

5. Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: Справочник. Киев: Наук. думка, 1982.
6. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966.
7. Чикова О.А., Константинов А.Н., Шишкина Е.В., Чезганов Д.С. // Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов: Тр. 11-го Росс. сем. / Под общ. ред. Б.С. Воронцова. Курган: Изд-во Кург. гос. ун-та, 2012. С. 26.
8. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Пер. с англ. М.: Metallurgia, 1979.
9. Попель П.С., Коржавина (Чикова) О.А., Мокеева Л.В. и др. // Технол. легких сплавов (ВИЛС). 1989. № 4. С. 87.
10. Коржавина (Чикова) О.А., Попель П.С. // Расплавы. 1989. № 5. С. 116.

УДК 669.15-150 : 541.1 : 622.734

ПРИНЦИПИАЛЬНОЕ РАЗЛИЧИЕ МЕТОДОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАСПЛАВЫ

© 2014 г. И.Э. Игнатьев, Э.А. Пастухов, Е.В. Игнатьева

Институт металлургии (ИМЕТ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 15.01.13 г., подписана в печать 5.02.13 г.

Рассматриваются факторы, определяющие различие низкочастотного и ультразвукового методов обработки композиционных расплавов: кавитационные явления, диссипативные потери, способность к турбулентному перемешиванию расплава. Доказывается самостоятельность каждого из методов.

Ключевые слова: низкочастотная обработка расплавов, ультразвуковая обработка расплавов, кавитация, псевдокавитация.

There were considered factors that determine difference of low and ultrasonic frequency treatment methods with regard to composite melts: cavitation events, dissipation losses, capability to turbulent mixing of melt. There was proven independence of every of these methods.

Key words: low frequency treatment of melt, ultrasonic treatment of melt, cavitation, pseudocavitation.

Разработанный в Институте металлургии УрО РАН метод воздействия на расплав низкочастотными колебаниями поршня относится к вибрационным методам обработки расплавов и предназначен для получения композиционных металлургических сплавов. Имея сходные черты с ультразвуковым методом в способе воздействия на расплав и инструментах, осуществляющих это воздействие, он значительно отличается поведением частиц в расплаве.

Для ультразвуковой обработки [1] характерно значительное бародинамическое влияние на частицы расплава, особенно за счет кавитации. При этом перемешивание расплава происходит в малых объемах, локализованных вокруг лопающихся пузырьков газа. В ходе низкочастотной обработки [2–5] частицы расплава испытывают гораздо более слабое звуковое давление, однако при определенных геометрических и амплитудно-частотных параметрах

Игнатьев И.Э. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории физической химии металлургических расплавов ИМЕТ УрО РАН (620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101). Тел.: (343) 232-90-14. E-mail: igx2@mail.ru.

Пастухов Э.А. – докт. хим. наук, чл.-кор. РАН, проф., заведующий этой лабораторией. E-mail: eduard.pastuhov.34@mail.ru.

Игнатьева Е.В. – науч. сотр. той же лаборатории. E-mail: l.ig_a@mail.ru.

осуществляется турбулентное перемешивание всего объема расплава, приводящее к однородности структуры сплава. Причины различия в поведении компонентов расплава при его обработке низкочастотными и ультразвуковыми колебаниями при одинаковом задании возмущения — посредством поршня — нуждаются в теоретическом обосновании. Цель работы — раскрыть указанные причины и доказать самостоятельность каждого из данных методов виброобработки расплава.

СПОСОБНОСТЬ К КАВИТАЦИОННОМУ РАЗРЫВУ ЖИДКОСТИ

Допустим, звуковая обработка расплава производится в неподвижном тигле подвижным поршнем, движущимся с амплитудой A и частотой μ (с циклической частотой $\omega = 2\pi\mu$). При ультразвуковом методе результатом звукового давления на расплав

$$p_3 = \rho_{\text{ж}} c \omega A \sin \omega(t - z/c), \quad (1)$$

где c — скорость звука, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность расплава, z — расстояние от поршня, является смещение частиц расплава вдоль звуковой волны с образованием зон сжатия и растяжения. Это вызывает разрывы сплошности по объему расплава и, как следствие, кавитацию. Интенсивность звукового давления продольных волн на частицу расплава, пропорциональная квадрату модуля скорости колебаний, по сути является задаваемой мощностью. Для возможности дальнейшей оценки и сравнения примем равенство интенсивностей низких (индекс «н») и ультразвуковых (индекс «у») частот:

$$J \sim (A_{\text{н}} \omega_{\text{н}})^2 = (A_{\text{у}} \omega_{\text{у}})^2 \quad (2)$$

и в качестве примера возьмем следующие значения: $A_{\text{н}} = 1$ мм, $\omega_{\text{н}} = 50$ Гц, $A_{\text{у}} = 1$ мкм, $\omega_{\text{у}} = 50000$ 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 $\lambda = v/\mu$ (где v — скорость волны в среде), или между пучностями. Усилие, направленное на кавитационный разрыв или деформацию присутствующего в расплаве пузырька газа, по закону Ньютона пропорционально не звуковому давлению (1), а ускорению частиц расплава, которое, в свою очередь, пропорционально ускорению поршня: $f \sim A\omega^2$. Это справедливо, поскольку деформационные напря-

жения в выделенном элементе расплава размером d вдоль направления волны определяются разностью давлений в выделенном объеме относительно плоскости разрыва, т.е. $\sigma_p \sim d \cdot \text{grad}(p_3) \sim d \rho A \omega^2$. Поэтому при равных интенсивностях разрывающее усилие ультразвука больше, чем низких частот, в $\omega_{\text{у}}/\omega_{\text{н}} = 1000$ раз, и точки разрыва распределяются, например, в воде при частоте $\omega_{\text{у}} = 50000$ Гц через каждые $\lambda = 0,03$ м. В то же время при низких частотах они располагаются через каждые $(\omega_{\text{у}}/\omega_{\text{н}}) \cdot 0,03$ м = 30 м, что гораздо больше размеров тигля. Поэтому при ультразвуковых частотах в отсутствие затухания амплитуды звуковой волны кавитация распределяется равномерно по всему объему жидкости, а слабым местом при малых частотах оказывается граница жидкости и поршня. Таким образом, силовое воздействие ультразвука на частицы жидкости в $\omega_{\text{у}}/\omega_{\text{н}} = 1000$ раз больше низкочастотного.

ДИССИПАТИВНЫЕ ПОТЕРИ

При распространении звуковой волны в среде всегда происходят необратимые потери на внутреннее трение, теплопроводность и излучение. Наличие в жидкости газовых пузырьков или твердых частиц резко увеличивает диссипацию. Изменение амплитуды плоской звуковой волны определяют [1] как $A = A_0 \exp(-at)$, где $a = a_1 + a_2$, $a_1 = 2\eta\omega^2/(3\rho c^3)$ — коэффициент поглощения звука, обусловленный вязкостью (η — динамическая вязкость), a_2 — коэффициент, отвечающий теплопроводности и составляющий до 10 % от a_1 (значения a_2 для ультразвука выше, чем для низких частот). Из сравнения величин a_1 для ультразвуковых и низких частот следует, что расстояние от источника колебаний, на котором амплитуда уменьшается в 2 раза, при ультразвуке в $(\omega_{\text{у}}/\omega_{\text{н}})^2 \approx 10^6$ раз короче, чем при низкочастотном воздействии. И, значит, как минимум во столько же раз меньше эффективно обрабатываемый объем жидкости.

КАВИТАЦИЯ И ПСЕВДОКАВИТАЦИЯ

Для возникновения кавитации необходимо выполнение условия существования промежутков времени, когда зоны разрыва, т.е. кавитационные полости, не заполнены расплавом. Если из расплава внезапно вынуть некоторый объем в виде шара, то образованная пустота будет заполнена за некоторое время t . В работе [6] дается решение такой задачи в виде

$$\tilde{t} = r \sqrt{\frac{3\rho_{ж}}{2\Delta p}} \frac{\Gamma(8,33)}{\Gamma(0,33)} = 1,12r \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{\Delta p}}, \quad (3)$$

где r — радиус выделенного объема, $\rho_{ж}$ — плотность жидкости (расплава), Δp — разность давлений, Γ — гамма-функция. В нашем, несколько отличающемся граничными условиями, случае кавитация возможна тогда, когда поршень за полпериода $\tilde{t} = (2\mu)^{-1}$, где $\mu = \omega/(2\pi)$ — частота колебаний поршня, из нижнего положения поднимается в верхнее на высоту двух амплитуд $2A$. В полость под поршнем, образуемую при его движении, жидкость может поступать только со стороны, не ограниченной поршнем. Для этого случая в работе [2] предложена формула

$$\tilde{t} = 0,917r \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{\Delta p}}. \quad (4)$$

Однако из экспериментов [3, 4] по низкочастотной обработке известно, что часть разности давлений теряется в зазоре между боковыми стенками поршня и рабочей емкости. Причем эта потеря тем больше, чем уже зазор и длиннее образующая (высота) поршня, и можно получить кавитационную ситуацию при малой частоте за счет соответствующего подбора указанных геометрических параметров.

В работе [5] показано, как из-за излишней длины образующей поршня могут произойти разрыв скорости потока и скачкообразное падение давления в зазоре. Как следствие, возникает недостаток жидкости для заполнения образующейся вакуумной полости под поршнем, который не успевают восполнить газы из самой жидкости (запаздывание истинной кавитации вследствие большого и сконцентрированного в одном месте размера полости). Полость заполняет газ с поверхности жидкости. То есть перепад давления в узком и длинном зазоре приводит к подосу газовых пузырьков с поверхности расплава через толщу расплава и зазор под поршень. Такое поступление газа извне в объем жидкости мы называем псевдокавитацией.

Однако вышесказанное не объясняет, почему при обработке ультразвуком наблюдается кавитация, а при воздействии низких частот — псевдокавитация. Рассмотрим уравнение движения газового пузырька радиусом d и плотностью ρ в жидкой среде при обработке среды колебаниями со звуковым давлением $p_3 = \rho_{ж}cA\omega \sin \omega t$ в условиях частичного запирания потока в зазоре между поршнем и тиглем и, следовательно, с фактором влияния нехватки давления под

поршнем, равной $p_0 \frac{1+\hat{a} \sin \omega t}{1+\hat{a}}$. Уравнение запишется как

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -\frac{12\eta u}{d^2\rho} + g\left(\frac{\rho_{ж}}{\rho} - 1\right) + 3\omega A \frac{\rho_{ж}c}{\rho d} \sin \omega t - \\ & - \frac{3}{\rho d} p_0 \frac{1+\hat{a} \sin \omega t}{1+\hat{a}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где c — скорость звука; p_0 — модуль перепада давления между сечениями над и под поршнем; \hat{a} — коэффициент, больший или меньший единицы, в зависимости от значений турбулентной вязкости и толщины пограничного слоя в зазоре, а следовательно, от величины потерь давления в зазоре; u, \dot{u} — соответственно скорость и ускорение пузырька. Первое слагаемое правой части (5) выражает сопротивление среды, второе — архимедову силу. Решение (5) относительно скорости с учетом начального условия $u(t=0) = 0$ имеет вид

$$\begin{aligned} u = & \frac{g}{B} \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho} - 1\right) [1 - \exp(-Bt)] - \\ & - \frac{3p_0}{B\rho d} \frac{1}{1+\hat{a}} [1 - \exp(-Bt)] + \\ & + \frac{1}{B^2 + \omega^2} \left(3\omega A \frac{\rho_{ж}c}{\rho d} - \frac{3p_0}{\rho d} \frac{\hat{a}}{1+\hat{a}}\right) \times \\ & \times [B \sin \omega t - \omega \cos \omega t + \omega \exp(-Bt)], \end{aligned} \quad (6)$$

где $B = 3\eta/(r^2\rho)$.

В уравнении (6) экспонента $\exp(-Bt)$ с течением времени стремится к нулю. Первое слагаемое в правой части (6) положительно и является архимедовой, направленной вверх, составляющей скорости. Второе слагаемое, будучи отрицательным, отвечает за погружение пузырька. Третье слагаемое описывает осцилляцию пузырька около его текущего положения в объеме жидкости. Движению пузырька газа вниз соответствует отрицательная разность первого и второго слагаемых, причем чем меньше размер пузырька, тем выше скорость его погружения в расплав. Модуль перепада давления p_0 пропорционален размеру кавитационной каверны под поршнем за время движения поршня вверх:

$$\begin{aligned} p_0 \sim & 2A\pi R^2 - \bar{v}\pi(R^2 - R_0^2) \frac{1}{2\mu} = \\ = & \frac{\pi R^2}{2\mu} \left\{ 2A\mu - \bar{v} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где \bar{v} — средняя скорость поршня за время движения вверх, R_0 — радиус поршня, R — радиус сосуда.

При одинаковой интенсивности низкочастотного и ультразвукового воздействий значение $\{2A\mu - \bar{v}[1 - (R_0/R)^2]\}$, характеризующее недостаточное заполнение полости, будет одинаковым для обоих методов воздействия. Следовательно, $p_0 \sim 1/\mu$, и при низких частотах p_0 будет в ω_v/ω_n раз больше, чем при ультразвуке. Поэтому скорость u при низкочастотной обработке отрицательна, и возникающие кавитационные каверны заполняются газом с поверхности жидкости (расплава), а при ультразвуковом воздействии — положительна, и происходит полноценная кавитация. Таким образом, явление именно псевдокавитации при низкочастотной обработке вполне закономерно.

Пузырьки газа собираются непосредственно под поршень, поскольку на его нижней грани образуется зона прямого перепада давления: из уравнения Бернулли следует, что при повороте потока из зазора (обтекание угла) скорость, пропорциональная радиусу кривизны, стремится к бесконечности, а давление резко падает. В результате под поршнем из пузырьков накапливается воздушная подушка, частично вытесняющая жидкость из-под поршня, частично растворяющаяся в жидкости. Как следствие — уменьшение средней плотности в рабочем объеме, вызывающее выпадение в осадок частиц с большей плотностью, чем плотность жидкостно-воздушной смеси, и снижение нагрузки на поршень ввиду падения плотности.

Таким образом, кавитация, возникающая при ультразвуковой обработке, — это инструмент бародинамического воздействия на жидкость, а псевдокавитация, характерная для низкочастотной обработки, — явление, вызывающее выпадение из процесса перемешивания тяжелых частиц и нагазацию, и поэтому его нужно избегать путем снижения интенсивности обработки.

Следует также отметить, что для возможности движения газового пузырька в жидкости нужно учитывать состояние границы газ—поверхность жидкости. Именно состоянием на границе (значениями угла смачивания и вязкости) объясняется, например, отсутствие газовых пузырьков при работе с глицерином на частотах $\omega < 60$ Гц и амплитуде $A = 1,5$ мм: вязкость глицерина значительно выше, чем у воды, а скорость транспортировки воздушного пузырька, в соответствии с выражением (6), ниже.

ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ

Перемешивание жидкости при ультразвуковом воздействии локализуется возле лопающихся пузырьков газа, поэтому перемещение какого-либо компонента через всю обрабатываемую область если и происходит, то занимает значительное время. Для низкочастотной обработки турбулентное перемешивание — инструмент бародинамики.

Турбулентное перемешивание жидкости при ее вибрационной обработке поршнем [2—4] возникает благодаря потоку из зазора между поршнем и стенкой сосуда в камеру под поршнем, а также наличию перепада давления p_0 между зонами над и под поршнем. Для полноценного турбулентного перемешивания необходимо, чтобы расход струи из зазора за тот полупериод, когда поршень идет вверх, был достаточным, чтобы придать каждой частице жидкости значимые перемещение и скорость. Это необходимо для запаса инерции движения, так как процесс перемешивания глушится при движении поршня вниз. Выше (следствие уравнения (7)) показано, что перепад давлений p_0 при низких частотах будет в ω_v/ω_n раз больше, чем при ультразвуке, во столько же раз больше и расход жидкости за полупериод колебаний. То есть при ультразвуковой обработке расход мал для создания турбулентности. Поэтому мощность ультразвука идет на сжатие-растяжение расплава и кавитацию, в то время как мощность низких частот тратится на турбулентное перемешивание, и при низких частотах высока доля динамического воздействия на частицы расплава, проистекающая от турбулентности потоков, а не от звукового давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрены причины различий в поведении компонентов расплава при его обработке низкочастотными и ультразвуковыми колебаниями при одинаковом способе задания возмущения, а именно поршнем. Данные причины обусловлены разными факторами: различной способностью к силовому воздействию на частицы расплава и к перемешиванию обрабатываемого объема, диссипативными потерями, кавитационными проявлениями. При этом различия оказываются существенными и принципиальными, а следовательно, и методы можно считать принципиально разными и самостоятельными.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ офи-м №11-03-12082 и междисциплинарного проекта ИМЕТ и ФТИ УрО РАН № 12-М-23-2043.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агранат Б.А., Кириллов О.Д., Преображенский Н.А. и др. Ультразвук в металлургии. М.: Металлургия, 1969.
2. Игнатъев И.В., Киселев А.В., Долматов А.В. и др. // Расплавы. 2005. № 6. С. 3.
3. Игнатъев И.Э., Концевой Ю.В., Игнатъева Е.В., Пастухов Э.А. // Там же. 2007. № 2. С. 19.
4. Игнатъев И.Э., Концевой Ю.В., Игнатъева Е.В., Пастухов Э.А. // Там же. 2007. № 6. С. 3.
5. Игнатъев И.Э., Долматов А.В., Игнатъева Е.В. и др. // Там же. 2011. № 3. С. 3.
6. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Т. 1. Ленинград—Москва: ОГИЗ-Гостехиздат, 1948.

УДК 621.36 : 552.53

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ, ЖЕЛЕЗА И ОТГОНКИ ЦИНКА, СВИНЦА В СИСТЕМАХ ЦИНКОЛИГОНИТОВАЯ РУДА–УГЛЕРОД

© 2014 г. А.С. Колесников

Южно-Казахстанский государственный университет (ЮКГУ)
им. М. Ауезова, г. Шымкент, Респ. Казахстан

Статья поступила в редакцию 29.01.13 г., доработана 15.02.13 г., подписана в печать 22.02.13 г.

Проведены теоретические исследования термодинамического моделирования систем цинколигонитовая руда месторождения «Жайрем» (Казахстан) – углерод в интервалах температур от 1000 до 3000 К и давлений от 0,001 до 0,1 МПа с применением программного комплекса «Астра», основанного на принципе максимума энтропии. Установлено, что повышение количества восстановителя в шихте приводит к снижению степени перехода кремния в элементный Si (за счет увеличения перехода его в карбиды), а при меньшем содержании восстановителя возрастает доля кремния, переходящего в SiO, при практически полном отсутствии восстановленного элементного Si. При снижении давления в системе от 0,1 до 0,001 МПа уменьшаются температура полного перехода цинка (1500–1200 К), свинца (1900–1500 К) и температура начала образования кремния (2300–1900 К). При $P = 0,001$ МПа заметного (>50 %) образования элементного Si можно достичь при $T \approx 2450$ К.

Ключевые слова: цинковая руда, термодинамическое моделирование, цинк, свинец, железо, кремний, программный комплекс «Астра 4».

There were carried out theoretical research of thermodynamic simulation with regard to the systems Zink-Limonite ore of deposit Zhayrem (the Republic of Kazakhstan) – Carbon within the range of 1000–3000 K and pressure 0,001–0,1 MPa with the help of software solution «Astra», founded on the principle of maximum entropy. There was established that increase of reducing medium in the charging material leads to reducing of degree of silicon transition in elemental silicon (owing to increase of it transition in carbides), and at more less content of reducing medium there is increased part of silicon, that transits to SiO, at practically full absence of reduced elemental Si. Under decreasing of pressure in the system from 0,1 to 0,001 MPa there is decreases temperature of full transition of zink (1500–1200 K), lead (1900–1500 K) and temperature of the start of silicon formation (2300–1900 K). Under $P = 0,001$ MPa substantial (more than 50 %) elemental silicon formation could be attain at $T \approx 2450$ K.

Key words: zink ore, thermodynamic simulation, zink, lead, iron, silicon, software solution «Astra 4».

Колесников А.С. – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой технологии электротермических производств и металлургии ЮКГУ (160000, Респ. Казахстан, Южно-Казахстанская обл., г. Шымкент, ул. Еримбетова, 38/32).
Тел.: (7252) 30-06-51. E-mail: kas164@rambler.ru.