

---

## ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ

УДК 669.715:669.788

**Ф. М. Котлярский**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ВЛИЯНИЕ СОВМЕЩЕНИЯ НАВОДОРОЖИВАНИЯ С ДРУГИМИ ВИДАМИ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НА ФОРМИРОВАНИЕ И КАЧЕСТВО ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*Экспериментально доказано, что наводороживанием жидких алюминиевых сплавов перед заливкой в литейные формы можно уменьшить и даже устранить брак отливок по горячеломкости, утяжинам, негерметичности металлоемких узлов. Однако при этом обычно не обращается внимание на то, что этот же расплав параллельно может подвергаться модифицированию, в том числе введению стружки, или рафинированию. Такое совмещение может оказать непредвиденное влияние на качество отливки. В работе показано, что совмещение наводороживания с введением стружки приводит к резкому увеличению и неравномерному распределению газовой пористости, что нежелательно. Модифицирование флюсом из-за снижения в расплаве количества частиц  $Al_2O_3$  ускоряет диффузионное удаление водорода, поэтому разливку расплава следует производить вскоре после наводороживания. Совмещение с модифицированием стронцием при оптимальной выдержке позволяет существенно повысить прочность и пластичность. Разработана методика определения протяженности пор, что помогает разобраться в механизмах их образования и повысить герметичность литых изделий.*

**Ключевые слова:** *алюминиевые сплавы, отливки, расплав, наводороживание, модифицирование, рафинирование, газоусадочные дефекты.*

Обычно при наводороживании жидких алюминиевых сплавов с целью снижения горячеломкости [1] или повышения качества непропитываемых металлоемких узлов отливок [2] не обращается внимание на то, что этот же расплав параллельно может подвергаться рафинированию [3, 4] или модифицированию [5], в том числе введению частиц  $Al_2O_3$ , например, в виде стружки [6]. А ведь такое совмещение также может повлиять на качество отливки (синергетический эффект). Изучение этого вопроса представляется интересным и практически важным.

Совмещение наводороживания и введения в расплав окисных частиц. Известно [2], что окисные включения делятся на активные (не смачиваемые расплавом) и пассивные (смачиваемые) по отношению к водороду и водяному пару. Первые могут быть центрами зарождения водородных пузырьков, вторые – нет. Активной является гидроокись, образующаяся в результате адсорбции водяных паров поверхностной окисной пленкой и имеющая рыхлое строение. К пассивным относятся окислы, образовавшиеся внутри расплава в результате реакции алюминия, например, с  $SiO_2$  или  $CuO$ . Такие частицы  $Al_2O_3$  имеют монолитное строение и сразу после реакции

## Получение и обработка расплавов

омываются расплавом, который за счет адгезии препятствует адсорбции водорода. Даже при угле смачиваемости  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$   $150\text{--}160^\circ$  работа адгезии оказывается выше работы адсорбции водорода [4]. Пассивные включения могут перейти в активные в результате их коагуляции (слипания) с образованием объектов с разветвленной системой капилляров, в которых появляется парогазовая фаза.

Таким образом, наводороживающий расплав водяной пар может полноценно взаимодействовать в плане порообразования только с активными включениями. Поэтому при приготовлении экспериментального сплава АК9 в шихту добавляли 15 % стружки. Для исследования влияния наводороживания и введенной стружки на характер распределения водородной пористости по высоте отливки использовали специально разработанную пробу (рис. 1), исключая (в отличие от существующих

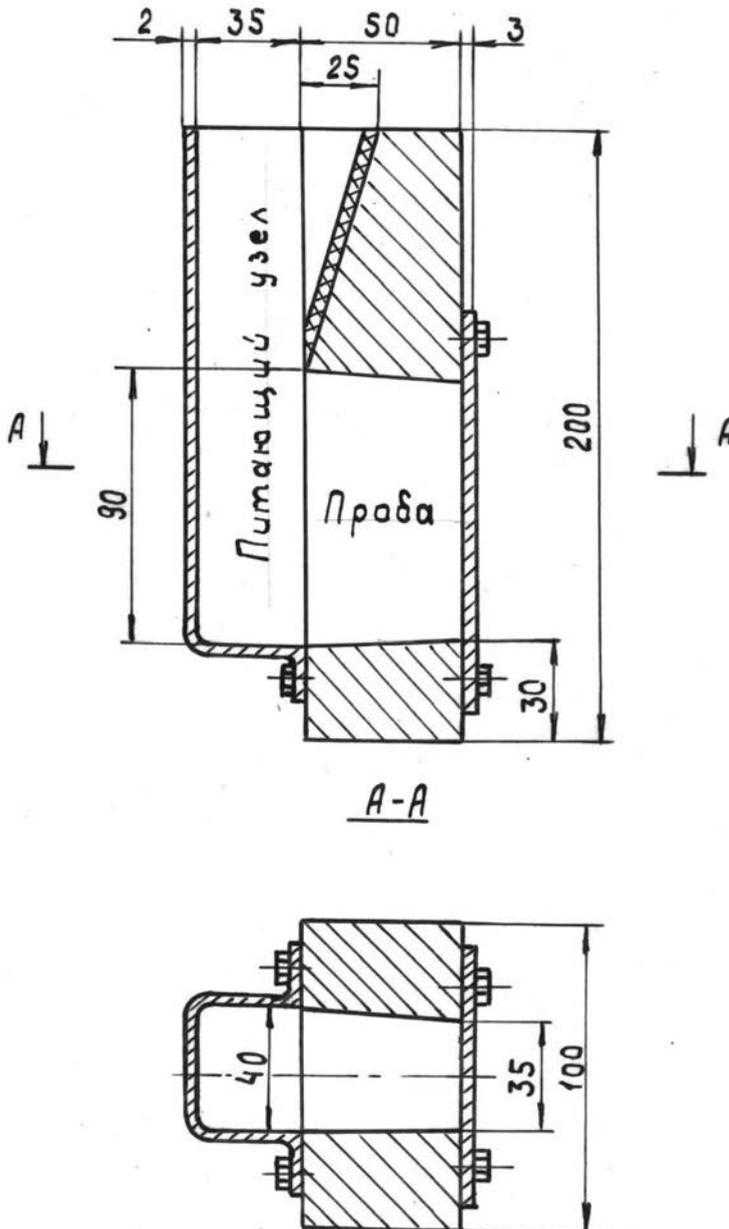


Рис. 1. Металлическая форма технологической пробы для оценки газосодержания расплава

## Получение и обработка расплавов

проб) неконтролируемые потери водорода при затвердевании. Заливку расплава производили при температуре 740–750 °С. В результате установлено (рис. 2, а), что в пробе из исходного расплава (до обработки) пористость была равномерной по всей высоте и составляла в среднем по сечению около 1 % (кривая 1). После трехминутного наводороживания влажным асбестовым тампоном и пятиминутной

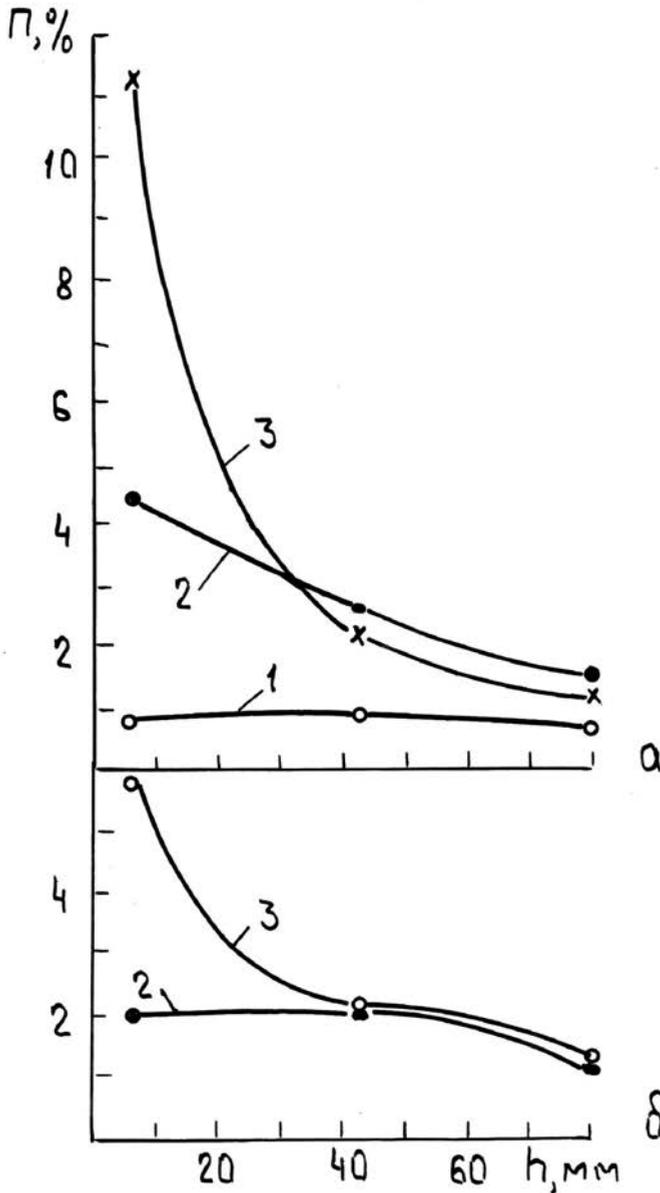


Рис. 2. Влияние видов обработки перегретого (740–750) °С расплава марки АК9 на величину и распределение пористости (П) по высоте пробы ( $h$  – расстояние от верхнего торца) с выдержкой после наводороживания: 1 – исходный, без обработки; 2 – наводороживание расплава (НР) мокрым асбестом в течение 3 мин; 3 – введение 15 % стружки (ВС) + НР (а – время выдержки после наводороживания 4–6 мин; б – время выдержки после наводороживания 36–38 мин)

выдержки пористость возрастала снизу вверх практически линейно от 1,5 до 4,5 % (кривая 2) за счет всплывания газовых пузырьков, а после введения стружки и наводороживания в нижней половине пробы изменения по сравнению с предыдущим экспериментом были незначительны, а в верхней части произошло резкое увеличение пористости до 11,3 % (кривая 3). При увеличении выдержки до 37 мин (рис. 2, б) пористость после наводороживания стала практически равномерной в пределах 1,5–2 % (кривая 2), а при совмещении с введением стружки она в верхней части остановилась на 6 % (кривая 3).

Таким образом, учитывая негативное влияние пористости на прочность литого металла, при использовании операции наводороживания наличие в расплаве повышенного содержания частиц  $Al_2O_3$ , активных по отношению к водороду, не желательно.

**Совмещение наводороживания и рафинирования.** В данном случае имеется ввиду рафинирование расплава от мелкодисперсных окисных включений, для чего обычно используют фильтрование и флюсы [4] (последние более эффективны). В то же время известно [7], что удаление мелкодисперсных неметаллических включений увеличивает скорость наводороживания и разводороживания расплава, что, в свою очередь, может отразиться на эффективности водородной обработки в плане повышения размерной точности (ликвидация утяжин), герметичности непропитываемых узлов и выхода годного (снижение массы прибылей).

Процесс порообразования исследовали на вторичном сплаве АК12. Непосредственно перед трехминутной обработкой расплава влажным асбестом на его поверхность подавали порцию флюса ARSAL-2125 немецкой фирмы «SHAFER» в количестве 0,5 % от массы металла.

В результате установлено, что добавка флюса при водородной обработке способствует повышению газовой пористости на всех участках отливки при использовании расплава сразу после обработки и понижает общую пористость в случае

разливки расплава после выдержки более 30 мин (рис. 3). В последнем случае по сравнению с безфлюсовым наводороживанием происходит более резкое снижение негативной пористости, сконцентрированной на верхних участках отливки, тогда как рассредоточенная междендритная пористость примерно одинакова для обоих вариантов. Флюсовая обработка расплава в процессе его газонасыщения снижает герметичность отливок, полученных в условиях недостаточного питания.

**Совмещение наводороживания и модифицирования.** Известно [8, 9], что модифицирование алюминиевых сплавов солями натрия или стронцием сопровождается насыщением расплава водородом и, соответственно, появлением в отливках пористости, то есть естественным путем происходит в какой-то мере озаглавленное совмещение. Более того, в монографии А. Дж. Мерфи [10] еще в 1959 г. было сообщено, а советскими учеными Г. И. Корякиным и Г. М. Кимстачем в 1970 г. подтверждено

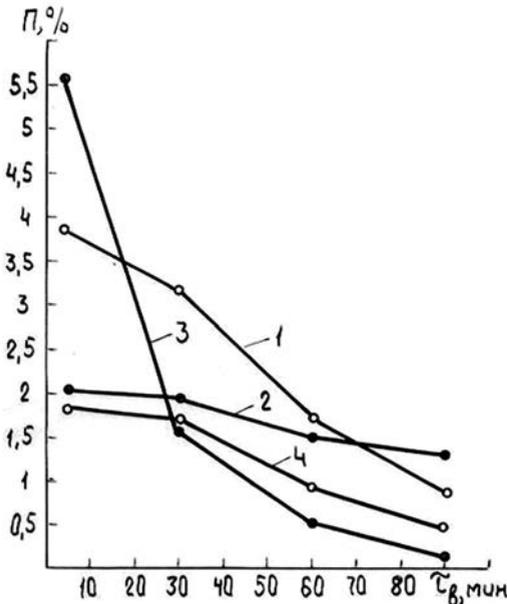


Рис. 3. Влияние выдержки после трехминутной обработки расплава АК12 водяным паром без флюса (1, 2) и с флюсом (3, 4) на перераспределение пористости в верхних (1, 3) и средних (2, 4) участках вертикальной стенки отливки толщиной 21–27 мм

[11], что по отношению к алюминиево-кремниевым сплавам эффект модифицирования проявляется главным образом в рассредоточении концентрированной усадочной раковины и формировании микропористости. Аналогичная картина наблюдается в ряде случаев при модифицировании заэвтектических силуминов пятихлористым фосфором. Следует понимать, что в этих случаях замена усадочных раковин рассредоточенной газовой пористостью – это следствие не модифицирования, а повышения содержания водорода при модифицировании.

В отличие от других модификаторов стронций тормозит зарождение пузырьков газа в пересыщенном водородом расплаве, уменьшая, таким образом, вредную всплывающую пористость, но не препятствует этому процессу при кристаллизации, когда образуется полезная междендритная микропористость [12]. Важным является и то, что повышение механических свойств металла за счет модифицированной структуры в какой-то мере компенсирует отрицательную сторону пористости.

В отличие от вышеизложенного естественного наводороживания во время модифицирования, во ФТИМС НАН Украины исследовали влияние стронция на пористость и механические свойства искусственно наводороженного влажным асбестом сплава АК9, в том числе с введением стружки. Полученные данные экспериментальных исследований в условиях повышенных скоростей затвердевания в массивных чугунных формах представлены в табл. 1. Как видно, сочетание наводороживания с модифицированием обеспечило наиболее высокие механические свойства, намного превышающие эти показатели для исходного необработанного расплава, и это при том, что пористость опытных отливок была намного выше.

Установлено также, что во время выдержки после наводороживания стронций ускоряет снижение пористости в отливках, то есть по отношению к наводороженным силуминам стронций выполняет рафинирующие функции.

При исследовании комплексного влияния наводороживания, модифицирования и стружки на формирование непропитываемых узлов отливок было установлено, что увеличение выдержки до 80 мин способствует измельчению газовых пор и их равномерному распределению в поле шлифа. Однако, вырезанные из центральной части пластинки толщиной

Таблица 1

Влияние видов обработки расплава на свойства вторичного сплава АК9

Свойства сплава	Виды обработки расплава										
	1*	2*	3*	4*	1**	2**	3**	4**	4***	без обработки	
Пористость технологичной пробы, %	верх	4,47	5,8	11,21	7,0	1,95	1,55	5,92	3,08	0,71	0,78
	средина	2,67	2,77	2,21	2,5	2,03	2,14	2,15	1,96	1,28	0,9
	низ	1,45	1,72	1,26	1,26	0,99	0,99	1,14	0,94	0,45	0,62
Пористость заготовки на механических свойства, %	1,43	1,75	1,48	1,09	0,77	0,63	0,98	0,69	0,1	0,63	
$\alpha_B$ , МПа	195	215	205	214	195	240	192,5	220	230	178	
$\delta$ , %	4,5	7,5	3,6	4,1	4,0	11,2	4,0	6,0	5,2	4,7	

Примечание. Виды обработки: 1 – наводороживание расплава (НР) при температуре 740–750 °С; 2 – НР+ модифицирование стронцием (0,1 %); 3 – введение стружки (-15 %) + НР; 4 – введение стружки + НР+ модифицирование стронцием; \* – выдержка после НР 4–6 мин; \*\* – выдержка после НР 36–38 мин; \*\*\* – выдержка после НР 80 мин

## Получение и обработка расплавов

5 мм не выдержали испытаний на герметичность под давлением сжатого воздуха 0,5 МПа.

В условиях низкой интенсивности затвердевания в песчаной форме (металлическая оболочка толщиной 1,3 мм и сухой песок [13]) сплава АК9 после совмещения наводороживания и модифицирования стронцием в нормально питаемой отливке в процессе выдержки от момента наводороживания произошло снижение пористости от 4,3 до 2 %, тогда как прочность и относительное удлинение практически не изменились, оставаясь, соответственно, в пределах 130–140 МПа и 3 %, а после переплава и повторного наводороживания в процессе выдержки произошло более резкое падение пористости на более коротком участке от 3,5 до 2,3 %, прочность поднялась и колебалась в пределах 150–155 МПа, а пластичность несколько опустилась до 2,5 %.

В условиях литья в двухфазном состоянии наводороженного и модифицированного стронцием сплава АК9 заготовки для разрывных образцов получали с ускоренным затвердеванием в массивных чугунных кокилях, а технологические пробы – в разностенных металлических формах с массивной частью для пробы и тонкостенной для литника и прибыли. Экспериментальные данные представлены в табл. 2 и 3. Как видно из табл. 2, по сравнению с расплавом без обработки сочетание наводороживания и модифицирования при оптимальной выдержке повышает прочность литого металла на 27–40 % и пластичность в 2–3 раза, значительно превышая требования согласно ГОСТу.

**Таблица 2**

### Влияние видов обработки расплава на свойства вторичного сплава АК9 при интенсивном затвердевании

Свойства сплава	Виды обработки расплава*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Пористость заготовки на механические свойства, %	0,16	0,49	0,31	0,23	0,38	0,14	0,08	0,05
$\sigma_B$ , Мпа	165	165	185	210	230	215	225	195
$\delta$ , %	3,1	2,25	4,95	6,5	9,2	7,2	7,35	3,35

\*Примечание: Виды обработки: 1 – расплав перегрет до 760 °С; 2 – термоскоростное охлаждение (ТСО) расплава от 770 ± 10 °С до температуры ликвидус (605 °С) и частичная кристаллизация с перемешиванием (ЧКП) на протяжении 35 ± 5 с; 3 – наводороживание расплава (НР) влажным асбестом 2 мин, выдержка ( $\tau_B$ ) 5 мин, ТСО, ЧКП; 4 – НР, модифицирование стронцием (0,05 %),  $\tau_B$  после НР 10 мин, ТСО, ЧКП; 5 – то же самое при  $\tau_B = 50$  мин; 6 – то же самое при  $\tau_B = 90$  мин; 7 – то же самое при  $\tau_B = 130$  мин; 8 – то же самое при  $\tau_B = 170$  мин

Судя по табл. 3, пористость медленно затвердевающих литника и прибыли приближается к усадке кристаллизации сплава АК9, а механические свойства удовлетворяют требованиям ГОСТ, что создает веские предпосылки для малоотходного бесприбыльного литья.

Металлографическими исследованиями установлено, что для перегретого до 760 °С металла без какой-либо обработки характерно наличие первичных  $\alpha$ -Al дендритных кристаллов размером более 1 мм и дендритной ячейкой в среднем 18–25 мкм. Размеры эвтектических областей находятся в диапазоне 100–200 мкм, причем длина сечений пластин эвтектического кремния составляет 40–80, а ширина 3–5 мкм.

Для металла с дополнительным предварительным наводороживанием расплава и выдержкой 5 мин характерно наличие первичных кристаллов различной дисперсности: более крупные (400–600 мкм) с дендритной ячейкой 45–50 мкм (~35 %) и мелкодисперсные с ячейкой 15–20 мкм).

Металл, модифицированный стронцием (0,05 %), в сочетании с теми же ви-

Таблица 3

**Влияние видов обработки расплава на свойства вторичного сплава АК9 в отливке технологической пробы на газовую пористость**

Участок отливки и свойства		Виды обработки расплава	
		3*	4*
Проба, пористость, %	верх	0,93	1,1
	середина	1,58	1,67
	низ	0,75	0,74
Литник	пористость, %	2,91	2,45
	$\sigma_B$ , МПа	153	157
	$\delta$ , %	1,6	2,6
Прибыль, пористость, %		4,43	3,57

\*Примечание: Согласно табл. 2

дами обработки состоит из крупных  $\alpha$ -Al первичных кристаллов (200–800 мкм) и мелкодисперсных дендритов с ячейкой 10–15 мкм, образовавшихся через потерю устойчивого роста в результате большего переохлаждения. Размеры эвтектических областей также составляют 100–200 мкм, однако эвтектический кремний существенно изменяется до тонкодисперсных волокнистых форм. Длина сечений кристаллов кремния не превышает 5 мкм с шириной сечений пластин в среднем 2–3 мкм.

Аналогичными исследованиями литого металла, полученного при замедленном затвердевании литника технологической пробы в тонкостенной части кокиля, установлено, что после комплексной обработки расплава, включающей наводороживание, 5-минутную выдержку и термоскоростное охлаждение с частичной кристаллизацией и перемешиванием, микроструктура характеризуется наличием наравне с дендритами розеткоподобных и округленных кристаллов первичной  $\alpha$ -Al фазы (100–300 мкм), а также вырожденным характером эвтектики. Эвтектический кремний кристаллизуется, в основном, в пространстве между первичными  $\alpha$ -Al кристаллами, при этом длина сечений кристаллов эвтектического кремния составляет 50–80 мкм с шириной сечений пластин от 3–5 до 8–15 мкм.

После дополнения той же комплексной обработки расплава модифицированием стронцием (0,05 %) микроструктура также характеризуется наличием наравне с дендритами розеткоподобных и округленных кристаллов первичной  $\alpha$ -Al фазы (200–400 мкм). Вследствие меньшей интенсивности теплоотвода степень дифференцировки модифицированной эвтектики уменьшается. Длина сечений кристаллов кремния увеличивается до диапазона 6–25 мкм. Также следует отметить, что в образцах, выточенных из литниковой части, отчетливо наблюдаются эвтектические участки с кристаллами скелетной морфологии (вероятно,  $\alpha$ -(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub> фаза), которые образуются совместно с первичной  $\alpha$ -Al фазой.

*Совмещение наводороживания и обработки расплава электрическим током [14].* Способ получения отливок из алюминиевых сплавов, включающий плавление шихты, рафинирование расплава постоянным электрическим током при пониженном давлении, выстаивание и заливку расплава в формы, отличается тем, что, с целью повышения качества отливок, перед рафинированием расплава его насыщают водородом до содержания не менее 0,5 см<sup>3</sup>/100 г.

Анодом служит тигель печи, катодом – стержень электрода из титанового прутка, погруженный на 1/3 глубины ванны расплава. Исследования проводились на корпусных деталях из сплава АЛ9, работающих на герметичность. После расплавления сплава в электрической печи сопротивления и достижения 720–740 °С

## Получение и обработка расплавов

расплав газонасыщался мокрым асбестом и подвергался обработке постоянным электротоком  $0,4 \text{ А/см}^2$  и вакуумом с остаточным давлением  $10 \text{ мм рт.ст.}$  в течение  $15 \text{ мин.}$  После рафинирования расплав выстаивали  $15\text{--}20 \text{ мин}$  и разливали по формам при  $700\text{--}710 \text{ }^\circ\text{C}$  для испытания на газосодержание, механические свойства и для получения отливок, которые проверялись на герметичность.

Результаты проверки: газосодержание в расплаве менее  $0,05 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , предел прочности при растяжении  $21\text{--}22 \text{ кг/мм}^2$ , относительное удлинение  $6\text{--}7 \%$ ; брак отливок по негерметичности стабилизировался – в некоторых случаях он сократился до  $0 \%$ , а для отливок, работающих под давлением до  $10 \text{ кг/см}^2$ , находился в пределах  $8\text{--}10 \%$  (ранее наблюдались выпадения до  $40\text{--}50 \%$ ).

*Размеры, форма и характер распределения газовых пор и усадочных раковин.* Согласно исследованиям А. П. Гудченко [15], на размеры и распределение газовых пор оказывают влияние ряд факторов: состав сплава, газосодержание, модифицирование, вид литья. При газосодержании чистого алюминия более  $0,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  в слитках образуется большое количество мелких пор размерами  $1\text{--}100 \text{ мкм}$ . Существенного различия в распределении пористости в центральной и периферийной частях слитков не наблюдалось. В образцах из эвтектического силумина образуются округлые, несколько вытянутые поры независимо от содержания водорода. Газосодержание расплава влияет лишь на степень развития пористости. В сплавах, кристаллизующихся в относительно широком температурном интервале (сплавы с  $1,5; 3; 5; 7; 8 \%$  кремния) при содержании водорода в жидком металле, большем  $0,2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , образуется характерная для этих сплавов угловатая, разветвленная пористость. При малом содержании водорода в расплаве (меньше  $0,2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ) в центре проб наряду с указанной пористостью появляется концентрированная усадочная рыхлота. В заэвтектическом сплаве с  $20 \%$  Si образуются округлые, неодинаковые по размеру поры. Распределение их по сечению отливки неравномерное.

А. П. Гудченко исследовал в основном слитки. Среди факторов, оказывающих влияние на размеры и распределение газовых пор, он не указывает условий питания затвердевающих отливок и особенно формирования непропитываемых металлоемких узлов, имеющих практически во всех реальных фасонных отливках.

Эти вопросы изучались в основном во ФТИМС НАН Украины. Благодаря открытой природе раздельного образования газовой пористости (при положительном давлении) и усадочных раковин (при отрицательном давлении) был найден простой и дешевый путь замены усадочных раковин рассредоточенной газовой пористостью наводороживанием расплава перед заливкой. При этом газовая пористость разделена на полезную междендритную, которая обычно бывает мелкодисперсной (до  $1 \text{ мм}$ ) и обособленной (обеспечивающей герметичность), и негативную (до  $3 \text{ мм}$ ), всплывающую в верхнюю часть отливки. Последняя устраняется оптимизацией режимов наводороживания. Для сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации (протяженной твердожидкой зоной) всплывающая пористость менее выражена из-за более раннего образования связанного кристаллического каркаса.

Главным параметром поры является ее протяженность. Именно этот параметр определяет герметичность металлоемкого непропитываемого узла и именно этого параметра нельзя определить на шлифах, где видны только срезы протяженных пор под разными углами. В то же время была разработана методика определения герметичности, суть которой в том, что из контролируемого узла вырезали диск или пластину толщиной  $12 \text{ мм}$ , которые продували сжатым воздухом в воде. Если пластина была герметичной, ее стачивали до определенного размера и опять продували. Такую операцию продолжали до тех пор, пока не появится течь. Минимальная непродуваемая толщина и была показателем герметичности. Однако не трудно представить, что эта толщина одновременно является и показателем максимальной протяженности пор. Таких данных достаточно много в публикациях

ФТИМС НАН Украины, касающихся недропитываемых узлов и бесприбыльных отливок [16].

### Выводы

- Для оценки роли совмещения наводороживания с другими видами обработки расплава в процессах литья алюминиевых сплавов следует учитывать, что наводороживание расплава изменяет не только строение недропитываемых узлов, но и повышает водородную пористость на других участках отливки, несущих основную нагрузку при эксплуатации литого изделия. Естественно ожидать, что на этих участках произойдет понижение механических свойств. Поэтому нужно сопоставлять, что важнее, и находить компромиссы, то есть оптимальную степень наводороживания для данных условий.

- Относительно введения в расплав окисных частиц – из-за резкого увеличения и неравномерного распределения пористости такое совмещение нецелесообразно, несмотря на то, что повышение содержания таких частиц будет способствовать измельчению структуры литого металла и более продолжительному удержанию в расплаве введенного водорода. А вот введение в расплав стружки без наводороживания дает хорошие результаты по повышению плотности и прочности [6].

- Рафинирование флюсом из-за снижения содержания частиц  $Al_2O_3$  в расплаве ускоряет диффузионное удаление введенного в расплав водорода, поэтому разливку расплава следует производить вскоре после обработки при низких перегревах. Газовая пористость будет более равномерной. Использование флюса существенно сокращает потери расплава со шлаком в процессе наводороживания.

- Модифицирование приходит в расплав со своим наводороживанием, тем не менее дополнительное искусственное наводороживание оказывается не лишним. Именно сочетание модифицирования с искусственным наводороживанием обеспечивает максимальные показатели прочности и пластичности. Оптимистично воспринимается тот факт, что при медленном затвердевании сплава АК9 пористость приближается к усадке кристаллизации, а механические свойства удовлетворяют требованиям ГОСТ, что создает веские предпосылки для малоотходного бесприбыльного литья с компенсацией усадки затвердевания мелкодисперсной газовой фазой.

- Рафинирование путем совмещения обработки расплава электрическим током и наводороживания по физической сущности напоминает водородное рафинирование. Действие электровакуумного рафинирования в первом сходно с переплавом во втором, а наводороживание в обоих случаях выполняет функции катализатора.

- Изобретение методики определения протяженности газовых пор поможет разобраться в механизмах их образования. До настоящего времени такая работа не проводилась, хотя ее выполнение очень важно в плане повышения герметичности литых изделий.

### Список литературы

1. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. – М.: Наука, 1966. – 299 с.
2. Котлярский Ф. М. Водород в алюминиевых сплавах и отливках. – К.: Освіта України, 2011. – 208 с.
3. Макаров Г. С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами. – М.: Металлургия, 1983. – 119 с.
3. Курдюмов А. В., Инкин С. В., Чулков В. С., Графас Н. И. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 196 с.
4. Модифицирование силуминов. Сборник. – Киев: АН УССР, 1970. – 180 с.
5. Борисов Г. П., Беленький Д. М., Вернидуб А. Г. Влияние добавки стружки в жидкий металл на структуру и свойства алюминиевых сплавов // Металл и литье Украины. – 2004. – №1–2. – С. 4–5.
6. Иванов В. П., Спасский А. Г. Влияние окислов алюминия на процессы газонасыщения и газовой выделения в алюминии и его сплавах // Литейное производство. – 1963. – № 1. – С. 26–28.

8. *Альтман М. Б., Глотов Е. Б., Засыпкин В. А., Макаров Г. С.* Вакуумирование алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgiya, 1977. – 240 с.
9. *Курдюмов А. В., Инкин С. В., Чулков В. С., Шадрин Г. Г.* Металлические примеси в алюминиевых сплавах. – М.: Metallurgiya, 1988. – 143 с.
10. *Мерфи А. Дж.* Плавка и литье цветных металлов и сплавов. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 646 с.
11. *Корякин Г. И., Кимстач Г. М.* Исследование влияния эффекта модифицирования на изменение составляющих суммарной усадки Al-Si сплавов, Тр. Горьк. ПКТИ. – 1970. – Вып. 1. – С. 68–75.
12. *Худокормов Д. Н., Дехтярев Р. В., Задруцкий С. П.* Дегазация расплавов силумина // Литейное производство. – 1998. – № 5. – С. 14–15.
16. *Котлярский Ф. М.* Определение свойств отливок с низкой интенсивностью затвердевания // Процессы литья. – 2011. – № 2. – С. 20–23.
17. А.с. 1638192 СССР, С22В21/06, 9/05. Способ получения отливок из алюминиевых сплавов / В. И. Якимов, А. Т. Калинин. – Опубл. 30.03.91. Бюл. №12.
18. *Гудченко А. П., Кузьмичев Л. В.* Образование пористости в слитках алюминия // Исследование процессов литья алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. Труды МАТИ. – № 70. – 1969. – С. 117–132.
19. *Котлярский Ф. М., Борисов Г. П.* Малоотходное литье алюминиевых сплавов. – К.: Наукова думка, 2007. – 160 с.

Поступила 02.04.2019

### References

1. *Novikov, I. I.* (1966) Hot brittleness of non-ferrous metals and alloy. Moscow: Nauka, 299 p. [in Russian].
2. *Kotlyarskiy, F. M.* (2011) Hydrogen in aluminum alloys and castings. K.: Osvita Ukrainy, 208 p. [in Russian].
3. *Makarov, G. S.* (1983) Refining aluminum alloys with gases. Moscow: Metallurgiya, 119 p. [in Russian].
4. *Kurdyumov, A. V., Inkin, S. V., Chulkov, V. S., Grafas, N. I.* (1980) Flux processing and filtering of aluminum melts. Moscow: Metallurgiya, 196 p. [in Russian].
5. Modification of silumin: Collection (1970) K.: AN USSR, 180 p. [in Russian].
6. *Borisov, G. P., Belenkiy, D. M., Vernidub, A. G.* (2004) The influence of the addition of chips in the liquid metal on the structure and properties of aluminum alloys. Metall i lite Ukrainy, no. 1–2, pp. 4–5 [in Russian].
7. *Ivanov, V. P., Spasskiy, A. G.* (1963) The effect of aluminum oxides on gas saturation and gas evolution in aluminum and its alloys. Liteynoe proizvodstvo, no. 1, pp. 26–28 [in Russian].
8. *Altman, M. B., Glotov, Ye. B., Zasyppkin, V. A., Makarov, G. S.* (1977) Vacuum aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 240 p. [in Russian].
9. *Kurdyumov, A. V., Inkin, S. V., Chulkov, V. S., Shadrin, G. G.* (1988) Metallic impurities in aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 143 p. [in Russian].
10. *Merfi, A. Dzh.* (1959) Melting and casting of non-ferrous metals and alloys. Moscow: Metallurgizdat, 646 p. [in Russian].
11. *Koryakin, G. I., Kimstach, G. M.* (1970) Investigation of the effect of the modification on the change in the components of the total shrinkage of Al-Si alloys. Tr. Gork. PKTI, Vol. 1, pp. 68–75 [in Russian].
12. *Khudokormov, D. N., Dekhtyarev, R. V., Zadrutskiy, S. P.* (1998) Degassing of silumin melts. Liteynoe proizvodstvo, no. 5, pp. 14–15 [in Russian].
13. *Kotlyarskiy, F. M.* (2011) Determination of properties of castings with a low intensity of solidification. Protsessy litya, no. 2, pp. 20–23 [in Russian].
14. *Yakimov, V. I., Kalinin, A. T.* А.с. 1638192 SSSR, S22V21/06, 9/05. The method of producing castings from aluminum alloys. Opubl. 30.03.91. Byul. no. 12.
15. *Gudchenko, A. P., Kuzmichev, L. V.* (1969) The formation of porosity in aluminum ingots. Issledovanie protsessov litya alyuminievyykh, magnievyykh i titanovykh splavov. Trudy MATI, no. 70, pp. 117–132 [in Russian].
16. *Kotlyarskiy, F. M., Borisov, G. P.* (2007) Low-waste casting of aluminum alloys. K.: Naukova dumka, 160 p. [in Russian].

Received 02.04.2019

**Ф. М. Котлярський**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України

### **ВПЛИВ СУМІЩЕННЯ НАВОДНЮВАННЯ З ІНШИМИ ВИДАМИ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ НА ФОРМУВАННЯ ТА ЯКІСТЬ ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ**

*Експериментально доведено, що наводнення рідких алюмінієвих сплавів перед заливкою в ливарні форми можна зменшити і навіть усунути брак виливків по гарячеламкості, утяжинам, негерметичності металомістких вузлів. Однак при цьому зазвичай не звертають увагу на те, що цей же розплав паралельно може піддаватися модифікуванню, в тому числі введенню стружки, або рафінуванню. Таке суміщення може призвести до непередбаченого впливу на якість вилівка. В роботі показано, що суміщення наводнення з введенням стружки призводить до різкого збільшення і нерівномірного розподілу газової пористості, що небажано. Модифікування флюсом через зниження в розплаві кількості частинок  $Al_2O_3$  прискорює дифузійне видалення водню, через що розливку розплаву слід робити незабаром після наводнення. Поєднання з модифікуванням стронцієм при оптимальній витримці дозволяє істотно підвищити міцність та пластичність. Розроблена методика визначення протяжності пор, що допомагає розібратися в механізмах їх утворення та покращити герметичність литих виробів.*

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, виливки, розплав, наводнення, модифікування, рафінування, газоусадочні дефекти.

**F. M. Kotlyarskiy**, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher  
Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine

### **INFLUENCE OF MELT HYDROGENATION WITH OTHER TYPES OF PROCESSING ON FORMATION AND QUALITY OF CASTINGS FROM ALUMINUM ALLOYS**

*It has been experimentally proved that hydrogenation of liquid aluminum alloys before pouring into molds can reduce and even eliminate the defect castings in hot brittleness, lattices, leaks of metal-consuming units. However, this usually does not draw attention to the fact that the same melt in parallel can be modified, including the introduction of chips, or refining. Such a combination may have an unexpected effect on the quality of the casting. The work shows that combining the hydrogenation with the introduction of chips leads to a sharp increase and uneven distribution of gas porosity, which is undesirable. Flux modification due to the reduction of  $Al_2O_3$  particles in the melt accelerates the diffusion removal of hydrogen, therefore, the melt should be cast soon after hydrogenation. Combining with strontium modifying at optimum holding can significantly increase strength and ductility. A method has been developed for determining the length of pores, which helps to understand the mechanisms of their formation and improve the tightness of cast products.*

**Keywords:** aluminum alloys. casting, melt, hydrogenation, modification, refining, gas shrinkage defects.