УДК 669.715:788

Ф. М. Котлярський, *д-р техн. наук, e-mail: onmlptima@ukr.net*

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ПОЗАПІЧНЕ НАВОДНЕННЯ ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Вміст водню в виливках з алюмінієвих сплавів залежить, в основному, від його вмісту в розплаві перед розливанням. Проте слід звернути увагу на деякі процеси, що проходять зовні пічного простору і не завжди контролюються. Так, значне збільшення вмісту водню відзначають при литті в сирі піщані форми як результат взаємодії розплаву з вологою формувальної суміші: кожні 100 мм шляху, пройденого розплавом в такій формі, добавляють приблизно 0,3 см^3/100 г водню. Газонасиченість розплаву формувальною сумішшю може бути прирівнена до зволоженого азбесту. Інтенсивність цього процесу різко посилюється при введенні в розплав модифікатора у вигляді солей натрію: введення 3 % модифікатору збільшують газовміст виливка від 1,9 до 3,5 см^3/100 г. Наводнення може мати місце і в процесі кристалізації виливка. Причому, твердненння в вологій атмосфері сильніше знижує щільність і механічні властивості порівняно з плавкою в вологій атмосфері. У ряді випадків цей ефект використовують для усунення браку по усадочним дефектам типу тріщин та утяжин шляхом оббризкування водою відповідних ділянок пофарбованого кокілю. Наводнення не виключається також після повного затвердіння виливка із-за взаємодії з парами води атмосфери, наприклад, при термічній обробці. Позапічне наводнення алюмінієвих сплавів потенційно бере участь в майбутньому водневому рафінуванні металу під час переплаву. Для підвищення щільності та механічних властивостей литого металу слід організовувати не тільки прискорене, але і охолодження виливка, що твердне, особливо поблизу ліквідуса.

Ключові слова: *алюмінієві сплави, виливки, позапічне наводнення, піщана форма, локальне обприскування, термічна обробка.*

Вміст водню у виливках визначається, в основному, його вмістом в розплаві перед розливанням, який, в свою чергу, регулюється природним або штучним шляхом [1]. Однак слід звернути увагу і на інші процеси, що протікають зовні пічного простору і не завжди контрольовані. Так при литті в сирі піщані форми відзначається істотне збільшення вмісту водню в виливках порівняно з рідким металом в плавильній печі [2]. Це відбувається в результаті взаємодії розплаву з вологою формувальної суміші. Так, наприклад, в виливках зі сплаву АК7 при вологості формувальної суміші 4,2–5,4 % середній вміст газів становив 2,5 см^3/100 г, що приблизно в 5 разів перевищувало вміст водню в металі після рафінування гексахлоретаном. Підвищення вологості суміші до 6,6 % супроводжувалося збільшенням вмісту газів до 4,5–5 см^3 /100 г. Кожні 100 мм шляху, пройденого металом (АК7 і АК12) в піщаній формі, додають приблизно 0,3 см^3/100 г водню.

В роботі [3] газонасичення розплаву Al+11–12,5%Si при температурі 730 ^{0}C (маса 15–18 кг) здійснювали зануренням вологого азбесту і формувальної суміші.

Тривалість обробки 3 хв. Для обох видів занурених матеріалів вміст водню через 5 хв. після обробки складав 0,78–0,82 см^3/100 г. Значення пористості проби з непросочуваним металомістким вузлом також були близькі і становили через 5 хв. витримки 2–2,24 %, а через 90 хв. 1,75–2 %. Герметичність вирізаної з середньої частини проби пластини товщиною 4 мм під тиском повітря 0,4 МПа була витримана в обох випадках. Таким чином, результативність газонасичення розплаву формувальною сумішшю може бути прирівняна до зволоженого азбесту.

Таблиця 1

Вплив модифікатора на газовміст виливка залежно від матеріала форми

Матеріал форми	Вміст модифікатора, % до шихти			
	0	1	2	3
	газовміст виливка, см^3/100 г			
Металева	1,6	1,5	1,6	1,8
Піщана	1,9	2,3	3,0	3,5

Введення солей натрію супроводжується різким збільшенням хімічної активності сплаву при взаємодії з вологою, що міститься в формувальних матеріалах, а в кінцевому рахунку утворенням газової пористості в литві [4, 5], що добре продемонстровано в роботі [6], (табл. 1). Прожарений подвійний модифікатор вводили в розплав при 810 ^{0}С.

Після модифікування стронцієм пори укрупнюються і розсереджуються по всьому об›єму виливка [7].

Наведені приклади експериментальних досліджень говорять про те, що лиття алюмінієвих сплавів (як рафінованих, так і не рафінованих) в піщані форми автоматично є литтям газонасичених сплавів з відповідними негативними і позитивними наслідками [8]. Більш того, рафіновані сплави будуть наводнюватись швидше в зв›язку з підвищеною дифузійною здатністю водню.

У процесі кристалізації виливка наводнення також може відбуватися. Згідно [9] затвердіння у вологій атмосфері сильніше знижує щільність і механічні властивості, ніж плавка у вологій атмосфері. Приблизно про те ж говорить А. Дж. Мерфі [10]: якщо по поверхні метал-форма безперервно відбувається абсорбція водню, здатний проникати в виливок водень компенсує збіднення газом твердну чих, в першу чергу, частин виливка, і розподіл пористості стає більш рівномірним. Цей ефект поширюється і на кокільне лиття. В роботі [11] з метою зменшення браку по усадочних дефектах типу тріщин і утяжин в місцях їх утворення створювали пористу структуру виливка за рахунок нанесення на відповідні ділянки пофарбованого гарячого кокіля воднеутворюючого реагенту (води) за допомогою пульвелізатора. І хоча вода при цьому випаровувалася, поверхневі дефекти на литві зникали.

З переходом виливка в твердий стан можливість його подальшого наводнення не виключається [12]. При достатній вологості атмосфери і досить високій температурі алюміній і його сплави нижче точки початку плавлення поглинають водень через взаємодію їх з парами води. Ця взаємодія відбувається через еквівалентність малих тисків парів води при реакції з алюмінієм величезним тиском молекулярного водню. При цих тисках водень в твердому металі може знаходитися не в пересиченому, а в ненасиченому стані.

Таблиця 2

Вплив режимів термічної обробки на пористість (%) сплаву Д16

Режими термічної обробки	Пористість, %
Литий стан	0,054
Гомогенізація при 420 ^{0}С, 24 години: в електричній печі в парах води в вакуумі (2х10^{-2} мм рт.ст.)	 0,162 0,147 0,156
Гомогенізація при 500 ^{o}С, 24 години: в електричній печі в парах води в вакуумі (4х10^{-2} мм рт.ст)	 0,2 1,26 0,165

У цьому плані показовими є результати по впливу режимів термічної обробки на пористість (%) сплаву Д16, (табл. 2).

Різке збільшення пористості при відпалі при 500 ^{0}С в парах води

швидше за все говорить про додаткове газонасичення металу воднем, що виникає при реакції водяної пари з поверхнею алюмінієвого сплаву.

За 3 години відпалу литого сплаву АМг6 при температурі 500 ^{0}С і вологості повітря 10 г/м^3 вміст водню збільшився від 0,34 до 0,75 см^3/100 г; при температурі 400 ^{0}С і вологості 100 г/м^3 за 10 годин відпалу вміст водню збільшився від 0,4 до 0,75 см^3/100 г.

Прутки зі сплаву АК6 перед деформацією витримувалися протягом 24 год. при 500 ^{0}С в атмосфері водяної пари. Ця обробка приводила до насичення поверхневих шарів прутка воднем з 0,3 до 10 см^3 /100 г і появи на межах зерна в крупнозернистій зоні обідка прутка розвиненої вторинної пористості.

За даними роботи [13] тривала витримка 0,5 мм листів зі сплаву Al–6%Zn–3%Mg в парах води при температурах 70–200 ^{0}С призводить до майже повної втрати пластичності зразка. В процесі витримки водень дифундує по межах зерен в об'єм зразків і утворює пори на частинках зміцнюючої фази, розташованих на межах зерен, що і викликає водневу крихкість. Транспортування атомів водню в сплавах пояснюють дислокаціями.

Зважаючи на вищенаведене, виникає питання: як можна корисно використовувати ці чинники або уникнути їх негативного впливу при отриманні виливків?

По-перше, як уже згадувалося, у випадках доцільності застосування наводнення розплаву при отриманні складних різностінних фасонних виливків з метою усунення усадочних внутрішніх концентрованих дефектів типу раковин і тріщин або зовнішніх дефектів типу утяжин шляхом їх заміни допустимою розсередженою газовою пористістю, внутрішньо-формове наводнення виливка формувальною сумішшю або локальне обприскування водою або парою гарячої (вище 100 ^{0}С) пофарбованої поверхні кокіля може мати суттєву перевагу, порівнюючи з наводненням розплаву в плавильній печі. Так, при литті в піщані форми ця операція здійснюється автоматично. Причому, незважаючи на підвищення вмісту водню і порівняно низьку інтенсивність затвердіння, в ряді випадків механічні властивості виливків, отриманих в піщаних формах, виявляються на рівні і навіть вище, ніж при литті в металеві форми [14].

Крім того ступінь наводнення від циклу до циклу буде приблизно однаковим завдяки зміні однакових форм, тоді як в плавильній печі вміст водню в розплаві знижується в процесі різної витримки перед заливкою наступних форм. Що ж стосується локального обприскування окремих ділянок форми, то воно виключає утворення зайвої пористості на тих ділянках виливка, де це не потрібно, що неможливо при наводненні всього розплаву перед заливкою.

По-друге, будь-яке наводнення алюмінієвих сплавів, в тому числі позапічне, потенційно бере участь в майбутньому водневому рафінуванні металу при переплавці. Адже для утворення бульбашок в твердому металі обов'язковою умовою є наявність внутрішніх поверхонь розділу, на яких міг би протікати процес молізації водню, тобто необхідно існування центрів утворення бульбашок. Такими центрами є включення оксидів [15, 16], які під дією газових бульбашок, що утворилися на них при переплавці будуть спливати на поверхню ванни рідкого металу.

По-третє, відповідно до витягу з роботи [10], завдяки поверхневому наводненню тверднучого виливка газова пористість непросочуваних металомістких вузлів стає більш рівномірною.

По-четверте, при отриманні з рафінованих сплавів нормально живлячих при затвердінні виливків з метою підвищення їх механічних властивостей за рахунок зниження пористості слід організовувати не тільки прискорене затвердіння, але і охолодження затверділого виливка, особливо поблизу ліквідуса.

Список літератури

1. Котлярский Ф. М. Барботажная обработка алюминиевых расплавов водяным паром. Загрязняем или рафинируем? *Процессы литья.* 2014. № 2. С. 14–20.

2. Чернега Д. Ф., Бялик О. М. Водород в литейных алюминиевых сплавах. Киев: Техніка, 1972. 145 с.
3. Котлярский Ф. М., Белик В. И., Борисов Г. П. Влияние режимов газонасыщения расплава на формирование и герметичность отливок из алюминиевых сплавов. *Процессы литья*. 1998. № 2. С. 53–58.
4. Бибиков Е. Л., Лейбов Ю. М. Влияние присадки бериллия и магния на свойства сплава Al+7%Si. *Производство отливок из легких сплавов*. Труды МАТИ. № 63. 1961. С. 86–93.
5. Влияние модифицирования и степени газонасыщенности на плотность Al–Si-сплава A-S10G, отлитого в песчаную форму. ЭИ ТОЛП. 1972. № 42. С. 3–14. Реф. 1977.
6. Альтман М. Б., Глотов Е. Б., Засыпкин В. А., Макаров Г. С. Вакуумирование алюминиевых сплавов. М.: *Металлургия*, 1977. 240 с.
7. Немененок Б. М., Задруцкий С. П., Галушко А. М. Усадочная пористость в модифицированных силуминах. *Литейное производство*. 1998. № 5. С. 15–17.
8. Котлярский Ф. М. Водород в алюминиевых сплавах и отливках. Киев: Освіта України, 2011. 208 с.
9. Сокольская Л. И. Газы в легких металлах. М.: Металлургиздат, 1959. 115 с.
10. Мерфи А. Дж. Плавка и литье цветных металлов и сплавов. М.: Металлургиздат, 1959. 646 с.
11. Белик В. И., Котлярский Ф. М., Борисов Г. П., Гавриш В. С. Способ получения отливок из алюминиевых сплавов. А.с. 1556812 СССР, B22D 27/20, опубл. 15.04.90. Бюл. № 14.
12. Добаткин В. И., Габидуллин Р. М., Колачев Б. А., Макаров Г. С. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. *Металлургия*, 1976. 264 с.
13. Колачев Б. А. Водородная хрупкость алюминиевых сплавов и методы ее предупреждения. *Технология легких сплавов* (ВИЛС), 1994. № 5–6.
14. Белоусов Н. Н. Современные направления работ по модифицированию алюминиевых сплавов. *Модифицирование силуминов.* Киев: ИПМ АН УССР, 1970. С. 20–52.
15. Гудченко А. П., Кузьмичев Л. В. Исследование процессов литья алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1969 (Труды МАТИ, №70). С. 117–132.
16. Kostron H. *"Z.Metallkunde"*, 1952, Bd43, no. 11, p. 373–387.

Надійшла 26.08.2020

References

1. Kotlyarsky F. M. (2014) Bubble treatment of aluminum melts with water vapor. Are we polluting or refining? *Casting processes*, no. 2, pp. 14–20 [in Russian].
2. Chernega D. F., Bialik O. M. (1972) Hydrogen in cast aluminum alloys. Kiev: Tekhnika, 145 p. [in Russian].
3. Kotlyarsky F. M., Belik V. I., Borisov G. P. (1998) Influence of the modes of gas saturation of the melt on the formation and tightness of castings from aluminum alloys. *Casting processes,* no. 2. pp. 53–58 [in Russian].
4. Bibikov E. L., Leibov Y. M. (1961) Influence of beryllium and magnesium additives on the properties of the Al+7%Si. *Production of castings from light alloys*. Proceedings of MATI, no. 63, pp. 86–93 [in Russian].
5. Influence of modification and the degree of gas saturation on the density of Al-Si-alloy A-S10G, cast in a sand mold. El TOLP, 1972, no. 42, pp. 3–14. Ref. 1977 [in Russian].
6. Altman M. B., Glotov E. B., Zasypkin V. A., Makarov G. S. (1977) Vacuuming of aluminum alloys. Moscow: *Metallurgy*, 240 p. [in Russian].
7. Nemenenok B. M., Zadrutskiy S. P., Galushko A. M. (1998) Shrinkage porosity in modified silumin. Foundry, no. 5, pp. 15–17 [in Russian].
8. Kotlyarsky F. M. (2011) Hydrogen in aluminum alloys and castings. Kiev: Osvita Ukrainy, 208 p. [in Russian].
9. Sokolskaya L. I. (1959) Gases in light metals. Moscow: *Metallurgizdat,* 115 p. [in Russian].
10. Murphy A. J. (1959) Smelting and casting of non-ferrous metals and alloys. Moscow: *Metallurgizdat*, 646 p. [in Russian].
11. Belik V. I., Kotlyarsky F. M., Borisov G. P., Gavrish V. S. A method of producing castings from aluminum alloys. A.S. 1556812 USSR, B22D 27/20, publ. 04.15.90. Bul. No. 14 [in Russian].
12. Dobatkin V. I., Gabidullin R. M., Kolachev B. A., Makarov G. S. (1976) Gases and oxides in wrought aluminum alloys. *Metallurgy*, 264 p. [in Russian].

13. Kolachev B. A. (1994) Hydrogen brittleness of aluminum alloys and methods of its prevention. *Technology of light alloys* (VILS), no. 5–6 [in Russian].
14. Belousov N. N. (1970) Modern directions of work on the modification of aluminum alloys. Modification of silumin. Kiev: IPM AN UkrSSR, pp. 20–52 [in Russian].
15. Gudchenko A. P., Kuzmichev L. V. (1969) Investigation of the processes of casting aluminum, magnesium and titanium alloys. M.: Mashinostroenie, (*Proceedings of MATI,* no. 70). P. 117–132 [in Russian].
16. Kostron H. «Z. Metallkunde», 1952, Bd43, N11, pp. 373–387.

Received 26.08.2020

F. M. Kotlyarsky, *Dr. Sci. (Engin.), e-mail: onmlptima@ukr.net*

Phisycal Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

EXTRAORDINARY FLOODING OF ALUMINUM ALLOY CASTINGS

The content content hydrogen in castings of aluminum alloys depends mainly on its content in the melt before casting. However, you should pay attention to some processes that take place outside the furnace space and are not always controlled. Thus, a significant increase in the hydrogen content is observed when casting in crude sand molds as a result of the interaction of the melt with the wet molding mixture: every 100 mm of the path traveled by the melt in this form, add approximately 0.3 cm3 / 100 g of hydrogen. The gas saturation of the melt with the molding mixture can be equated to moistened asbestos. The intensity of this process increases sharply with the introduction into the melt of the modifier in the form of sodium salts: with the introduction of 3% of the modifier increase the gas content of the casting from 1.9 to 3.5 cm3 / 100 g. Flooding can also occur during the crystallization of the casting. Moreover, curing in a humid atmosphere reduces the density and mechanical properties more than melting in a humid atmosphere. In some cases, this effect is used to eliminate the lack of shrinkage defects such as cracks and weights by spraying water on the relevant areas of the painted mold. Flooding is also not excluded after complete curing of the casting due to the interaction with atmospheric water vapor, for example, during heat treatment. Out-of-furnace flooding of aluminum alloys potentially participates in future hydrogen refining of the metal during remelting. To increase the density and mechanical properties of the cast metal, it is necessary to organize not only accelerated hardening, but also cooling of the hardening casting, especially near the liquidus.

Keywords: *aluminum alloys, castings, out-of-furnace flooding. sand form, local spraying. heat treatment.*