{R_0} + P_b \right) \approx 4R_0^2 (2\sigma + P_b \cdot R_0);$$

$$P = \frac{4R_0^2 (2\sigma + P_b \cdot R_0)}{\frac{4}{3}\pi R^3} \approx \frac{R_0^2 (2\sigma + P_b \cdot R_0)}{R^3},$$

где  $R$  – текущий радиус увеличивающегося пузырька.

Пока давление газа в пузырьке больше капиллярного, в расплаве, окружающем пузырек, давление будет положительным. В момент выравнивания капиллярного давления и в пузырьке расплав окажется под нулевым давлением (металлостатическим напором пренебрегаем), дальнейшее расширение пузырька приведет к кардинальному изменению силового состояния расплава: положительное давление, при котором частички расплава прижимаются друг к другу, сменится отрицательным, при котором эти частички под действием продолжающейся усадки будут пытаться оторваться друг от друга.

Из равенства капиллярного давления и в пузырьке определим переходной радиус  $R_{ii}$  пузырька, при котором произойдет это изменение

$$\frac{2\sigma}{R_{II}} = \frac{R_o^2 (2\sigma + P_B \cdot R_o)}{R_{II}^3}; \quad R_{II} = R_o \sqrt{1 + \frac{P_B \cdot R_o}{2\sigma}}$$

Последнее выражение включает в себя все основные факторы изменения силового состояния расплава и позволяет проанализировать роль каждого. Суть такого анализа состоит в том, чтобы по росту газового пузырька от  $R_o$  до  $R_{II}$  определить возможный резерв газовой пористости для компенсации усадки затвердевания

1.  $R_{II} = f(R_o)$ . При наиболее часто встречающихся значениях

$$P_B = P_a = 10^5 \text{ Па}, \quad \sigma = 0,85 \text{ н/м}; \quad R_{II} = R_o \sqrt{1 + 5,9 \cdot 10^4 R_o}$$

$R_o, \text{ м}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$
$R_{II}, \text{ м}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$27,5 \cdot 10^{-4}$	$7,81 \cdot 10^{-3}$	$24,5 \cdot 10^{-2}$

Как видно, чем крупнее исходный пузырек, тем больше его вклад в полезную газовую пористость. Эффективность очень мелких пор с начальным радиусом до 10 мкм незначительная. Если размеры допустимых пор в литом металле ограничить радиусом до 2 мм, то основного прироста следует ожидать от пузырьков с начальным радиусом 0,1-0,5 мм.

2.  $R_{II} = f(\sigma)$ . Поверхностное натяжение модифицированных натрием алюминиевых сплавов опускается до 0,6 н/м. При  $P_B = P_a$ ,  $R_o = 5 \cdot 10^{-4}$  м,  $R_{II} = 32,7 \cdot 10^{-4}$  м, то есть по сравнению с немодифицированным расплавом переходной радиус увеличился почти на 20 %, что существенно.

3.  $R_{II} = f(P_B)$ . При автоклавном литье используют избыточное давление до 0,5 МПа, то есть абсолютная величина давления равна  $6 \cdot 10^5$  Па. При  $R_o = 5 \cdot 10^{-4}$  м,  $\sigma = 0,85$  н/м,  $R_{II} = 66,5 \cdot 10^{-4}$  м. По сравнению с литьем под атмосферным давлением переходной радиус пузырька увеличился в 2,4 раза. В этих условиях ощутимым окажется рост и более мелких пузырьков. Таким образом, в плане компенсации усадки затвердевания дисперсной газовой фазой получение герметичных отливок из наводороженных алюминиевых сплавов под избыточным газовым давлением заслуживает особого внимания. При этом важно, чтобы перед прекращением питания отливки или металлоемкого узла в расплаве успели образоваться пузырьки радиусом около 0,1 мм. Эффективность пузырьков, образующихся позже, будет падать по мере снижения давления в результате усадки.



### Список литературы

1. *Пластинин В. А.* Получение алюминиевого литья в кокиль с применением вакуума // Прогрессивная технология литейного производства. – Горький: ВВКИ, 1969. – С. 466-469.
2. *Котлярский Ф. М.* О возможности получения герметичных бесприбыльных отливок из алюминиевых сплавов // Литейн. пр-во. – 1998. – № 7. – С. 17-19.
3. *Котлярский Ф. М.* Теоретические предпосылки формирования усадочных и газовых дефектов в непротитываемых узлах отливки // Там же. – 1983. – № 7. – С. 22-24.
4. *Постников Н. С.* Высокогерметичные алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 160 с.
5. *Белик В. И.* Теоретические предпосылки использования упругих свойств расплава при получении отливок // Процессы литья. – 1994. – № 3. – С. 53-62.
6. *Белик В. И.* Условия формирования однородной пористости в отливках // Там же. – 1995. – № 3. – С. 58-66.

Поступила 01.11.2010