

УДК 669-154:537.8 + 669-154:534-8

## **ИМПУЛЬСНАЯ И УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ**

*Н.А. Шабурова*

Проведен краткий обзор литературных данных по современным способам ультразвуковой обработки расплавов цветных и черных металлов. Определены основные закономерности такого воздействия на структуру и свойства литого металла. Установлена корреляция полученных данных с результатами обработки расплавов мощными электромагнитными импульсами.

Ключевые слова: расплавы, цветные металлы, черные металлы, ультразвуковая обработка, обработка электромагнитными импульсами, структура металла, свойства металла.

В работе [1] описано воздействие ультразвуковых колебаний на зарождение и рост кристаллов алюминиевого сплава марки А356. Использовался УЗ генератор мощностью 1,5 кВт с частотой 20 кГц.

Температуры начала и конца кристаллизации сплава составляют 614 °С и 554 °С, соответственно. Первичные дендриты алюминия образуются при 614 °С, двойная эвтектика при 574 °С, тройная эвтектика и комплекс интерметаллидных фаз формируются на последних стадиях кристаллизации.

Проводили три типа экспериментов, а именно, непрерывная УЗ обработка, прерывистая обработка и изотермическая обработка. При непрерывной обработке ультразвуковую энергию вводили в расплав алюминия в диапазоне температур от 634 до 574 °С (охлаждение в печи). При прерывистой обработке, акустическая энергия вводилась в расплав ступенчато в интервале температур от 614 до 574 °С с шагом в 5 °С (длительность воздействия на каждой ступени варьировалась: 5, 10 и 20 с). При изотермической обработке длительность ее варьировалась от 5, 10 и 20 с.

Без УЗ обработки микроструктура дендритная со средним размером зерна порядка нескольких мм. После УЗ обработки зерна приобретают сферическую форму со средним размером зерна 200 мкм.

В прерывистом режиме, так же как и непрерывной обработке устраняется дендритная структура, и формируются округлые зерна. В то же время, такое воздействие эффективнее измельчает зерно, т.к. в этих условиях охлаждение идет быстрее, чем при непрерывной УЗ обработке. Увеличение длительности УЗ воздействия в изотермических условиях до 10 и 20 с, незначительно улучшило структуру.

Таким образом, наилучшие результаты по измельчению и сфероидизации зеренной структуры были получены при прерывистой изотермической обработке.

В работе [2] исследовалось влияние ультразвуковой обработки расплава на качество поверхности слитков непрерывнолитой заготовки сплава Al-1% Si. Использовался генератор УЗ с максимальной мощностью 1 кВт и частотой 22,3 кГц.

В отсутствии ультразвукового воздействия температура по длине разливочного устройства 100 мм снижается на 11°C. При УЗ же воздействии распределение температуры по сечению более равномерное и максимальный градиент составляет 2 °С.

При ультразвуковой обработке поверхность слитка сгладилась настолько, что отпала необходимость в последующей операции зачистки поверхностного слоя. Шероховатость поверхности верхней части слитка снизилась с 30 мкм до 10 мкм; на дне с 40 до 10 мкм. Исследование микроструктуры полученных слитков показало, что в отсутствии ультразвуковой обработки расплава структура состоит главным образом из крупных зерен (средний размер зерна составляет 94,1 мкм). Ультразвуковая обработка расплава при непрерывном литье ( $P = 1000$  Вт), приводит к измельчению зерна, а средний размер зерна снижается до 31,2 мкм. Так же, согласно полученным данным после УЗ воздействия повышается растворимость кремния в  $\alpha$ -фазе, первичные кристаллы кремния становятся тоньше.

Авторы работы [3] использовали ультразвуковую обработку для изменения литой структуры и улучшения механических свойств сплава AlSi9Cu3. Масса обрабатываемого металла 0,4 кг. Металл нагревался до температуры 700 °С и гомогенизировался в течении 15 минут. Затем расплав переливался в предварительно подогретые стальные изложницы. УЗ обработка проводилась в изотермических условиях при температурах 615, 620, 630 и 640 °С в течение 120 с, при погружении излучателя в расплав на 10 мм. Выбранные температуры обработки обеспечивали перегрев расплава на 3 °С, 8 °С, 18 °С и 28 °С, соответственно, относительно температуры ликвидус. Частота используемых УЗ колебаний  $19,8 \pm 0,25$  кГц, мощности 200, 400, 600 Вт для каждой температуры обработки.

Микроструктура образца, отлитого без УЗ обработки расплава полностью дендритная, длина отдельных ветвей достигает 700 мкм. УЗ обработка при 640 °С способствовала формированию грубых розеточных зерен алюминия со средним размером около 65 мкм. Для температур 630 °С и 620 °С микроструктура сплава представляет собой смесь небольших розеткоподобных и округлых зерен со средним размером около 55 мкм. Эффект УЗ воздействия при 615 °С намного выше, что проявляется в преобладании в микроструктуре сферических зерен со средним размером зерен около 43 мкм. Кроме изменения размера и формы выделения зерен отмечено изменение размера, толщины и межфазного расстояния эвтектических выделений кремния. Для каждой температуры обработки повышение мощности способствовало измельчению зерна.

Результаты механических испытаний образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические характеристики сплава AlSi9Cu3

Режим обработки образца	$\sigma_b$ , МПа			$\delta$ , %		
	при мощности			при мощности		
	200 Вт	400 Вт	600 Вт	200 Вт	400 Вт	600 Вт
Обработка УЗ при 615°C	266	296	332	0,9	1,6	2,9
Без УЗ обработки	220			0,6		

В работе [4] исследовали микроструктуру и механические свойства сплава: Al–17 Si, 2 Fe, 2 Cu, 1 Ni, 0,8 Mn, отлитого литьем под давлением. Применялся генератор УЗ мощностью 1,6 кВт с частотой 20 кГц. В микроструктуре авторы отмечают изменение формы и количества кристаллов первичного кремния и железосодержащих фаз. Результаты механических испытаний литого металла и после термообработки по режиму Т6 показаны в таблице 2.

Таблица 2

Механические свойства образцов

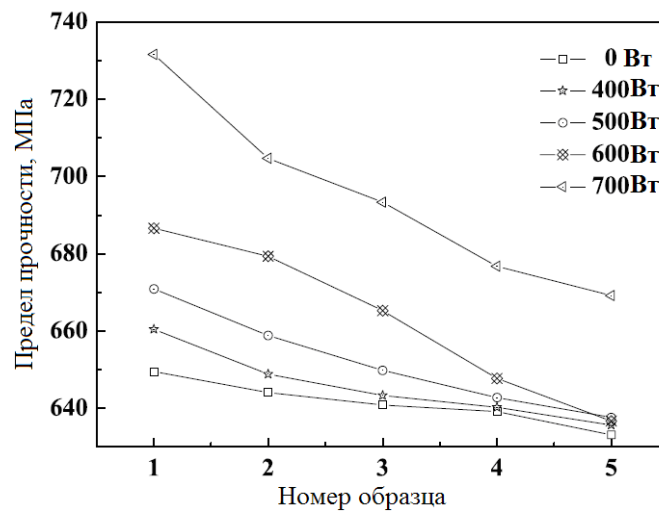
Режим обработки	$\sigma_b$ при комн. температуре, МПа		$\delta$ , % при комн. температуре (т/о по Т6)	$\sigma_b$ при 350 °С (т/о по Т6), МПа	$\delta$ , при 350 °С (т/о по Т6), %	НВ (т/о по Т6)
	Литой	т/о по Т6				
Без УЗ	185	229	0,57	112	0,70	Без УЗ
685–665 °С	198	261	0,67	122	0,93	685–665 °С
665–645 °С	234	309	0,80	135	1,20	665–645 °С
645–625 °С	210	282	0,73	130	1,10	645–625 °С

В работе [5] исследовали магниевый сплав AZ91. Температуры ликвидус и солидус сплава – 598 °С и 468 °С, соответственно. Температура для УЗ воздействия была выбрана от 615 °С до 580 °С. Максимальная мощность используемого УЗ генератора 1,2 кВт, частота 19 кГц. Излучатель погружался в расплав, перегретый до 720 °С. Затем печь выключалась. При испытаниях образцов на растяжение были обнаружены различия. Для образца, необработанного УЗ в процессе кристаллизации, предел текучести, прочности и относительное удлинение составили соответственно 81 МПа, 288 МПа и 14,9 %. Для обработанного образца те же характеристики – 94 МПа, 376 МПа и 22,0 %.

В работе [6] исследовали воздействие УЗ на коррозионно-стойкую сталь, содержащую: С – 0,06 %; Cr – 17,45 %; Ni – 8,96 %; Ti – 0,41 %, остальное Fe. Мощность УЗ генератора 400, 500, 600 и 700 Вт, частота 20 кГц.

Сталь нагревали до 1650 °С, затем разливали в литейную форму размером 120x60x60 мм и обрабатывали УЗ мощностью 0, 400, 500, 600 и 700 Вт. Затем вырезали по пять образцов вдоль направления распространения УЗ: первый ближе всего к излучателю и, далее, 2-й, 3-й, 4-й, 5-й по удалению от излучателя.

Результаты определения предела прочности образцов показаны на рисунке.



Прочностные свойства стальных образцов, обработанных по различным режимам

Видно, что при увеличении мощности прочность всех исследуемых образцов возрастает. Более того, при 700 Вт наблюдается крутой подъем и наибольший прирост прочности, по сравнению с использованием других мощностей. Прирост прочности первого образца при повышении мощности составляет 10,8, 21,4, 39,7 и 82,0 МПа, соответственно для 400, 500, 600 и 700 Вт. В то же время вдоль направления действия УЗ интенсивность прироста прочности снижается и для образца 5 составляет 2,5, 4,6, 10,6 и 36 МПа.

В микроструктуре авторы отмечают замену дендритного строения равноосными зернами после УЗ обработки.

Анализ, вошедших в обзор и других многочисленных литературных источников позволил сформулировать основные эффекты, производимые УЗ на структуру и свойства металлов. А так же сравнить их с эффектами, производимыми электромагнитной импульсной обработкой расплавов [7–8] (таблица 3).

Видно, что, несмотря на существенное отличие в характеристиках используемого оборудования изменения структуры и свойств металла после обоих видов обработок схожи.

Таким образом, логичным является предположение о том, что механизм воздействия на металл электромагнитными импульсами аналогичен действию ультразвука.

Таблица 3

УЗ обработка расплавов	Электромагнитная импульсная обработка расплавов
<i>Характеристики генераторов</i>	
Частота 20 кГц Мощность до 1,5–4 кВт Длительность обработки 10 сек – 5 мин	Частота 1000 Гц Мощность до 1МВт Длительность обработки 10–15 мин
<i>Изменения в макро и микроструктуре</i>	
Измельчение макроструктуры. Не влияет на фазовый состав. Микроструктурные составляющие как измельчаются, так и огрубляются (в зависимости от температурного интервала обработки) Повышение растворимости элементов в $\alpha$ -фазе Изменение формы и размеров кристаллов первичных фаз. Уменьшение шероховатости поверхности.	Макрозерно практически не изменяется или укрупняется. Изменение кристаллического строения слитка. Не влияет на фазовый состав. Микроструктурные составляющие как измельчаются, так и огрубляются (в зависимости от длительности и температуры воздействия обработки) Повышение растворимости элементов в $\alpha$ -фазе Уменьшение шероховатости поверхности.
<i>Изменения в механических характеристиках литого металла</i>	
Предварительная УЗ обработка повышает характеристики прочности и пластичности. Эффективность воздействия зависит от температуры обработки.	Предварительная обработка расплава повышает характеристики прочности и пластичности.
<i>Преимущества / недостатки</i>	
Результат обработки сильно зависит от выбора мощности, при удалении от излучателя эффективность воздействия снижается- обработка металла небольшого объема. Сильное охлаждение расплава (10 сек – 30 °С). Сложность промышленного оборудования.	Простота использования генератора. Стабильные результаты для малых и больших объемов металла.

Т.е. при электромагнитной импульсном воздействии в расплаве возникает ударная ультразвуковая волна, порождающая такие процессы как кавитация и акустические течения. Следовательно, для описания происходящих процессов можно применить математическую теорию УЗ воздействия. Чему и будет посвящена дальнейшая работа.

#### Библиографический список

1. Jian, X., Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy / X. Jian, H. Xu, T.T. Meek, Q. Han // *Materials Letters* 59 (2005), pp. 190–193.
2. Xin-tao, Li. Study of ultrasonic melt treatment on the quality of horizontal continuously cast Al–1%Si alloy / Li Xin-tao, Li Ting-ju, Li Xi-meng, Jin Jun-ze // *Ultrasonics Sonochemistry*. 13 (2006). – Pp. 121–125.
3. Puga, H. Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3 alloy / H. Puga, S. Costa, J. Barbosa, S. Ribeiro, M. Prokic. // *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011), pp. 1729–1735.
4. Chong, Lin. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast hypereutectic Al–Si alloy with 2%Fe assisted with ultrasonic vibration process / Chong Lin, Shusen Wu, Shulin Lü, Ping An, Li Wan // *Journal of Alloys and Compounds* 568 (2013), pp. 42–48.
5. Xinbao, Liu. Microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy produced with ultrasonic vibration / Xinbao Liu, Yoshiaki Osawa, Susumu Takamori, Toshiji Mukai // *Materials Science and Engineering A* 487 (2008), pp. 120–123.
6. Qingmei, Liu. Influence of ultrasonic vibration on mechanical properties and microstructure of 1Cr18Ni9Ti stainless steel / Liu Qingmei, Zhang Yong, Song Yaoling, Qi Feipeng, Zhai Qijie // *Materials and Design* 28 (2007), pp. 1949–1952.
7. Шабурова, Н.А. Обработка металлов и сплавов наносекундными электромагнитными импульсами / Н.А. Шабурова; под ред. В.В. Крымского. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2011. – 94 с.
8. Балакирев, В.Ф. Наноимпульсные технологии / В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, Н.А. Шабурова. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2012. – 124 с.

[К содержанию](#)