

# ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕГАЗИРУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА ПОРИСТОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Manel da Silva, Sylvia Cruz – Eurecat, Centre Tecnològic de Catalunya, Spain

Xavier Planta – Ultrason, S.L., Spain

Jaume Tort, Gonzalo Aguirre – Hornos y Metales, S.A., Spain

*В последнее время ультразвуковая обработка привлекает интерес в области дегазации алюминиевых расплавов из-за ее экологически безопасных свойств. В этой статье описывается эффект ультразвуковой дегазации при приготовлении расплава для различных алюминиевых сплавов при кокильном литье и литье под высоким давлением. Эффективность ультразвуковой дегазации сравнивается с обычной дегазацией фурмой путем прямых измерений концентрации водорода в расплаве с помощью датчика Husal и испытания при пониженном давлении на различных этапах процесса литья. При ультразвуковой дегазации образовывалось значительно меньше шлака, чем при дегазации фурмой. У деталей, отлитых под высоким давлением или в кокильной печи, после дегазации одним из двух методов, определяются механические свойства, микроструктура и уровень пористости. Замечено, что эффективность дегазации того или иного метода зависит от обрабатываемого алюминиевого сплава. Результаты показывают, что детали, полученные после ультразвуковой дегазации, имеют такие же твердость, механические свойства при растяжении, уровень пористости и микроструктуру, что и детали, дегазированные фурмой. Однако ультразвуковая обработка, по-видимому, влияет на распределение пористости, уменьшая количество крупных пор и распределяя пористость более равномерно.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕГАЗАЦИЯ – СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА – ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ – КОКИЛЬНОЕ ЛИТЬЕ

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая дегазация жидких металлов имеет долгую историю. Еще в 1940-х годах Эсмарк с соавт. исследовали дегазацию Al – Mg сплавов звуковыми колебаниями, вызванными бесконтактным электромагнитным перемешиванием и колебаниями в тигле [1]. Начиная с 1960-х годов, Г.И. Эскин проводил и описывал лабораторные и опытно-промышленные испытания ультразвуковой дегазации для литейных и более поздних деформируемых сплавов. Действительно, уже ранние исследования, проведенные Альтманом с соавт. 11, показали, что удаление водорода из алюминиевых сплавов в значительной степени зависит от акустической мощности, передаваемой расплаву, и от развития кавитации.

Эффективность ультразвуковой дегазации зависит от входной мощности ультразвука, температуры расплава, текучести расплава и состава сплава. Фундаментальные исследования по этим вопросам опубликованы в источниках [2-3].

Несмотря на успешные промышленные испытания в 1960–1970-х годах, ультразвуковая дегазация не была принята в качестве основной технологии из-за появления дегазации с использованием аргона. Однако в последние годы характерные особенности ультразвуковой дегазации обусловили возрождение интереса к этой технологии, способной решить текущие экологические проблемы. Кроме того, новый уровень развития технологии ультразвука упрощает ее применение.

В данной статье представлены результаты пилотных испытаний ультразвуковой дегазации с использованием специально разработанного прототипа, применяемого для двух основных технологий литья, а именно, литья под давлением и кокильного литья.

## ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Ультразвуковая дегазация проводилась в течение 20 минут для AlSi7Mg и 10 минут для AlSi9Cu3 (Fe). Обработка проводилась в тигельной кокильной печи емкостью 400 кг, заполненной примерно на 300 кг. Во время дегазации температура сплава AlSi9Cu3 (Fe) составляла  $690 \pm 20^\circ\text{C}$  и  $725 \pm 20^\circ\text{C}$  для сплава AlSi7Mg. Эксперименты проводились с использованием прототипа, специально разработанного для обработки больших объемов расплавленного алюминия. Изображение прототипа показано на Рис. 1. Ультразвуковое оборудование, использованное в экспериментах, состояло из: ультразвукового генератора УЗГК-5-22 МС мощностью 5 кВт, магнитострикционного преобразователя ПМС-5-18 мощностью 5 кВт с водным охлаждением, титанового усилителя, поставляемых компанией РЭЛТЕК (Россия), и ниобиевого наконечника (Рис. 1). Во время обработки сонотрод перемещался с прототипом по поверхности расплава.

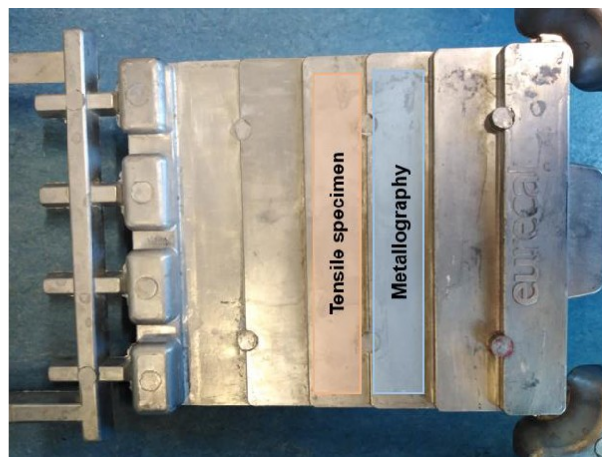
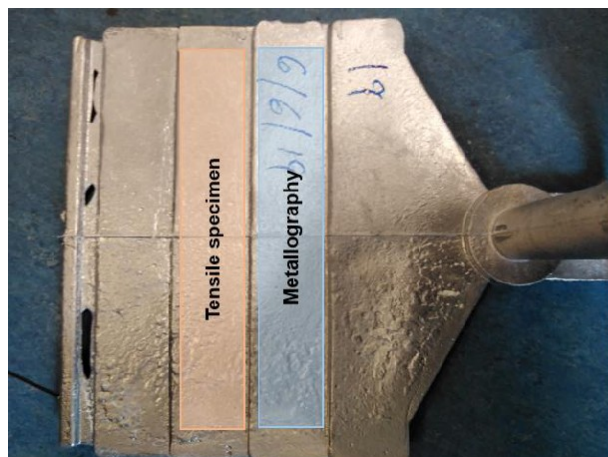
В расплавленный металл подавалось от 4 до 4,5 кВт мощности в диапазоне 17-18 кГц. Для сравнения, в том же количестве металла, с той же температурой и составом проводилась 20-минутная дегазация с барботированием N<sub>2</sub> из пористой графитовой фурмы.



**Рис. 1** – Опытная установка, использованная в экспериментах, общий вид прототипа (слева) и детали ультразвукового генератора и волноводного оборудования (справа)

Измерения содержания водорода проводились до и после дегазации, через 15 минут и 1 час после обработки с помощью метода вакуум-пробы (МК, Германия). Кроме того, содержание водорода непосредственно измерялось датчиком Нуса1. После дегазации расплав использовался для литья деталей с использованием установки для литья под высоким давлением (Bühler Evolution 53D), сплав AlSi9Cu3 (Fe) и формы для кокильного (PMC), сплав AlSi7Mg.

Одна случайно выбранная деталь, полученная после каждой дегазации при кокильном литье, была проверена с помощью компьютерной томографии. Кроме того, детали, полученные кокильным литьем и литьем под давлением, были разделены на секции, чтобы контролировать их свойства при растяжении и микроструктуру. На Рис. 2 представлены фотографии деталей с указанием участков, из которых были извлечены пробы. Свойства при растяжении определяли в соответствии со стандартом ISO 6892-1.



**Рис. 2** – Изображения деталей, полученным кокильным литьем (слева) и литьем под давлением (справа), с указанием областей, где были извлечены образцы для испытаний на растяжение и металлографического контроля

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Кокильное литье из сплава AlSi7Mg

В Таблице 1 представлены индексы плотности, измеренные при ультразвуковой дегазации и при эталонной дегазации фурмой. В обоих вариантах обработки датчик Нуса1 использовался для регистрации фактического содержания водорода в расплаве в течение всего испытания. Выделение водорода, наблюдаемое при различных испытаниях, представлено на Рис. 3. После обработки из каждой партии литьем под действием силы тяжести с помощью постоянной ступенчатой формы была изготовлена 21 деталь.

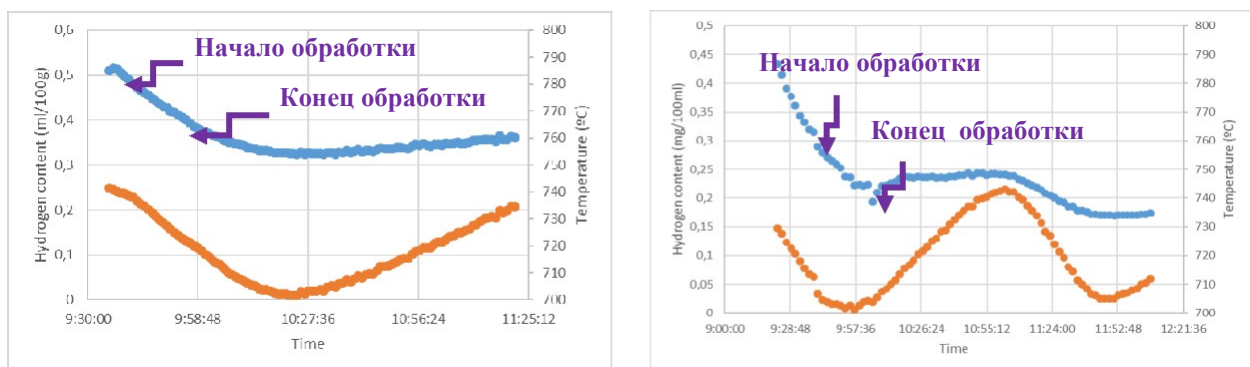
**Таблица 1.** Значения индекса плотности, измеренные для фурмовой дегазации и ультразвуковой обработки сплава AlSi7Mg

НОМЕР ОБРАЗЦА	20-ти минутная дегазация фурмой	20-ти минутная ультразвуковая обработка.
До обработки (1)	5.65	8.69
После обработки (2)	0.37	1.40
15 мин после обработки (3)	0.47	4.10
1 час после обработки (4)	2.48	6.98
Температура окружающей среды	22.7°C	13.1°C
Относительная влажность	32 %	92 %
Масса шлака	2075 г	239 г

Замечено, что оба вида обработки достаточно эффективны, значительно снижая начальное значение индекса плотности. После первого падения индекса плотности он снова увеличивается, но не достигает начального значения. Дегазация с помощью фурмы кажется более эффективной, чем ультразвуковая, но снижение показателей после ультразвуковой обработки также значительно. Кроме того, можно заметить, что влажность окружающей среды в день проведения ультразвуковой обработки была намного выше, что приводило к более быстрой регазации металла после завершения дегазации [3].

Что касается шлака, образовавшегося во время обработки, то при дегазации фурмой образуется почти в 10 раз больше шлака, чем при ультразвуковой обработке, увеличивая долю шлака с 0,08% до 0,69%. Сильное бурление, создаваемое при дегазацией газом, создает волнения на поверхности алюминия, которые усиливают образование шлака. Напротив, ультразвуковая обработка создает очень маленькие полости, превращающиеся в пузырьки, которые практически не разрушают оксидный слой, покрывающий поверхность расплава [4].

Что касается результатов измерений датчика Нусал (Рис. 3), можно заметить, что содержание водорода имеет четкую связь с температурой печи. Собственные колебания температуры, которым подвергается расплав из-за системы нагрева печи, преобразуются в аналогичные колебания содержания водорода, а эффект дегазации скрывается изменением температуры.



**Рис. 3** – Выделение водорода, измеренное с помощью датчика Нусал, для ультразвуковой обработки (слева) и фурмы (справа). Синяя кривая соответствует измеренной концентрации водорода, а оранжевая - измеренной температуре плавления.

Так же, как и для сплава AlSi8Cu (Fe), из каждой партии было отобрано по 5 деталей для последующего контроля. Из каждой детали был изготовлен образец для испытаний на растяжение и проверен на универсальной установке для испытаний. Результаты представлены в Таблице 2.

Как можно видеть, результаты, полученные после испытания деталей, дегазированных ультразвуком, немного лучше, чем после дегазации азотом. Тем не менее, разница в два раза меньше стандартного отклонения, что не позволяет сделать однозначный вывод.

Одна деталь, произведенная из партии, дегазированной азотом (N<sub>2</sub>), и одна деталь, произведенная из партии, дегазированной ультразвуком (УЗ), были выбраны для детального измерения распределения пористости с помощью компьютерной томографии. Результаты процентного содержания пор, найденных для каждого интервала размеров пор, представлены на Рис. 4. Результаты показывают, что количество более крупных пор (с объемом более 0,1 мм<sup>2</sup>) явно выше в детали, дегазированной N<sub>2</sub>. Такое поведение наблюдалось ранее [5], но до сих пор не ясен



механизм, приводящий к подобному более однородному распределению пор. Поры размером менее 0,1 мм<sup>2</sup> имеют гораздо меньшее влияние на пластичность и другие механические свойства, чем поры большего размера.

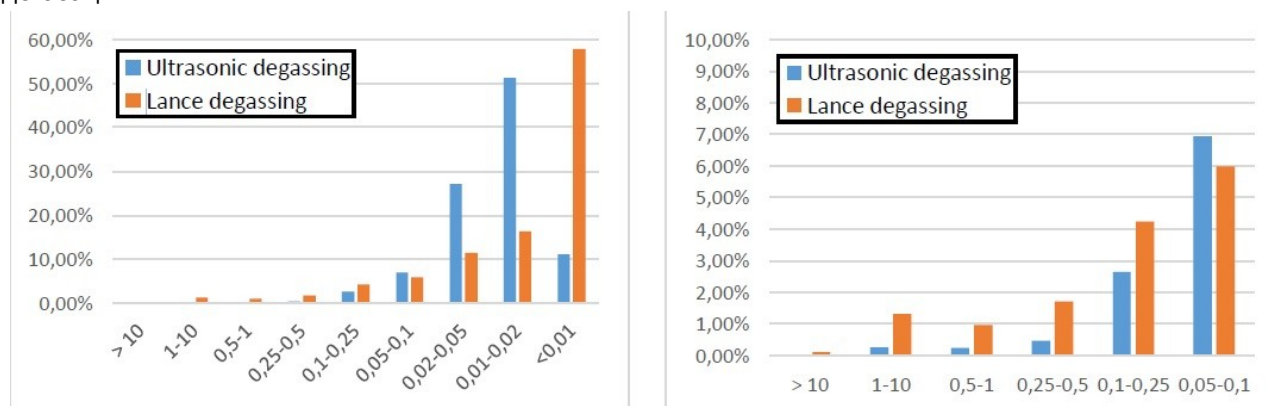
**Таблица 2.** Сечение, измеренное для образцов, испытываемых на растяжение, и значения, полученные при соответствующем испытании на растяжение

	Номер детали	R <sub>p0.2</sub> МПа	R <sub>m</sub> МПа	A <sub>t</sub> (отн.) %		Номер детали	R <sub>p0.2</sub> МПа	R <sub>m</sub> МПа	A <sub>t</sub> (отн.) %
	УЗ-2	117	157	2.28		N2-2	118	172	2.16
Дегазация	УЗ-3	115	171	3.26	Дегазация	N2-5	104	170	3.17
	УЗ-6	121	174	2.23		N2-6	111	169	2.78
ультразвуком	УЗ-8	117	174	2.78	азотом	N2-12	112	151	1.69
	УЗ-10	117	177	3.02		N2-13	99	155	2.51
	<b>Среднее</b>	<b>117</b>	<b>171</b>	<b>2.71</b>		<b>Среднее</b>	<b>109</b>	<b>163</b>	<b>2.46</b>
	<b>Коефф. Стыюдента</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>0.45</b>		<b>Коефф. Стыюдента</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>0.57</b>

### Литье под высоким давлением из сплава AlSi9Cu3 (Fe)

Поочередно использовались две обработки: 10-минутная ультразвуковая дегазация расплава и 20-минутная обработка с помощью фурмы. После обработки металл был использован для производства деталей, отлитых под высоким давлением на установке литья под высоким давлением.

Образцы для испытаний методом вакуум-пробы были взяты из металла перед обработкой (1), сразу после обработки (2), через 15 минут (3) и через 1 час после обработки (4). В таблице 3 представлены результаты индекса плотности, полученные для этого сплава после обоих типов дегазации.



**Рис. 4 –** Распределение всех диапазонов размеров пор в процентах от общего количества пор для деталей, дегазированных ультразвуком и фурмой (слева), и учитывая только поры размером более 0,05 мм<sup>2</sup> (справа).

**Таблица 3.** Значения индекса плотности, измеренные для дегазации и ультразвуком и фурмой сплава AlSi9Cu3 (Fe)

НОМЕР ОБРАЗЦА	20-ти минутная дегазация фурмой	10-ти минутная ультразвуковая обработка.
До обработки (1)	5.14	4.17
После обработки (2)	4.99	0.09
15 мин после обработки (3)	3.08	4.50
1 час после обработки (4)	2.43	4.74
Температура окружающей среды	14.5°C	16.1°C
Относительная влажность	59 %	75 %
Масса шлака	555 г	240 г

Дегазация фурмой немного снижает индекс плотности после обработки, но дегазация продолжается после начала производства. При ультразвуковой дегазации сразу после обработки получается странное значение, равное всего 0,09, но спустя время два оставшихся образца (3 и 4) показывают значение индекса плотности, равное значению начального расплава. Полученные результаты позволяют предположить, что эффект от 10-минутной ультразвуковой обработки для индекса плотности незначителен. Тем не менее, наблюдается, что оба типа обработки не очень эффективны для сплава AlSi9Cu3 (Fe), оказывая очень ограниченное влияние на значение индекса плотности. Что касается шлака, образовавшегося во время обработки, то при дегазации фурмой образуется более чем в два раза больше шлака, чем при ультразвуковой обработке, увеличивая долю шлака с 0,08% до 0,19%.

Для определения механических свойств из каждой партии было отобрано по 5 деталей, отлитых под высоким давлением.

5 HPDC components were selected from each production in order to characterize their mechanical properties. Значения, полученные в ходе испытаний для каждой партии деталей, приведены в Таблице 4. Никаких существенных различий в полученных механических свойствах между обоими методами дегазации не наблюдается. Все образцы имеют одинаковые значения предела текучести, предела прочности и деформации растяжения.

**Table 4.** Section measured for the tensile specimens and values obtained from the corresponding tensile test

Номер		R <sub>p0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>t</sub> (отн.)	Номер		R <sub>p0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>t</sub> (отн.)
детали		МПА	МПА	%	детали		МПА	МПА	%
	181	120	243	0.5		161	121	249	0.5
Дегазация	186	113	230	1.3	Дегазация	163	114	229	0.7
	190	129	267	0.5		164	125	260	0.9
ультразвуко м	191	126	257	0.9	азотом	169	118	235	0.9
	193	108	216	0.8		171	114	225	0.8
<b>Среднее</b>	<b>У3</b>	<b>119</b>	<b>243</b>	<b>0.8</b>	<b>Среднее</b>	<b>N2</b>	<b>118</b>	<b>240</b>	<b>0.8</b>
<b>Кэфф. Стьюдента</b>	<b>У3</b>	<b>9</b>	<b>20</b>	<b>0.4</b>	<b>Кэфф. Стьюдента</b>	<b>N2</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>0.2</b>

## Выводы

Из результатов, полученных в настоящем исследовании, можно сделать следующие выводы:

- Ультразвуковая дегазация, выполняемая с использованием одного источника ультразвука и прототипом установки, позволяет достичь такого же содержания водорода в расплаве, что и действующая промышленная пористая фурма для существенного объема (300 кг) сплава AlSi7Mg.
- Поверхность расплава во время ультразвуковой дегазации нарушается меньше, так как внутри металла образуются кавитационные пузырьки, а поток направлен вниз. В результате наблюдается гораздо меньшее образование шлака по сравнению с дегазированием фурмой.
- Пористость и механические свойства отливок, полученных после ультразвуковой или фурмовой дегазации, аналогичны с некоторой тенденцией к уменьшению содержания крупных пор и улучшенной пластичности после ультразвуковой дегазации.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы хотели бы выразить благодарность за финансовую поддержку, предоставленную программой EuroStars, проводимую компанией Eureka и финансируемую в Испании компанией CDTI в соответствии с Соглашением о гранте CIIP-20172025. Авторы выражают признательность за всю помощь, оказанную членами консорциума.

## Список литературы

- [1] W. Esmarch, T. Rommel, K. Benthler. Werkstoff-Sonderheft. W.V. Siemens Werke, Berlin;1940; 78–87 p.
- [2] G.I. Eskin, D.G. Eskin. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton; 2014.
- [3] D. Eskin, N. Alba-Baena, T. Pabel, M. da Silva. Ultrasonic degassing of aluminium alloys: basic studies and practical implementation. Mater Sci Technol. 2015; 31:79-84.
- [4] M. da Silva, L. Rebolledo, T. Pabel, T. Petkov, X. Planta, J. Tort, D. Eskin. Evaluation of effect of ultrasonic degassing on components produced by low pressure die casting. Internat J Cast Metals Research. 2015; 28: 193-200.
- [5] M. da Silva, A. Bajusz, T. Pabel, T. Petkov, X. Planta. Evaluation of the effect of ultrasonic degassing on components produced by high pressure die casting. The 73<sup>rd</sup> World Foundry Congress. Krakow: Poland; 2018. 341-342.