

1. Писаревский, В.М. Использование вибродиагностики для повышения надежности эксплуатации центробежных насосов / В.М. Писаревский, Л.И. Соколинский. – М., 1988.

2. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. СПб: Изд. центр ГМТУ, 2000.

3. Барков А.В. Диагностирование и прогнозирование состояния подшипников качения по сигналу вибрации // Судостроение. — 1985, № 3, 21—23

4. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. — СПб: Изд. центр СПбГМТУ. — 2004

УДК 621.746.2

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Клубович В.В., академик, д-р техн. наук, профессор
Белорусский национальный технический университет, Минск
nil_p@bntu.by

Дикун А.О., преподаватель-стажер кафедры
«Машины и технологии литейного производства» БНТУ

Хрущёв Е.В., старший преподаватель кафедры
«Машиноведение и детали машин» БНТУ

ULTRASONIC PROCESSING OF CRYSTALLIZING ALUMINUM ALLOYS

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Аннотация: Воздействие на легкие сплавы ультразвуковым излучением, так же, как и электромагнитными полями, является одним из наиболее эффективных и перспективных способов обработки расплавов. Данный метод позволяет обеспечить дегазацию, уменьшение среднего размера зерна в структуре сплава, повысить смачиваемость и деагломерацию частиц.

Ключевые слова: Алюминиевый сплав, ультразвуковые колебаний, волновод, балл зерна, кристаллизация, расплав

Abstract: Impact on light alloys with ultrasonic vibrations as well electromagnetic fields, is one of the most effective methods for processing melts. This method allows for degassing, reducing the average grain size in the alloy structure, increasing particles wet ability and deagglomeration.

Keywords: Aluminum alloy, ultrasonic vibrations, sonotrode, grain score, crystallization, melt.

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 и 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 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 магнестрикционный излучатель в водоохлаждаемом кожухе, штатив с теплоотражающей обмоткой, чаша для установки тигля и генератор ультразвуковых колебаний. 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 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 из титанового сплава ВТ18 различной длины 127,8 и 116,9 мм, обеспечивающих обработку при 21 000 и 21 400 Гц соответственно. Титановый сплав ВТ18 был выбран в качестве материала волноводов, так как титан имеет высокую температуру плавления, практически не растворяется в алюминии, доступен и имеет низкую теплопроводность, что дополнительно защищает магнестрикционный преобразователь от перегрева.

Образцы обрабатывались при 4 уровнях мощности ультразвукового генератора для каждой из частот, что в сумме позволило провести исследование при 8 различных амплитудах ультразвуковых колебаний. Замер амплитуды ультразвуковых волн производился при помощи виброметра

"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 (рисунок 2) начиналась при температуре расплава 700°C, и продолжалось вплоть до полной кристаллизации слитка, что занимало 4,5 мин.



Рисунок 2 – Образец в процессе УЗ обработки.

Для металлографического исследования образцы разрезались пополам и изготавливался шлиф. Схема расположения участков, на которых оценивался балл зерна представлена на рисунке 3.

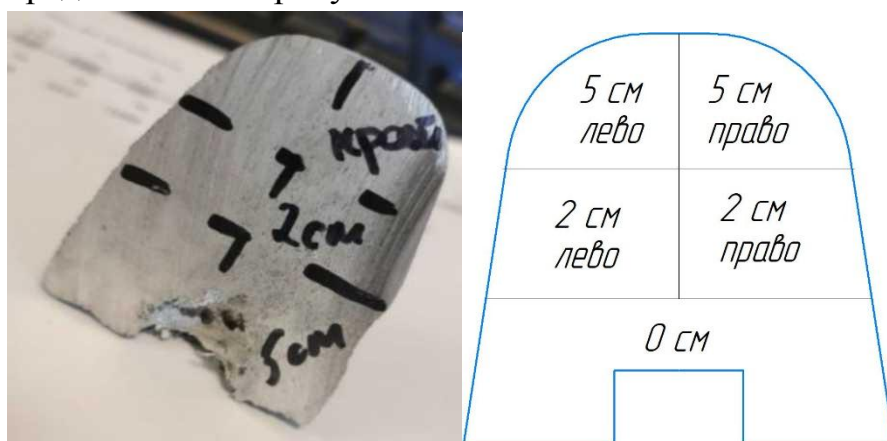


Рисунок 3 - Схема расположения контрольных участков для металлографического исследования полученных образцов.

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

Таблица 1 – Результаты металлографического анализа

Частота, Гц	Напряжени е, 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

Определение балла зерна производилось по методу подсчёта зёрен ГОСТ 5639–82, который заключается в определении количества зерен, приходящегося на единицу поверхности шлифа (1 мм²), и расчете средней площади зерна и среднего диаметра зерна [4].

Число зерен подсчитывают непосредственно на матовом стекле микроскопа или по микрофотографии в пределах площади равной 0,5 мм². Подсчет зерен проводят не менее чем в трех характерных местах шлифа и по полученным результатам рассчитывают среднее арифметическое значение.

Для определения балла зерна подготовленные образцы анодировали с помощью прибора для электролитического травления. Для анодирования использовали реактив Баркера (2% р-р HBF₄). Анализ производился на панорамных изображениях при увеличении x100. На рисунке 4 представлено изображение шлифа, полученное на металлографическом микроскопе.

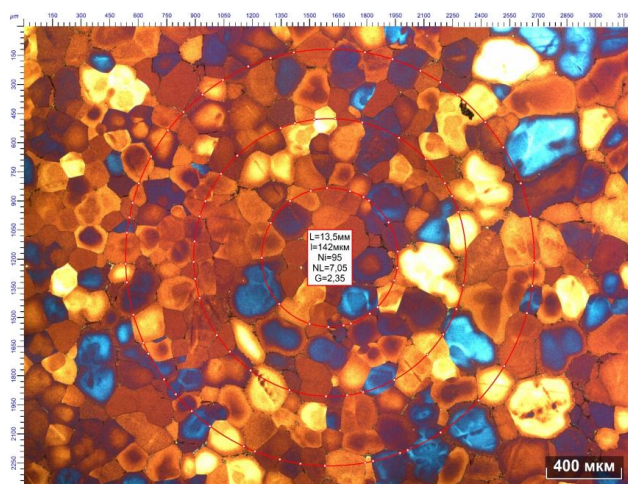


Рисунок 4 – Микрошлиф, полученный на образце № 22

Для оценки наличия и распространения интерметаллидов α -AlFeSi и β -AlFeSi определялись: степень фрагментации фаз или же соотношение суммарной площади поверхности раздела железосодержащих фаз к их суммарному объёму с учётом коэффициентов их формы, а так же соотношение количества (объёма) железосодержащих фаз к общему числу фаз (объёму); степень трансформации фаз или же величину характеризующую отношение α -AlFeSi к β -AlFeSi в общем объёме, а так же в процентном соотношении к общему количеству железосодержащих фаз [5].

Анализ изображений производился при помощи специализированного программного обеспечения для цифрового металлографического микроскопа.

Полученная зависимость балла зерна алюминиевых образцов от амплитуды ультразвуковых колебаний представлена в виде графика на рисунке 5.

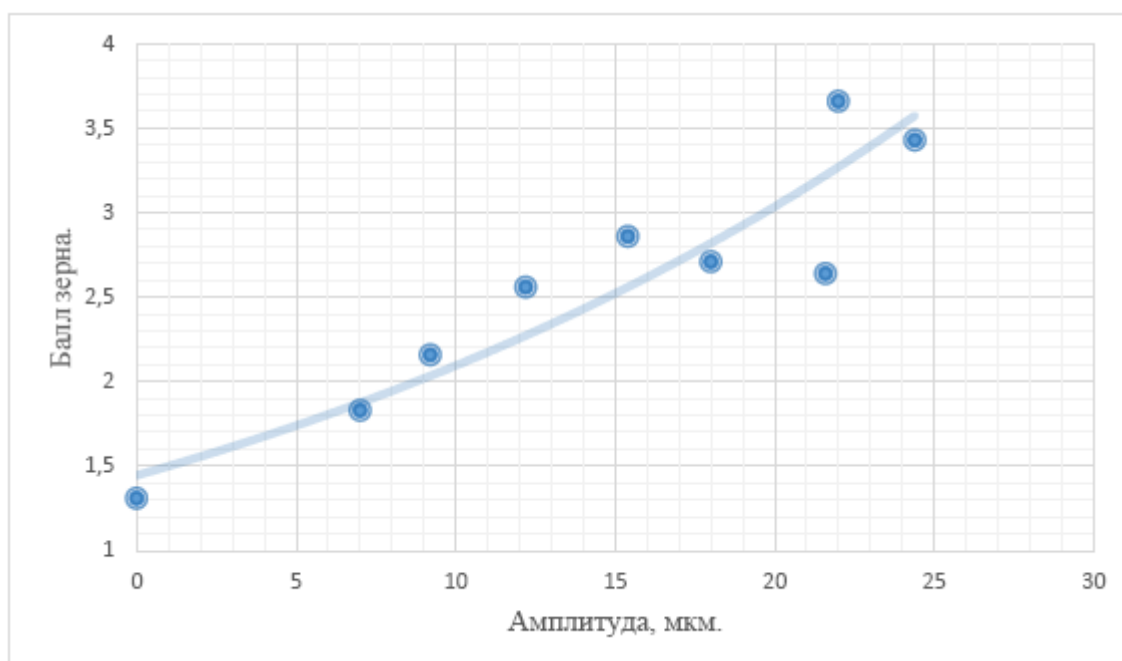


Рисунок 5 - Зависимость балла зерна от амплитуды ультразвуковых колебаний .

На представленном интервале амплитуд полученная зависимость балла зерна от амплитуды ультразвуковых колебаний 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. 3), подвергавшегося в процессе кристаллизации ультразвуковой обработке. Причём балл зерна тем выше, чем больше амплитуда ультразвуковых колебаний.

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

Результаты исследований подтвердили высокий потенциал ультразвуковой обработки с точки зрения улучшения структуры и свойств алюминиевых сплавов и позволяют сделать следующие выводы:

– обработка расплава в процессе кристаллизации приводит к значительному измельчению структуры формирующейся отливки (балл зерна в отливке увеличился более чем в 2,5 раза), что однозначно способствовало повышению её механических свойств;

– замечено увеличение степени фрагментации фаз по объёму и по количеству, что говорит о снижении линейных размеров и дроблении (увеличении общего числа включений) железосодержащих фаз;

– установлено значительное влияние ультразвука на размеры пор в исследованных образцах: средний размер пор составил около 10 мкм (при максимальных амплитудах), что даёт разницу примерно в 5 раз по отношению к необработанным образцам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Остерман, Ф. Технология применения алюминия. - М.: НП "АПРАЛ", 2019. - 872 с.
2. Grandfield, J. Direct-Chill Casting of Light Alloys / J. Grandfield [идр.] - 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 [идр.] - Metal. Mater. Trans. A: Phys. Metal. Mater. Sci, 2014. - No 8. 3349-3361 с.
4. Палеева, С. Контроль величины зерна металлических материалов / С.Я. Палеева – Екатеринбург, 2006. – 11 с.
5. Kumar, S. Evolution of Fe Bearing Intermetallics During DC Casting and Homogenization of an Al-Mg-Si Al Alloy / S. Kumar [идр.]. – Metallurgical and Materials Transactions A, 2016 – 3000–3014 с.