

---

## ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ

УДК 669.154:66.067:669.715

**А. В. Наривский, В. Л. Найдек, Н. С. Пионтковская**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА НА КАЧЕСТВО ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*Показано влияние вакуумно-плазменной обработки расплава на процесс дегазации, структуру и прочностные характеристики деформируемых алюминиевых сплавов, полученных из шихты с разным содержанием металлоотходов.*

**Ключевые слова:** алюминий, расплав, плазменная струя, сплавы, структура, дегазация, шихта, металлоотходы.

*Показано вплив вакуумно-плазмової обробки розплава на процес дегазації, структуру та міцнісні характеристики деформованих алюмінієвих сплавів, що отримані із шихти з різним вмістом металовідходів.*

**Ключові слова:** алюміній, розплав, плазменний струмень, сплав, структура, дегазація, шихта, металовідходи.

*Influence of vacuum-plasma refining of a melt on the degassing process, structure and the strength characteristics of the deformed aluminum alloys obtained from the charge with the different content of the metal scrap is shown.*

**Keywords:** aluminum, melt, a plasma stream, alloy, structure, degassing, charge, metal scrap.

Эффективным способом рафинирования сплавов от вредных примесей является вакуумирование жидкого металла. Однако применение вакуумной обработки в качестве единственной операции не всегда обеспечивает необходимый уровень очистки сплавов от газов и неметаллических включений. Кроме этого для вакуумирования сплавов требуется сложное и достаточно дорогое оборудование, при использовании которого возникают трудности по герметизации вакуумных камер и отдельных узлов в установках, эксплуатируемых при высоких температурах.

В ФТИМС НАН Украины созданы технологии вакуумно-плазменной обработки сплавов при порционной и непрерывной разливке металла [1-5]. Новые технические решения позволяют эффективно рафинировать (модифицировать) сплавы с помощью простого оборудования (рис. 1). Камеру вместе с работающим плазматроном погружают в расплав и включают вакуумный насос. В зависимости от величины разряжения металл в камере поднимается на определенную высоту. Герметизация вакуумной камеры при этом обеспечивается расплавом, в которой она заглублена.

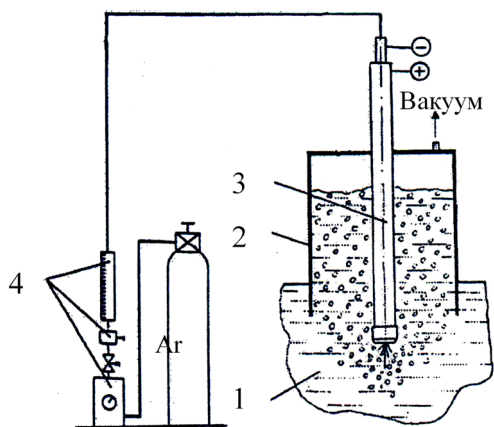


Рис. 1. Схема вакуумно-плазменной обработки жидкого металла: 1 – расплав; 2 – камера вакуумная; 3 – плазмотрон; 4 – система подачи газа в плазмотрон

Диаметр камеры и расположение сопла плазмотрона выбирают так, чтобы все пузыри газа при продувке металла поступали в камеру. В этом случае поверхность расплава за пределами камеры находится в спокойном состоянии. Оксидная пленка или наведенный на этой поверхности флюс препятствуют поступлению водорода из атмосферы в расплав при рафинировании.

Реагенты, необходимые для обработки сплава, предварительно загружают в дозатор, а затем подают в камеру в процессе рафинирования металла. Реагенты поступают в верхние слои вакуумируемого расплава, где при продувке газовыми струями достигается самая высокая интенсивность массообмена. В результате этого вводимые добавки хорошо замешиваются и равномерно распределяются в металле.

В данной работе приведены результаты исследований по влиянию вакуумно-плазменной обработки расплава на процесс дегазации, структуру и механические свойства алюминиевых сплавов АД 31 (ГОСТ 23855-79), полученных из разной шихты.

Для приготовления сплавов использовали стандартные чушки и разное количество металлоотходов. Половину этих отходов составляли бывшие в эксплуатации строительные конструкции (уголки, профили), остальное – прессостатки после экструзионного получения изделий из сплава АД 31. Шихту с разным содержанием отходов плавил в печи сопротивления с тиглем из чугуна емкостью 100 кг. Перед каждой плавкой тигель чистили и окрашивали краской фирмы “SCHAFER GmbH” (Германия). Обработку жидкого металла проводили в течение 10 мин при температуре 730-735 °С по схеме (рис. 1). Расплав продували плазменной или холодной газовой струей при одинаковом расходе аргона 7,5 л/мин и разряжении в вакуумной камере 8 КПа. Холодный аргон подавали в глубь металла через отключенный от источника тока плазмотрон. Вакуумно-плазменную обработку сплава проводили при напряжении на плазмотроне ~ 40 В и токе ≤ 500 А. Металл при температуре 725-730 °С заливали в нагретые до 250 °С кокили. Из полученных отливок изготавливали образцы для исследований (рис. 2).

Содержание водорода в сплавах определяли по результатам измерений его в 4-х образцах из одной отливки на установке RHEN-602 фирмы LECO. Микроструктуру сплавов исследовали на микроскопе Неофот-2 при увеличении до 400 крат, макроструктуру – с помощью микроскопа МБС-9 при увеличении 8 крат.

Загрязненность сплавов оксидными включениями определяли по отношению площади всех частиц (мм<sup>2</sup>) к площади поверхности, на которой они выявлены. Для этого на полированной поверхности образца выбирали наиболее пораженный оксидами участок площадью 1 см<sup>2</sup>. Используя метод секущих, на каждой линии измеряли общую длину включений в поперечном сечении при 500-кратном увеличении частиц. Затем рассчитывали среднюю длину  $l_{cp}$  включений на всех линиях путем деления суммарной величины частиц на количество секущих (в нашем случае – 4 секущие). Площадь, занятую оксидными включениями, рассчитывали как площадь круга диаметром  $l_{cp}$ .

Концентрация водорода и оксидных включений в сплавах, приготовленных из разной шихты, представлена в таблице.

Из приведенных данных видно, что с увеличением доли металлоотходов в шихте до 80 % содержание водорода в сплавах повышается в 2,3-2,4 раза, оксидов – вдвое. Рафинирование расплава холодным аргоном в вакууме позволяет снизить концентрацию водорода в сплавах на 40-45 %. При вакуумно-плазменной обработке дегазация сплавов проходит эффективнее и содержание водорода в них уменьшается на 59-64 %.

Остаточная концентрация водорода в закристаллизованных сплавах зависит также от качества шихтовых материалов. После вакуумно-плазменной обработки полученного из чушки сплава содержание водорода в нем снижается до 0,13 см<sup>3</sup>/100 г. По мере увеличения доли металлоотходов в шихте до 30, 50 и 80 % остаточная концентрация водорода в сплавах повышается до 0,17-0,25 см<sup>3</sup>/100 г.

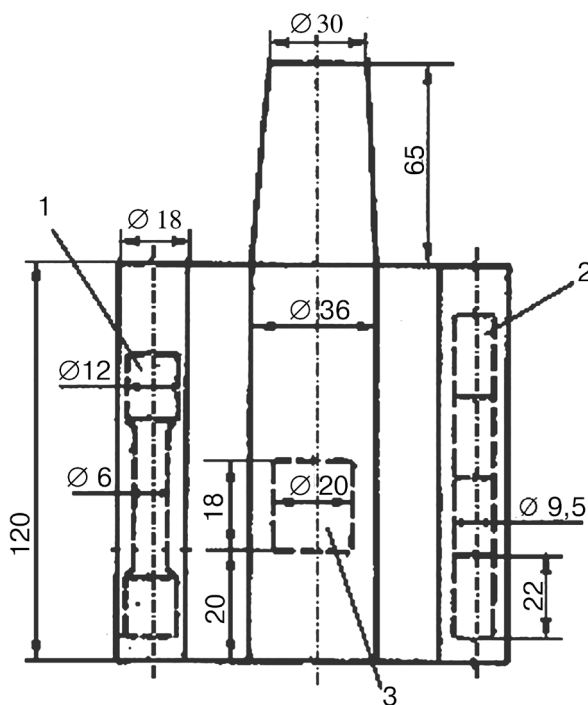


Рис. 2. Схема отливки и отбора образцов для: 1 – механических испытаний; 2 – определения содержания водорода в металле; 3 – исследования структуры сплавов

### Содержание водорода и оксидов в сплавах

Способ рафинирования	Количество металлоотходов в шихте, %			
	0	30	50	80
Без обработки	0,36	0,47	0,56	0,71
	0,041	0,064	0,054	0,068
Холодным аргоном в вакууме	0,21	0,25	0,31	0,35
	0,024	0,038	0,032	0,05
Плазменной струей в вакууме	0,13	0,17	0,22	0,27
	0,020	0,025	0,022	0,043

Примечание: числитель – газосодержание металла (см<sup>3</sup>/100 г мет.); знаменатель – концентрация оксидов (мм<sup>2</sup>/см<sup>2</sup>)

После плазменного рафинирования расплава в вакууме содержание водорода в сплавах на 30-38 % ниже, чем в обработанных холодным аргоном. Это достигается за счет увеличенного объема и поверхности пузырей рафинирующего газа в расплаве при плазменной обработке. По результатам физического моделирования определили, что при расходе аргона 7,5 л/мин, которым обрабатывали сплавы, площадь межфазной поверхности пузырей в реакционной зоне плазменной струи составляет 84 см<sup>2</sup>, а холодной – не превышает 23 см<sup>2</sup>. При глубинной обработке сплавов плазменной струей интенсифицируется также массоперенос водорода в жидком металле и через границу раздела в нагретые пузыри аргона.

При увеличении количества металлоотходов в шихте концентрация этих вклю-

чений в сплавах повышается. Основная часть неметаллических включений в алюминиевых расплавах достаточно дисперсна и их размер не превышает 0,3-0,6 мкм [6]. В зависимости от химического состава сплавов в них могут присутствовать и более крупные оксиды алюминия и магния, карбиды алюминия, разные шпинели и другие включения, величина которых достигает 20-80 мкм [7].

Водород в алюминиевых расплавах при наличии оксидов может находиться в растворенном состоянии и связанном в комплексы  $H_2-Al_2O_3$ . Образование таких комплексов авторы работ [8-10] объясняют тем, что водород и оксиды в жидком металле находятся в виде заряженных частиц. Оксиды алюминия имеют положительный заряд, поэтому практически не коагулируют в расплаве и плохо удаляются из него [11, 12]. При температуре расплава выше 600 °С оксиды алюминия хорошо адсорбируют водород [13]. Теплота адсорбции водорода на включениях  $Al_2O_3$  не превышает 12 ккал/моль [14], поэтому более вероятным является образование комплексов за счет адсорбционного осаждения водорода на поверхности оксидов.

Оксиды алюминия имеют разные ( $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\chi$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$  и другие) структурные модификации [15]. Наиболее высокотемпературной составляющей оксидов является  $\alpha-Al_2O_3$ . Остальные модификации оксидов – низкотемпературные и их обычно включают в общую структурную составляющую  $\gamma-Al_2O_3$ . При повышенных ( $\approx 1000$  °С) температурах в алюминиевых сплавах происходит превращение  $\gamma-Al_2O_3$  в корунд ( $\alpha-Al_2O_3$ ) [16]. Образующийся в расплаве корунд полностью теряет адсорбционные свойства по отношению к водороду [8]. В результате этого дегазация сплавов с частицами корунда происходит так же, как и очищенного от оксидов металла [17]. В перегретом плазменной струей объеме металла (на  $\sim 400$  град выше среднемассовой температуры) оксиды  $\gamma-Al_2O_3$  превращаются в корунд более интенсивно. В результате этого при плазменной обработке водород удаляется из сплавов более эффективно по сравнению с продувкой расплава холодным аргоном, когда образование корунда затруднено или исключается полностью.

В процессе дегазации алюминиевых сплавов с концентрацией водорода в них на уровне растворимости из расплава удаляются в основном крупные оксиды, которые не влияют на структуру и газосодержание в закристаллизованных сплавах [18]. При перемешивании расплава в вакууме из сплавов удаляются и более мелкие включения. После вакуумно-плазменной обработки сплавов, приготовленных из шихты с содержанием металлоотходов до 50 %, количество оксидных включений в расплаве уменьшается на 50-60 % (см. таблицу). Степень рафинирования сплавов от оксидов при этом на 10-20 % больше по сравнению с продувкой расплава аргоном в вакууме. С увеличением в шихте содержания металлоотходов до 80 % эффективность рафинирования сплавов снижается. Так, после продувки вакуумируемого расплава холодной или плазменной струей аргона степень удаления оксидов из этого сплава не превышает 26 и 37 % соответственно.

Дисперсные оксиды, которые остаются в расплаве, способствуют зародышеобразованию в сплавах, а их количество зависит от загрязненности шихтовых материалов. Поэтому с увеличением содержания металлоотходов в шихте размеры структурных составляющих в сплавах уменьшаются (рис. 3). Средний размер ( $l_{cp}$ ) зерна в сплаве из чушки составляет 68 мкм. При добавлении в шихту металлоотходов в количестве 30, 50 и 80 % величина зерна в сплавах уменьшается до 57, 49 и 36 мкм.

После обработки расплава холодным аргоном в вакууме  $l_{cp}$  в сплаве из чушки уменьшается до 62 мкм, а в сплавах из шихты с 30 и 50 % отходов – до 55 и 47,5 мкм. Вакуумирование перемешиваемого холодным аргоном расплава из шихты с 80 % металлоотходов слабо влияет на структуру сплава и  $l_{cp}$  в нем практически не изменяется.

В сплавах, обработанных плазменной струей в вакууме, величина зерна меньше

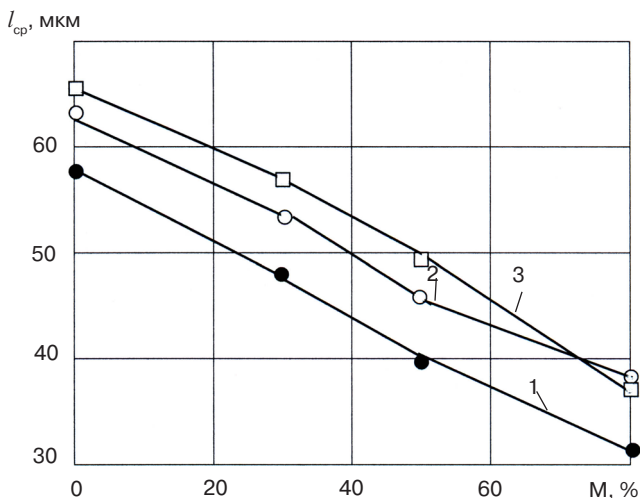


Рис. 3. Средний размер зерна в сплавах после обработки расплава в вакууме: 1 – без обработки; 2 – холодной струей аргона; 3 – плазменной струей

по сравнению с продувкой расплава холодным газом. Это можно объяснить, во-первых, разной интенсивностью перемешивания сплавов, под действием которого уменьшается масштаб микрогруппировок в расплаве. Мощность перемешивания жидкого металла плазменной струей в 4,0-4,5 раза больше по сравнению с холодной [19], поэтому разрушение микрогруппировок в расплаве в процессе плазменного рафинирования происходит интенсивнее и уменьшаются их размеры. Во-вторых, при плазменной обработке в сплавах могут образовываться дополнительные дисперсные включения за счет разрушения интерметаллидов и крупных оксидов под воздействием высокотемпературной струи («тепловой удар»). При этом уменьшается негативное влияние железа на свойства сплавов за счет дробления его соединений в расплаве.

В реакционной зоне плазменной струи происходит также испарение компонентов сплава. Образующиеся пары металлов при выходе из этой зоны быстро охлаждаются до среднемассовой температуры металла («конденсируются»). Частицы такого «конденсата» способствуют возникновению пузырьков водорода в расплаве и интенсифицируют процесс зародышеобразования в сплавах. В зависимости от энергетических параметров плазматрона масса испарившихся компонентов в расплаве может изменяться в широких пределах. Так, за одну минуту обработки расплава погружным плазматроном мощностью ~ 20 кВт в глубинных слоях ванны испаряется до 0,18 кг компонентов, которые входят в состав алюминиевого сплава АК7 [19].

Изменения, которые происходят в расплаве и структуре сплавов при разных способах их обработки, оказывают влияние на механические свойства литого металла (рис. 4). С повышением содержания отходов в шихте предел прочности на разрыв в нерафинированных сплавах уменьшается. Относительное удлинение сплавов из шихты, содержащей до 60 % отходов, составляет 20-22 %. Дальнейшее добавление металлоотходов в шихту приводит к снижению пластичности металла. После рафинирования расплава холодным аргоном в вакууме прочность сплавов увеличивается на 3-6 % при их относительном удлинении 22-23 %. Вакуумно-плазменная обработка расплава позволяет повысить предел прочности на разрыв в сплавах на 10-14 %, пластичность – на 24-32 % по сравнению с нерафинированным металлом.

Повышенные значения механических свойств металла после обработки его

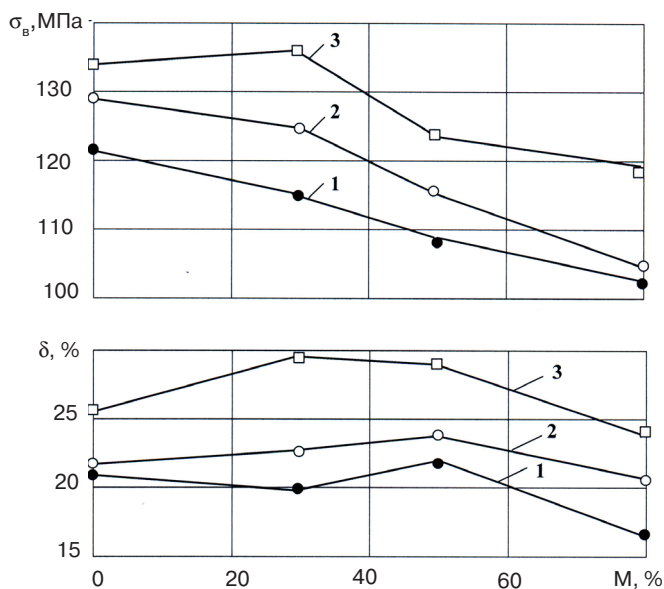


Рис. 4. Прочностные характеристики сплавов из шихты с разным содержанием металлоотходов: 1 – без обработки; 2 – рафинированные аргоном в вакууме; 3 – после вакуумно-плазменной обработки

плазмой в вакууме обусловлены эффективным рафинированием сплавов и измельчением структурных составляющих в них. Кроме того, при плазменном рафинировании расплав подвергается термовременной обработке в реакционной зоне высокотемпературной струи, что также способствует повышению прочностных характеристик в литом металле. Представленные данные свидетельствуют о том, что после вакуумно-плазменного рафинирования расплава прочностные характеристики в деформируемых сплавах из низкосортной шихты находятся на уровне металла из чушки.



### Список литературы

1. Пат. 69091 Украина, МПК С22В 9/04. Способ обработки жидкого металла / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, Н. С. Ганжа и др. – Оpubл. 2004, Бюл. № 8.
2. Пат. 75829 Украина, МПК С22В 9/00, НО5Н 1/26. Способ вакуумно-плазменной обработки сплавов / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, В. И. Курпас и др. – Оpubл. 2006, Бюл. № 5.
3. Пат. 85988 Украина, МПК С22В 9/05. Способ вакуумно-плазменной обработки расплава / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, В. И. Курпас и др. – Оpubл. 2008. – № 2.
4. Пат. 81701 Украина, МПК С 229/00, С 22В 9/22, НО5Н 1/26. Способ обработки жидкого металла в промежуточном ковше / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, В. И. Дубоделов и др. – Оpubл. 2009, Бюл. № 23.
5. Пат. 86725 Украина, МПК С 22В 9/04, С 22В 9/05. Способ вакуумно-плазменной обработки сплавов в магнитодинамической установке / В. Л. Найдек, В. И. Дубоделов, А. В. Наривский и др. – Оpubл. 2009, Бюл. № 9.
6. Макаров Г. С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами. – М.: Metallургия, 1983. – 120 с.
7. Макаров Г. С. Закономерности взаимодействия твердых неметаллических включений в алюминиевом расплаве с рафинирующим газом // Технология легких сплавов. – 1998. – № 4. – С. 29-33.

8. Газы в цветных металлах и сплавах / Д. Ф. Чернега, О. М. Бялик, Д. Ф. Иванчук, Г. А. Ремизов. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
9. Альтман М. Б. Неметаллические включения в алюминиевых сплавах. – М.: Металлургия, 1965. – 127 с.
10. Постников Н. С., Черкасов В. В. Прогрессивные методы плавки и литья алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
11. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах / В. И. Добаткин, Р. М. Габидуллин, Б. А. Колачев и др. – М.: Металлургия, 1976. – 263 с.
12. Мархасев Б. И. О контактных процессах на границе расплавленный металл–окисел // Расплавы. – 1987. – № 1. – С. 60-63.
13. Егоров М. М. О природе поверхности каталитически активной окиси алюминия // Докл. АН СССР. – 1961. – № 2, т. 140. – С. 401-404.
14. Топчиева К. В., Московская Н. Ф. Хемосорбция водорода на алюмосиликатах и окислах алюминия и кремния // Вестник МГУ. Химический раздел. – 1960. – № 2. – С. 22-26.
15. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов / А. В. Курдюмов, С. В. Инкин, В. С. Чулков, Н. И. Графас – М.: Металлургия, 1980. – 196 с.
16. Ветчинкина Т. Н. Исследование физико-химических свойств оксида алюминия, полученного щелочным и кислотным способами // Металлы. – 2009. – № 2. – С.30-40.
17. Пименов Ю. П. Изучение чистоты алюминия по неметаллическим включениям при обработке его в жидком состоянии // Технология легких сплавов (ВИЛС). – 1967. – № 2. – С. 29-36.
18. Курдюмов А. В. Очистка сплавов цветных металлов от взвешенных неметаллических включений и растворенного водорода // Литейн. пр-во. – 1970. – № 5. – С. 4-6.
19. Найдек В. Л., Наривский А. В. Повышение качества отливок из алюминиевых и медных сплавов плазмореагентной обработкой их расплавов. – Киев: Наук. думка, 2008. – 184 с.

Поступила 07.02.2011

УДК 669.18.621.764.047

**В. Н. Баранова, Р. Я. Якобше, В. Л. Найдек,  
О. В. Носоченко\*, З. Л. Козлова, О. И. Майко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев  
\*ОАО «Азовсталь», Мариуполь

## **ВЛИЯНИЕ ГАЗОИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ЗАГРЯЗНЕННОСТЬ МЕТАЛЛА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ**

*Исследовано влияние различных режимов газоимпульсного перемешивания жидкого металла в изложнице и кристаллизаторе МНЛЗ на загрязненность слитков и непрерывнолитых слябов неметаллическими включениями. Установлено, что оптимальные режимы перемешивания жидкого металла эффективно способствуют регулированию и образованию благоприятной формы, размера, количества и равномерного распределения неметаллических включений в заготовках.*

**Ключевые слова:** газоимпульсное перемешивание, неметаллические включения, слиток, непрерывнолитой сляб, жидкий металл.

*Досліджено вплив різних режимів газоімпульсного перемішування рідкого металу в виливниці та кристалізаторі МБЛЗ на забрудненість зливків і безперервнолитих слябів неметалевиими*