

## Влияние ультразвуковой обработки расплава в процессе кристаллизации на структуру деформируемых алюминиевых сплавов

Дикун А.О., Ровин С.Л., Хрущёв Е.В.

Белорусский национальный технический университет

В современном литейном производстве немаловажную роль играет получение слитков из цветных сплавов, являющихся заготовками для изделий, изготовление которых осуществляется путём деформирования: экструзией, волочением, прессованием и т.д.

Наиболее важным требованием к таким слиткам является способность к пластической деформации с сохранением твёрдости и прочности без повышения хрупкости и ломкости. Учитывая, что возможности изменения состава сплава, как правило, ограничены требованиями технической документации к его марке, управление свойствами слитка традиционно осуществляется регулировкой режимов термической обработки. При этом стремятся минимизировать или устранить ликвации и измельчить структуру – получить более высокий балл зерна [1].

Сегодня, помимо традиционных методов модифицирования и термообработки, всё большее внимание уделяется физическим методам воздействия на структуру слитка. Среди этих методов выделяется технология ультразвуковой обработки расплавов, отличающаяся относительно низкой энергоёмкостью, компактностью ультразвуковых излучателей, их невысокой стоимостью, простотой монтажа и эксплуатации, и главное высокой эффективностью [2].

Кроме воздействия на размер зерна, ультразвуковая обработка способствует перемешиванию и дегазации расплава, удалению твёрдых включений, ускоряет процесс растворения легирующих элементов, влияет на снижение пористости в слитках [3].

Для проведения экспериментальных исследований влияния ультразвука на деформируемые алюминиевые сплавы на кафедре “Машины и технология литейного производства” была собрана специальная лабораторная установка (рис. 1).



Рисунок 1 - Экспериментальная установка для ультразвуковой обработки расплава алюминия:  
*а* – общий вид установки; *б* – тигель с расплавом в процессе обработки.

В состав установки входит магнитострикционный излучатель в водоохлаждаемом кожухе, штатив с теплоотражающей обмоткой, чаша для установки тигля и генератор ультразвуковых волн. Номинальная мощность установки составляла 1 кВт. Передача колебаний в расплав осуществлялась погружным способом, через волновод из титанового сплава ВТ 18, покрытого нитридом бора. Исследование проводилось на сплаве АW-6060 (EN 573-3-2009).

Образцы массой 180 г загружались в шамотные тигли объёмом, покрытые нитридом бора. Покрытие нитридом бора снижает смачиваемость стенок тигля расплавом, облегчает извлечение образца после кристаллизации и охлаждения металла, а также увеличивает стойкость тигля.

Расплавление образцов осуществлялось в лабораторной муфельной печи типа СНОЛ с регулируемым температурным режимом.

Для эксперимента было изготовлено 2 волновода различной длины 127,8 и 116,9 мм, обеспечивающих обработку при 21 000 и 21 400 Гц соответственно. Образцы обрабатывались при 4 уровнях напряжения на источнике излучения для каждой из частот, что в сумме позволило провести исследование при 8 различных амплитудах ультразвуковых колебаний. Замер амплитуды ультразвуковых волн производился при помощи вибromетра “БМ1-1”. В общей сложности было изготовлено 27 образцов, по 3 на каждый из режимов ультразвуковой обработки и 3, которые кристаллизовались без ультразвукового воздействия.

Обработка начиналась при температуре расплава 700°С, и продолжалось вплоть до полной кристаллизации слитка, что занимало 4,5 мин.

Для металлографического исследования образцы разрезались пополам и изготавливался шлиф. Схема расположения участков, на которых оценивался балл зерна представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 - Схема расположения контрольных участков для металлографического исследования полученных образцов.

В таблице 1 представлены результаты анализа структуры – усреднённые данные определения балла зерна, обработанных и необработанных ультразвуком образцов.

Таблица 1 – Результаты металлографического анализа.

Частота, Гц	Напряжение, В	Амплитуда, мкм	Балл зерна			Среднее значение
			Образец 1	Образец 2	Образец 3	
Без обработки			0,49	1,66	1,77	1,31
21000	0,7	9,2	1,44	2,66	2,38	2,16
	1,35	15,4	2,88	2,79	2,9	2,86
	2	21,6	2,53	2,73	2,65	2,64
	2,6	24,4	3,23	3,79	3,27	3,43
21400	0,7	7	2,04	1,68	1,78	1,83
	1,35	12,2	1,61	3,04	3,04	2,56
	2	18	2,18	3,1	2,84	2,71
	2,6	22	3,38	3,73	3,86	3,66

Для определения балла зерна подготовленные образцы анодировали с помощью прибора для электролитического травления. Для анодирования использовали реактив Баркера (2% р-р HBF<sub>4</sub>). Анализ производился на панорамных изображениях при увеличении x100. Полученная зависимость балла зерна алюминиевых образцов от амплитуды ультразвуковых колебаний представлена в виде графика на рисунке 3.

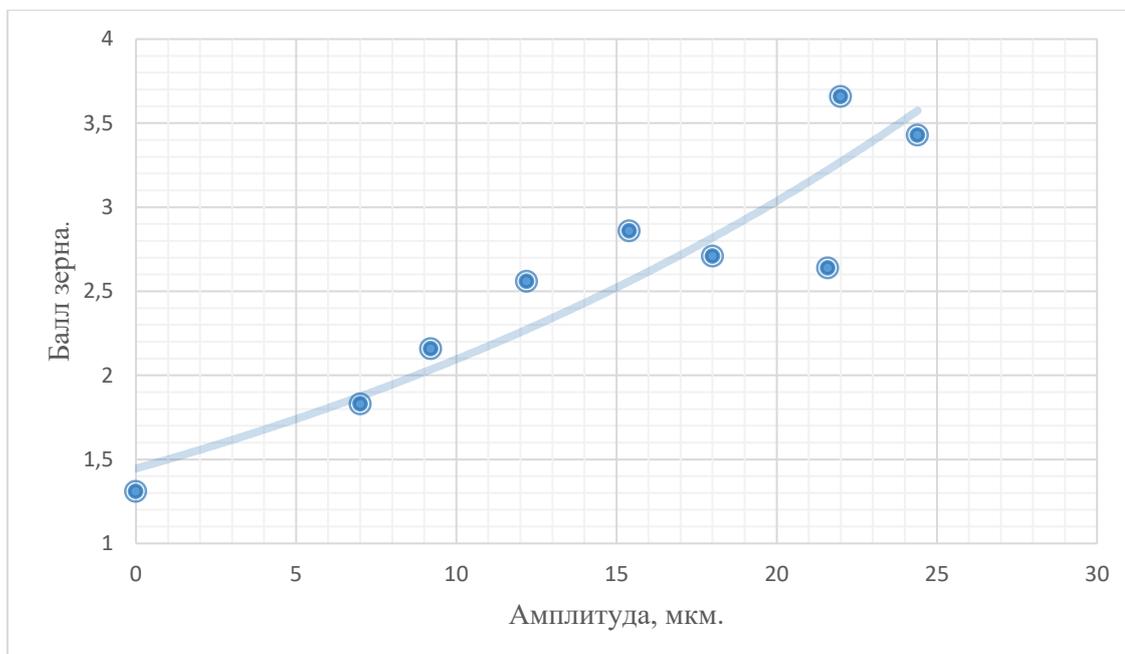


Рис. 3. Зависимость балла зерна от амплитуды ультразвукового воздействия.

На данном интервале амплитуд полученная зависимость балла зерна от амплитуды ультразвукового излучения наиболее близка к экспоненциальной зависимости.

Полученные результаты свидетельствуют о стабильном снижении размера зерна во всех зонах образца (и в непосредственной близости от излучателя – в зоне «5», и в крайних зонах – «край», см. рис. 2), подвергнутого в процессе кристаллизации ультразвуковой обработке. При чём балл зерна тем выше, чем больше мощность и амплитуда ультразвукового воздействия.

В процессе исследования было замечено также значительное снижение пористости обработанных образцов, что подтверждает отмеченные в литературе преимущества ультразвуковой обработки алюминиевых расплавов [3].

### Литература

1. Остерман, Ф. Технология применения алюминия. – М.: НП «АПРАЛ», 2019. – 872 с.
2. Grandfield, J. Direct-Chill Casting of Light Alloys / J. Grandfield [и др.] – John Wiley & Sons, 2013. – 424 с.
3. Sillekens, W.H. The ExoMet Project: EU/ESA research on high performance light metal alloys and nanocomposites / W.H. Sillekens [и др.] – Metal. Mater. Trans. A: Phys. Metal. Mater. Sci, 2014. – No 8. 3349–3361 с.