

УДК 669.35

© 2011 г. *И. Э. Игнатьев<sup>1</sup>, А. В. Долматов, Е. В. Игнатьева,  
С. А. Истомина, Э. А. Пастухов*

## ПСЕВДОКАВИТАЦИЯ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВОВ

Проведено теоретическое сравнение низкочастотной и ультразвуковой обработки расплава. Рассмотрено явление, возникающее при низкочастотной обработке расплава, названное псевдокавитацией. Выявлены условия возникновения этого явления и представлен эксперимент по замешиванию “легкого” алюминиевого порошка в “тяжелый” сплав Вуда в режиме псевдокавитации.

*Ключевые слова:* низкочастотная обработка, ультразвуковая обработка, кавитация, псевдокавитация, замешивание в расплав.

В рабочем режиме низкочастотной обработки металлургических композиционных расплавов реализуется турбулентное перемешивание всей массы расплава. Режиму, в котором с минимальной интенсивностью воздействия осуществляется обработка всего расплава, соответствует конкретное число турбулентного перемешивания, зависящее от состава композиции и определяемое частотой, амплитудой колебаний, а также геометрическими размерами тигля, поршня и зазора между стенками тигля и поршня [1]. При обработке с превышением значения числа турбулентного перемешивания зачастую возникает подсос газа с поверхности расплава в его объем. Такое явление мы называем псевдокавитацией, с одной стороны, ввиду внешней схожести с кавитацией, с другой — вследствие того, что во время истинной кавитации газовые пузырьки происходят из самой жидкой среды, а не из внешней газовой.

Экспериментально [1, 2] установлено, что при псевдокавитации во всех случаях обработки расплава вибрирующим поршнем в неподвижном тигле происходит его нагазация с образованием непосредственно под поршнем газовой глобулы и снижение плотности расплава, что приводит к уменьшению интенсивности перемешивания. В случае же колебаний самого тигля в отсутствие поршня газ собирается у дна тигля в виде полусферы и перемешивание прекращается лишь в окрестности полусферы. При этом движение порошковых частиц в рабочем объеме расплава, наоборот, интенсифицируется, что связано как с падением плотности, так и инерционностью всей колеблющейся массы расплава в отсутствие отражения от поршня. Поэтому появилась идея использовать псевдокавитацию для замешивания в расплав композиционных порошков с малой плотностью (в защитной среде во избежание окисления). Для практического осуществления этой идеи необходимо проанализировать причины возникновения псевдокавитации при низкочастотной и кавитации при ультразвуковой обработке расплава.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### Кавитация и псевдокавитация

При ультразвуковом методе результатом воздействия на расплав является смещение частиц расплава вдоль ультразвуковой волны с образованием зон сжатия и растяжения, что вызывает разрывы сплошности по объему расплава и, как следствие, кавитацию. Рассмотрим вибровоздействие на частицы расплава посредством колебаний поршня.

<sup>1</sup>igx2@mail.ru.

Частицы расплава совершают продольные колебания вдоль хода поршня (вдоль оси  $Oz$ ) с частотой  $\mu$ , круговой частотой  $\omega = 2\pi\mu$  и амплитудой  $A$ , что описывается в первом приближении решением Ирншоу для скорости частицы [3]  $v = A\omega\sin(\omega t - kz)$ , где  $k$  – волновое число. Интенсивность звукового давления продольных волн [4] на частицу расплава, которая пропорциональна квадрату модуля скорости колебаний  $J \sim (A\omega)^2$ , по сути, является задаваемой мощностью. Для возможности дальнейшей оценки и сравнения примем равенство интенсивностей низких (индекс “н”) и ультразвуковых (индекс “у”) частот равным

$$J \sim (A_n\omega_n)^2 = (A_y\omega_y)^2 \quad (1)$$

и в качестве примера возьмем следующие значения амплитуд и частот:  $A_n = 1$  мм,  $\omega_n = 50$  Гц,  $A_y = 1$  мкм,  $\omega_y = 50000$  Гц.

Точки расплава, где наиболее вероятен кавитационный разрыв сплошности, распределены вдоль направления распространения волны по одной на каждом участке действия растягивающих напряжений, т.е. через промежуток, равный длине волны  $\lambda = V/\mu$ , ( $V$  – скорость волны в среде), или между пучностями через один интервал, если, учитывая отражение, считать волну стоячей. Усилие, направленное на кавитационный разрыв, по закону Ньютона, пропорционально ускорению частиц расплава, которое пропорционально ускорению поршня  $f \sim A\omega^2$ . Следовательно, при равной интенсивности разрывающее усилие ультразвука больше, чем таковое для низких частот, в  $\omega_y/\omega_n = 1000$  раз, и точки разрыва распределяются, например, в воде при частоте  $\omega_y = 50000$  Гц через каждые  $\lambda = 0.03$  м. В то же время при низких частотах они располагаются через каждые  $(\omega_y/\omega_n) \cdot 0.03$  м = 30 м. Поэтому при ультразвуковых частотах кавитация распределена равномерно по всему объему жидкости, а слабым местом при низких частотах оказывается граница жидкости и поршня или, в случае подвижного тигля, граница жидкости и дна тигля.

Для возникновения кавитации необходимо также условие существования временных промежутков, когда зоны разрыва, т.е. кавитационные полости, не заполнены жидкостью (расплавом). Если из жидкости внезапно вынуть некоторый объем в виде шара, то образованная пустота будет заполнена за некоторое время  $\tilde{t}$ . В работе [5] дается решение такой задачи в виде

$$\tilde{t} = r \sqrt{\frac{3\pi\rho_{\text{ж}}}{2\Delta p}} \cdot \frac{\Gamma(8.33)}{\Gamma(0.33)} = 0.421r \sqrt{\frac{3\pi\rho_{\text{ж}}}{2\Delta p}}, \quad (2)$$

где  $r$  – радиус выделенного объема;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости (расплава);  $\Delta p$  – разность давлений;  $\Gamma$  – гамма-функция. В нашем, несколько отличающемся граничными условиями, случае кавитация возможна тогда, когда поршень за полпериода  $\bar{t} = (2\mu)^{-1}$  из нижнего положения поднимается в верхнее на высоту двух амплитуд  $2A$ . В полость под поршнем, образующуюся при его движении, жидкость может поступать только со стороны, не ограниченной поршнем. Если направить вертикальную ось  $Oz$  вверх, то уравнение движения вслед за поршнем в направлении полости смещенной массы жидкости с высотой столба, равной  $2A$ , запишется как

$$\ddot{z} = \frac{\Delta p}{\rho_{\text{ж}} \cdot 2A} - g. \quad (3)$$

С учетом начальных условий  $\ddot{z}(t=0) = 0$ ,  $\dot{z}(t=0) = 0$  после интегрирования получим

$$z = \left( \frac{\Delta p}{2A\rho_{ж}} - g \right) \cdot \frac{(\bar{t})^2}{2}. \quad (4)$$

Если время полупериода колебаний поршня  $\bar{t}$ , меньше времени заполнения полости, то под поршнем должна возникнуть кавитация. Поэтому при  $z = 2A$  условие возникновения кавитационной ситуации можно получить из формулы (4) в виде неравенства

$$A > \left( \frac{\Delta p}{\rho_{ж} \cdot 2A} - g \right) \cdot \frac{1}{16\mu^2} \quad (5)$$

или

$$\mu > \frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{A} \left( \frac{\Delta p}{2A\rho_{ж}} - g \right)} \approx \frac{0.177}{A} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_{ж}}}. \quad (6)$$

Для сравнения, неравенство, аналогично полученное из уравнения (2), имеет вид

$$\mu > \frac{0.547}{r} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_{ж}}}, \quad (7)$$

что при  $r = A$  дает критическое значение частоты примерно в три раза большее, чем (6), поскольку, учитывая разницу в путях заполнения полости, соответствует в три раза меньшему времени. Т.е. вывод формулы (6) справедлив. Таким образом, выполнение неравенства (6) при виброобработке расплавов приводит к кавитационной ситуации. С учетом в (6), например, плотности воды при разности давлений в 1 атм =  $10^5$  Па, получим, что для создания кавитации таким способом при амплитуде  $A = 1$  мм необходима частота  $\mu > 1770$  Гц. Однако из экспериментов [1, 2] по низкочастотной обработке известно, что часть разности давлений теряется в зазоре между боковыми стенками поршня и рабочей емкости. Причем эта потеря тем больше, чем меньше зазор и длиннее образующая поршня, и можно получить кавитационную ситуацию при малой частоте за счет соответствующего подбора указанных геометрических параметров.

Чтобы выяснить – почему при обработке ультразвуком наблюдается кавитация, а при обработке низкими частотами – псевдокавитация, рассмотрим уравнение движения газового пузырька радиуса  $r$  и плотностью  $\rho$  в жидкой среде при обработке среды колебаниями. Уравнение запишется как

$$\dot{u} = -\frac{3\eta u}{r^2 \rho} + g \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho} - 1 \right) - K \sin \omega t, \quad (8)$$

где  $\dot{u}$  – ускорение пузырька;  $u$  – его скорость;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $K$  – коэффициент с размерностью ускорения, характеризующий модуль давления под поршнем, гармонически изменяющегося вследствие колебаний поршня. Первое слагаемое правой части уравнения выражает сопротивление среды, второе – архимедову силу. Решение уравнения (8) с учетом начального условия  $u(t=0) = 0$  имеет вид

$$u = \frac{g}{B} \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho} - 1 \right) - \frac{K}{B^2 + \omega^2} (B \sin \omega t - \omega \cos \omega t) - \left( \frac{K\omega}{B^2 + \omega^2} + \frac{g}{B} \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho} - 1 \right) \right) \exp(-Bt), \quad (9)$$

где  $B = 3\eta / (r^2 \rho)$ .

В уравнении (9) первое слагаемое правой части положительно и является архимедовой, направленной вверх, составляющей скорости, второе – описывает осцилляцию пузырька около его текущего положения в объеме жидкости. Третье – будучи отрицательным, отвечает за погружение пузырька, т.е. его движение вниз. Третье слагаемое по абсолютной величине может иметь широкий диапазон значений и убывает как с уменьшением радиуса

пузырька  $r$ , так и с увеличением частоты колебаний  $\omega$ , а при ультразвуковых частотах становится пренебрежимо малым. Поэтому при низкочастотной обработке скорость  $u$  отрицательна и возникающие кавитационные каверны заполняются газом с поверхности жидкости (расплава), а при ультразвуковой обработке положительна, и происходит полноценная кавитация. Таким образом, явление именно псевдокавитации при низкочастотной обработке вполне закономерно.

При ультразвуковых частотах волновое влияние полностью перекрывает влияние потока из зазора между стенками поршня и рабочего объема. Для полноценного турбулентного перемешивания необходимо, чтобы расход струи из зазора в течение полупериода, когда поршень идет вверх, был достаточным, чтобы придать каждой частице расплава в рабочем объеме значимые перемещение и скорость [2]. Это необходимо для запаса инерции движения, так как процесс перемешивания глушится при движении поршня вниз. С увеличением частоты уменьшается период колебаний и, следовательно, расход. Расход из зазора за полупериод колебаний при ультразвуковой обработке в  $\omega_y/\omega_n = 1000$  раз меньше, чем при низкочастотной, т.е. мал для создания турбулентности в рабочем объеме. Поэтому мощность ультразвука идет на сжатие — растяжение расплава и кавитацию, в то время как мощность низких частот тратится на турбулентное перемешивание, и основная доля динамического воздействия на частицы расплава проистекает от турбулентности потоков, а не от звукового давления. В этом состоит главное и принципиальное различие механизмов воздействия на расплав низкочастотным и ультразвуковым методами.

Уяснение причин возникновения псевдокавитации позволило перейти к экспериментам по ее использованию при получении композиционных сплавов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

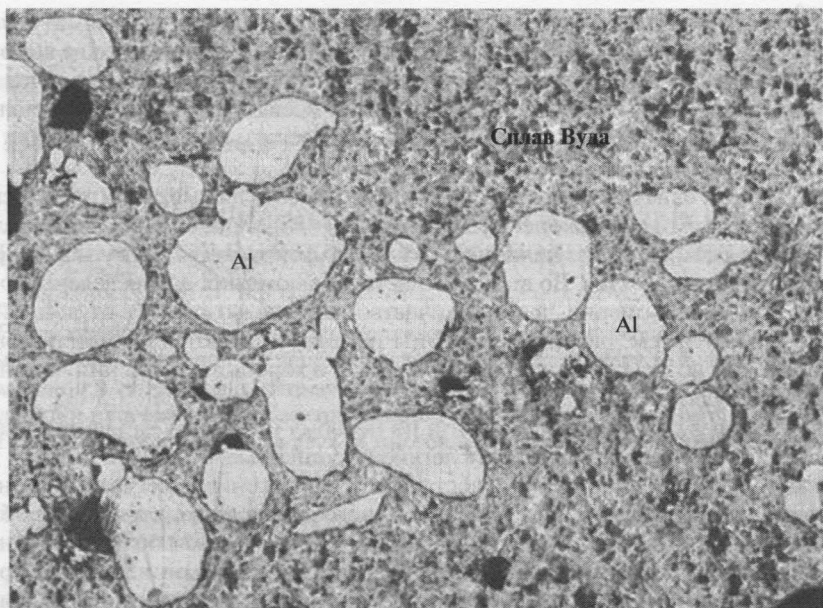
### Замешивание в расплав порошков с малой плотностью

В Институте металлургии УрО РАН имеется несколько установок, на которых можно осуществлять низкочастотное воздействие на расплавы как при колеблющемся поршне и неподвижном тигле, так и при колеблющемся тигле и неподвижном поршне. При проведении экспериментов появляется проблема с замешиванием плохо смачиваемых или не смачиваемых порошков в расплав, имеющих плотность близкую к плотности порошкового материала. Для замешивания таких порошков в расплав последний приходится сильно перегревать над температурой ликвидуса до появления смачивания твердых частиц расплавом. Использование низкочастотного метода с явлением псевдокавитации может решить эту проблему, поскольку такой процесс обработки сопровождается снижением плотности расплава. Для подтверждения этого предположения провели серию экспериментов по замешиванию “легкого” алюминиевого (плотность  $2700 \text{ кг/м}^3$ ) порошка дисперсностью 20–50 мкм в расплаве Вуда (плотность  $9720 \text{ кг/м}^3$ ; состав мас. %: 50 Bi, 25 Pb, 12.5 Sn, 12.5 Cd) при различных вариантах вибровоздействия и температуре 100–140°C. Как показали наши исследования, до 150°C сплав Вуда не смачивает алюминий.

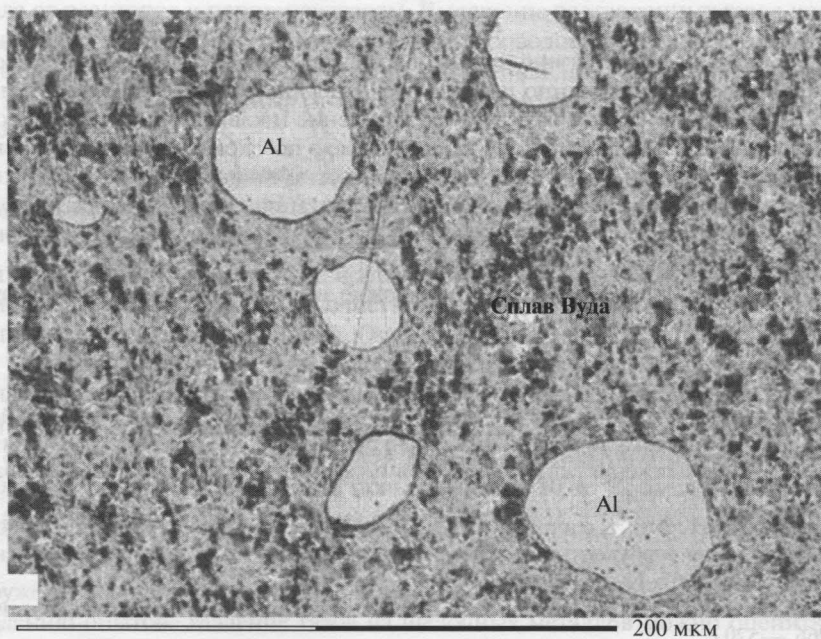
**Вариант 1.** В разогретый до 140°C тигель засыпали половину от 0.013 кг приготовленного порошка алюминия, затем заливали отдельно разогретый до 140°C расплав Вуда в количестве 0.480 кг, образуя столб расплава высотой 80 мм, и засыпали вторую половину порошковой добавки. В расплав на глубину 40 мм погружали поршень, соединенный с генератором колебаний ЭГМК-5, и в течение 1 мин производили виброобработку с амплитудой 1.5 мм и частотой 60 Гц. Такая интенсивность при данной геометрии рабочего объема и зазора была достаточна для создания режима турбулентного перемешивания, но недостаточна для возникновения псевдокавитации. После этого поршень извлекали, а обработанный расплав сливали для кристаллизации в изложницу, сужающуюся к низу.

**Вариант 2.** Прodelьвали те же операции, что и в варианте 1, но по извлечению поршня тигель с расплавом крепили за крышку к вибратору, отключали подогрев, и тигель продолжал колебания до кристаллизации сплава. В этом случае на расплав и на замешиваемый

(а)



(б)



Распределение алюминиевого порошка дисперсностью 20–250 мкм, замешанного в сплав Вуда в режиме псевдокавитации (вариант 2) в верхней (а) и нижней (б) частях слитка.

мые частицы воздействует массовая сила инерции, пропорциональная ускорению  $g + A(2\pi\mu)^2 \sin(2\pi\mu)t$ , благодаря чему при выбранных параметрах колебаний осуществляется режим псевдокавитации. В результате после кристаллизации расплава высота столба сплава составляла 220 мм, т.е. объем сплава увеличился почти в три раза за счет пористости, возникшей из-за одновременного протекания псевдокавитации и кристаллизации. Затем тигель в перевернутом состоянии быстро разогревали и расплав выливали в изложницу, где он кристаллизовался уже с утратой пористости.

Оба полученных слитка разрезали продольно по высоте для металлографического изучения на оптическом микроскопе ЦКП “Урал-М” “Olympus GX-51” при увеличениях  $\times 50$  и  $\times 100$ . В первом варианте наличие частиц алюминия отмечено только в верхней части слитка на глубину до 4 мм. Во втором — частицы алюминия распределены по всей высоте слитка, но неравномерно, и их количество заметно возрастает от донной части к верхней поверхности (см. рисунок). Частицы не выкрашиваются из матричного сплава при механическом воздействии на них, что говорит о хорошем сцеплении частиц алюминия со сплавом Вуда.

Из сравнения результатов эксперимента по первому и второму вариантам следует, что псевдокавитация позволяет замешивать легкие порошковые частицы в расплав в результате понижения его усредненной плотности. Такое понижение облегчает движение в расплаве твердых частиц даже при условии, что плотность расплава (отношение объема при кристаллизации к исходному объему меньше трех) оказывается больше плотности порошковой частицы (отношение плотностей сплава Вуда и алюминия больше трех). Очевидно, увеличивая интенсивность колебаний, можно добиться более равномерного распределения в сплаве легких порошковых частиц.

#### ВЫВОДЫ

Таким образом, по воздействию на композиционные расплавы ультразвуковой и низкочастотный методы существенно различаются. Для ультразвуковой обработки главный инструмент бародинамики — ультразвуковое давление и кавитация. Для низких частот — это турбулентное перемешивание с возникновением псевдокавитации при превышении определенных пределов интенсивности низкочастотной обработки. В условиях кристаллизации расплава при колебаниях тигля псевдокавитация позволяет создать композиционный сплав из “тяжелой” матрицы и “легких” порошковых добавок, который очень сложно получить каким-либо другим способом.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта фундаментальных исследований УрО и СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатъев И.В., Киселев А.В., Долматов А.В., Концевой Ю.В., Пастухов Э.А., Игнатъева Е.В., Попова Э.А., Бодрова Л.Е. Математическое моделирование движения жидкости в цилиндре, возбуждаемое поршнем-вибратором. — Расплавы, 2005, № 6, с. 3–11.
2. Игнатъев И.Э., Концевой Ю.В., Игнатъева Е.В., Пастухов Э.А. Условия обеспечения турбулентного перемешивания расплавов при их вибрационной обработке. — Расплавы, 2007, № 2, с. 19–27.
3. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. — М.: Наука, 1966. — 520 с.
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. — М.: Наука, 1977. — 944 с.
5. Кочин Н.Е. Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, 1 том. — Л., М.: ОГИЗ-ГОСТЕХИЗДАТ, 1948. — 536 с.