

УДК 669.017 + 537.86 + 669-154:534-8

## **ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ: ОТ ПРАКТИКИ К ТЕОРИИ**

*Н.А. Шабурова*

Приводится теоретическое обоснование возникновения в расплавах металлов ультразвуковых колебаний при воздействии электромагнитными импульсами большой мощности.

Ключевые слова: электромагнитные импульсы, ультразвуковые колебания, расплавы, алюминиевые сплавы, магниевые сплавы, литой металл, структура, механические свойства.

В проводимых экспериментах по обработке расплавов мощными электромагнитными импульсами использовался генератор типа GNP со следующими характеристиками импульса: амплитуда 10 кВ, длительность 1 нс, передний фронт 0,1 нс, частота повторения 1 кГц. Потребляемая мощность генератора от сети менее 100 Вт.

Известно, что распространение электромагнитных волн в расплавах металлов возможно только на глубину, не пресыщающую толщину скин-слоя. Следовательно, если сами импульсы на расстоянии скин-слоя затухают, то их энергия накапливается и может преобразовываться в другие виды энергии.

Проведенные расчеты [1] показывают, что тепловой эффект от импульсного воздействия невелик. В тоже время в структуре и свойствах литого металла наблюдаются заметные изменения. Сравнительный анализ характеристик металла после различных видов внешнего воздействия на расплав [2] показал сходство эффектов, производимых электромагнитной импульсной обработкой и ультразвуковой обработкой.

Таким образом, наиболее вероятным механизмом преобразования импульсной энергии является возникновение в расплаве ультразвуковых колебаний. Покажем это расчетом.

В подавляющем большинстве работ по УЗ обработке алюминиевых, магниевых сплавов и сталей показывается, что форма выделений первичной  $\alpha$ -фазы меняется с дендритной на розеточную и округлую. В работе [3] для 0,35 кг сплава Al-5 масс.% Si показано, что ультразвуковая обработка металла мощностью 4 кВт, на стадии кристаллизации способствует измельчению макрозерна металла с 1600 мкм до 100 мкм. Морфология зерен  $\alpha$ -фазы меняется на более округлую. При этом частицы эвтектического кремния приобретают такую же грубую форму, как и в случае электромагнитной обработки. Эти авторы показали огрубление эвтектики и в сплавах Al-11 масс.% Si и Al-17 масс.% Si. Аналогично в работе [4] УЗ воздействие при температурах близким к кристаллизационным мощностью 1,5 кВт и частотой 20 кГц, приводит к огрублению эвтектического кремния.

В то же время, результаты работы по УЗ обработке мощностью 1,2КВт 0,4 кг сплава AlSi9Cu [5] свидетельствуют об уменьшении межпластинчатого расстояния и измельчении частиц эвтектического кремния.

Противоречивые данные по изменению морфологии частиц эвтектического кремния этих и других авторов можно объяснить выбором температуры воздействия. При воздействии на ранних стадиях кристаллизации в результате кавитационных явлений происходит измельчение частиц кремния. При более низких температурах загустевший расплав препятствует распространению кавитационных потоков, мешая фрагментации фаз. Вводимая же энергия способствует подогреву и изменяет условия роста эвтектики, способствуя ее огрублению.

Упоминание о повышении содержания основных легирующих элементов в первичной  $\alpha$ -фазе при УЗ воздействии есть в работе [6].

Повышение прочностных свойств и пластичности материала при УЗ воздействии мощностью 600 Вт и частотой 19,5 кГц, несмотря на сохранение грубой игольчатой эвтектики отмечено в работе [7]. В упомянутых выше работах [3–6] одновременное повышение предела прочности и относительного удлинения наблюдается на фоне измельчения зерна и эвтектики.

Поскольку наблюдаемые при импульсной обработке расплавов эффекты схожи с теми, что наблюдаются при ультразвуковой обработке, можно, по всей видимости, говорить, что расплав также испытывает давление сил акустического поля, создаваемого генератором электромагнитных импульсов.

Имеются работы [8–10], в которых показано, что в расплавах металлов при воздействии электромагнитных колебаний возникают ультразвуковые колебания. Расчет, проведенный для индукционной плавки алюминия [11], показывает, что при плавке алюминия в тигле диаметром около 300 мм с постоянным полем  $5 \cdot 10^4$  А/м колебательное давление на расплав составляет 2 атм. Предполагается, что такого давления достаточно для получения полезных металлургических эффектов.

В связи с особенностью конструкции используемой установки для обработки расплавов электромагнитными импульсами – фактически возбуждение механических колебаний происходит контактным способом. Из-за особенности расположения излучателя ток протекает от излучателя по поверхности расплава и, возможно, эффективность возбуждаемых колебаний намного больше, чем в приведенных выше работах.

Для теоретического обоснования приведенной гипотезы проведем сравнительный расчет интенсивности колебаний. В некоторых работах по воздействию УЗ на расплавы указаны параметры, которые позволяют рассчитать возникающее механическое давление.

Звуковое давление и смещение частиц в металлах, как для плоских, так и для сферических волн связаны между собой соотношением [8]:

$$p = \rho c \omega \xi = z \omega \xi, \quad (1)$$

где произведение плотности металла и скорости звука  $\rho c = z$  – акустический импеданс (сопротивление);  $\omega$  – круговая частота ( $\omega = 2\pi f$ );  $\xi$  – смещение частиц от положения равновесия.

В работе [12] для излучателя в алюминиевом сплаве приведено:  $f = 21$  кГц,  $\xi = 25$  мкм, мощность генератора 1 кВт, интенсивность колебаний  $100$  Вт/см<sup>2</sup>, масса обрабатываемого металла не указана. Скорость продольной волны в твердом алюминии  $6260$  м/с [13]. Скорость колебаний в расплаве может составить 70 % от скорости в твердом металле [13]. Плотность расплавленного алюминия  $2390$  кг/м<sup>3</sup> [14]. Расчет по формуле (1) дает величину давления на излучателе  $29$  МПа или  $290$  атм.

В работе [15] для излучателя в алюминиевом сплаве приведено:  $f = 20$  кГц,  $\xi = 4$  мкм, мощность генератора  $150$  Вт, масса обрабатываемого металла  $200$  гр. Расчет звукового давления дает величину  $4,6$  МПа ( $46$  атм).

В работе [7] для излучателя в алюминиевом сплаве приведено  $f = 19,5$  кГц,  $\xi = 30$  мкм, мощность генератора  $600$  Вт, интенсивность колебаний  $109$  Вт/см<sup>2</sup>, масса обрабатываемого металла  $210$  гр. Расчет звукового давления дает величину  $34$  МПа ( $340$  атм).

В работе [11] отмечается, что для создания положительных металлургических эффектов электродинамическое давление в расплаве должно составлять  $1-4$  атм или  $1-4 \cdot 10^5$  Па.

Для определения колебательного давления от воздействия электромагнитных импульсов можно воспользоваться формулой для расчета волнового давления на поверхности:

$$p = E(1+R)/c, \quad (2)$$

где  $p$  – волновое давление, Н/м<sup>2</sup>;  $E$  – мощность падающей волны, отнесенная к единице площади и единице времени, Вт/см<sup>2</sup>;  $R$  – коэффициент отражения ( $R = 0$  при полном поглощении,  $R = 1$  при полном отражении);  $c$  – скорость распространения волны, м/с. Скорость распространения волны в расплавленных металлах составляет порядка  $4 \cdot 10^3$  м/с [13].

При импульсном возбуждении колебаний падающую импульсную мощность можно приблизительно рассчитать по формуле:

$$P = \frac{U^2}{r}, \quad (3)$$

где  $r$  – волновое сопротивление кабеля, равное  $50$  Ом;  $U$  – напряжение генератора, равное  $10$  кВ. Рассчитав по формуле (3) значение падающей импульсной мощности, получим  $P = 2 \cdot 10^6$  Вт. Площадь свободной поверхности металла в используемом тигле диаметром  $80$  мм равна  $5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Следовательно, импульсная мощность, приходящаяся на единицу площади равна  $4 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Подставив полученное значение импульсной мощности в уравнение (1), получаем  $P_{\text{имп}}=1,3 \cdot 10^5$  Па (или 1,3 атм.). Это значение близко по величине к приведенным в работах [11] и [15] значениям используемого давления.

Таким образом, при импульсной электромагнитной обработке расплавов в них возникают процессы и явления, аналогичные тем, что происходят при ультразвуковой обработке: кавитация и акустические течения. Что и приводит к изменению структуры и механических свойств литого металла.

#### Библиографический список

1. Шабурова, Н.А. Обработка расплавов металлов и сплавов наносекундными электромагнитными импульсами: монография / Н.А. Шабурова; под ред В.В. Крымского. – Челябинск: изд-во ЧелЦНТИ, 2011. –94 с.
2. Shaburova, N.A. Changes in metal properties after thermal and electric impulse processing / N.A. Shaburova // Material science and engineering V. 81, 2015. – 012016.
3. L. Zhang, D.G. Eskin, A. Miroux and L. Katgerman. Light Metals 2012 Edited by: Carlos E. Suarez TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2012. Pp. 999–1004.
4. X. Jian, H. Xu, T.T. Meek, Q. Han. Materials Letters 59 (2005). Pp. 190–193.
5. H. Puga, S. Costa, J. Barbosa, S. Ribeiro, M. Prokic. Journal of Materials Processing Technology 211 (2011). Pp. 1729–1735.
6. Li Xin-tao, Li Ting-ju, Li Xi-meng, Jin Jun-ze. Ultrasonics Sonochemistry. 13 (2006). Pp. 121–125.
7. W. Khalifa, Y. Tsunekawa, M. Okumiya. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010). Pp. 2178–2187.
8. Крауткремер, Й. Ультразвуковой контроль материалов: справ. изд. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
9. Pohl R.W. Einführung in die Physik.: 3Bde. Berlin: Springer, 1962. 64 p.
10. Grubin H.L. IEEE. Trans SU. – 1970. – № 17. – Pp. 2207–432.
11. Аркин, М.Я. [и др.] // Акустический журнал. – 1968. – Т. XIV. – С. 344–350.
12. Yanfeng Han, Ke Li, Jun Wang, Da Shu, Baode Sun. Materials Science and Engineering A 405 (2005) 306–312.
13. Таблицы физических величин: справочник / под. ред. И.К. Кикоена. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
14. Эмели, Дж. Элементы / Дж. Эмели. – М.: Мир, 1993. – 256 с.
15. S.R. Yu, H.K. Feng, Y.L. Li, L.Y. Gong. Journal of Alloys and Compounds 484 (2009) 360–364.

[К содержанию](#)