

УДК 549.2

КАВИТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ОБРАЗОВАНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ МИКРОСФЕРУЛ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРАХ

© 2003 г. М. И. Новгородова, С. Н. Андреев, А. А. Самохин, Г. Н. Гамянин

Представлено академиком Н.П. Юшкиным 20.11.2002 г.

Поступило 21.11.2002 г.

Среди минеральных микросферул, обнаруженных в последние годы непосредственно в пустотах и трещинах жильного кварца из мезотермальных золоторудных месторождений Якутии, Узбекистана, Аляски [1, 2], особый интерес вызывают микросферулы тугоплавких веществ, таких, как алюмосиликатные и кварцевые стекла, самородное золото, галенит, антимонит и другие сульфиды и сульфосоли. Несомненные признаки расплавленного состояния вещества, предшествующего затвердеванию и раскристаллизации микросферул, детально рассмотрены ранее [2, 3]. Возникновение капель расплава в среднетемпературных гидротермальных растворах возможно лишь вследствие резких локальных флуктуаций температур. Была выдвинута гипотеза о связи таких локальных температурных скачков с кавитационными явлениями в потоке вскипающих гидротермальных растворов.

Цель настоящей работы состояла в оценке выдвинутой гипотезы путем расчетов (в первом приближении) ряда физических параметров явлений кавитации в процессах минералогенеза. Результаты минералотермометрических исследований, выполненные, в частности, для Нежданинского месторождения (Якутия) [4], позволяют использовать в качестве базовых параметров гидротермального раствора $T_0 = 250^\circ\text{C}$, $P_0 = 1.5$ кбар, плотность раствора $\rho = 1$ г/см³, давление насыщенного пара жидкости при 250°C составит $P_n = 39.77$ бар. Принято, что жидкая фаза (вода) содержит в виде взвеси тонкодиспергированные твердые частицы породообразующих и рудных минералов. Для упрощения не учитывается изменение удельного ве-

са раствора в связи с “загрязнением” его минеральной пылью.

Лимитирующими параметрами кавитации – явления, при котором вследствие местного понижения давления происходит разрыв сплошности жидкости и обособление газовых пузырьков, служат скорость потока гидротермального раствора и градиент давления. В отличие от хорошо известных для природных процессов минералогенеза явлений вскипания и гетерогенизации гидротермальных растворов, гидродинамическая кавитация проявляется в локальных участках потока вблизи искривлений и выступов стенок флюидоподводящих трещин, т.е. в граничных участках их сужения и расширения, где вследствие изменения скоростей движения растворов возникают локальные области с барической гетерогенностью. Выделившиеся адиабатические газовые пузырьки, попадая в области давлений, где $P < P_{кр}$, способны расширяться, а при обратных соотношениях $P > P_{кр}$ сужаться. Сокращение пузырька происходит с огромными скоростями и выделением тепловой энергии, являющейся причиной резких флуктуаций температур. Рассчитано [2], что $P_{кр}$ лишь ненамного меньше давления насыщенного пара жидкости P_n .

Оценить критическую скорость потока ($V_{кр}$), при которой возникают кавитационные эффекты, можно, используя уравнение для так называемого числа кавитации (по определению $\chi \leq 1$) [5]:

$$\chi = 2(P_0 - P_n)/\rho V_{кр}^2, \quad (1)$$

где принимаем $\chi = 1$. Подставляя в уравнение приведенные выше параметры, получим, что для начала кавитации при заданных условиях требуются критические скорости потока $V_{кр}$, равные 5 м/с. Проницаемость пород, необходимая для фильтрации растворов с такой скоростью в соответствии с законом Стокса, должна быть увеличена на два и более порядков по сравнению с проницаемостью горных пород в их естественном залегании (10^{-12} – 10^{-14} по [6]). Подобные условия создаются вследствие разрядки тектонических напряжений в разломных зонах расланцевания и

Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана
Российской Академии наук, Москва
Институт общей физики
Российской Академии наук, Москва
Институт геологии алмаза и благородных металлов
Сибирского отделения
Российской Академии наук, Якутск

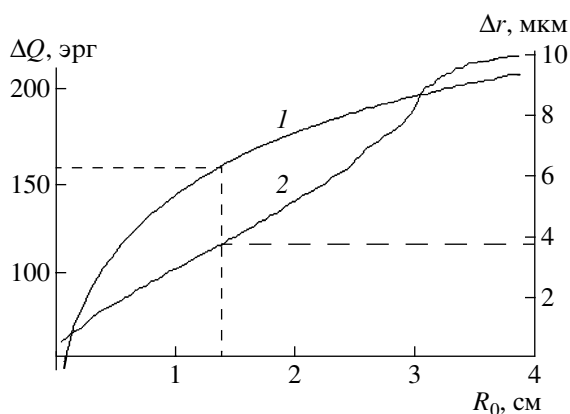


Рис. 1. Величина энерговклада ΔQ (кривая 1) и толщина проплавленного слоя Δr (кривая 2) микрозерна кварца в зависимости от изменения радиуса парогазового пузырька при его расширении.

трещиноватости, при тектонической активизации хрупких деформаций в прожилково-жильных системах минерализованных пород. Эти условия возникают в земной коре достаточно часто, что позволяет предположить широкое распространение кавитационных эффектов в природе.

Резкое локальное повышение температуры, вызванное пульсацией газовых пузырьков в потоке вскипающих гидротермальных растворов, происходит при сжатии пузырьков за почти мгновенное время, длящееся микросекунды. Ответ на вопрос, можно ли за такое время расплавить тугоплавкие минеральные микрозерна, требует обсуждения динамики процесса, величины выделяющейся энергии и скорости прогрева твердой частицы.

Необходимые расчеты были выполнены для самых тугоплавких минеральных веществ, присутствующих в составе микросферул – кварца и золота, без учета природных добавок, понижающих температуры плавления. Другими словами, ставилась задача оценить воздействие возможных максимальных температур, кратковременно возникающих при кавитационных явлениях. Для расчетов было принято, что начальное давление P_0 равно 1.5 кбар, $T = 250^\circ\text{C}$, газовые пузырьки в периоды их максимального расширения имеют сантиметровые размеры, размеры микрозерен самородного золота 50 мкм, кварца 10 мкм. Для упрощения принимаем также, что жидкая фаза – вода; расчеты проводим для одного пузырька газа.

Для оценки динамики схлопывания газо-парового пузырька в воде воспользуемся уравнением Рэлея [7]

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho_l} (P_n - P_0), \quad (2)$$

где R – радиус пузырька, P_n и P_0 – давление соответственно внутри пузырька и начальное давление, ρ_l – плотность окружающей пузырек несжимаемой жидкости. Давление P_n будем оценивать по формулам адиабатического сжатия неидеального газа, описываемого уравнением Ван-дер-Ваальса с переменной теплоемкостью в расчете на одну частицу $C_v = 5/2$ для плотности пара $\rho_v < \rho_c$ меньше критической плотности ρ_c и $C_v = 3$ для плотности $\rho_v > \rho_c$.

Расчет по формуле (2) при $P_1 = 1.5$ кбар, $\rho_l = 1 \text{ г/см}^3$ и начальных условиях $P_0 = 40.5$ бар и $R_0 = 1$ см, где P_n – давление насыщенного пара жидкости при 250°C , R_1 – радиус расширенного пузырька, показывает, что время t_m существования возросшей температуры $T > T_{пл}$ в пузырьке не превышает 1.5 мкс. Максимум температуры при этом составляет $T_{max} = 7030^\circ\text{C}$, а минимальный радиус пузырька $R_{min} = 0.15$ см. Величины t_m и R_{min} оказываются примерно пропорциональными начальному радиусу пузырька, в то же время T_{max} от R_0 практически не зависит.

Элементарная оценка $l = \sqrt{\chi t}$ в случае кварцевого микрозерна (температуропроводность $\chi = 0.02 \text{ см}^2/\text{с}$) показывает, что за время $t \sim 1$ мкс толщина прогретого расплавленного слоя $l \sim 1.7$ мкм является относительно малой, по сравнению с радиусом микрозерна $r_s = 10$ мкм. В то же время заметное превышение T_{max} над температурой плавления может обеспечить энерговклад, достаточный для более глубокого проплавления микрозерна.

Решая уравнение теплопроводности для сферической микрочастицы кварца с температуропроводностью χ , теплоемкостью $C_s = 70 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C})$, температурой плавления $T_{пл} = 1610^\circ\text{C}$ и начальной температурой $T(r, 0) = 250^\circ\text{C}$, на поверхности которой задана температура $T_s = T_{пл}$, определяемая из решения уравнения (2), можно получить полный энерговклад и распределение температуры внутри микрозерна к заданному моменту времени [8]. На рис.1 приведена величина полного

$$\text{энерговклада } \Delta Q = 4\pi C_s \int_0^{r_s} (T(r) - T_0) r^2 dr \text{ и толщ}$$

на проплава Δr в зависимости от радиуса расширившегося кавитационного пузырька к тому моменту времени, когда температура в пузырьке после прохождения через максимум $T_{max} = 7030^\circ\text{C}$ уменьшается до значения $T_{пл}$.

Из рис. 1 видно, что микрозерно получает энергию, необходимую для его полного расплавления $\Delta Q = 161$ эрг при $R_0 = 1.4$ см, однако фактическое температурное распределение существенно отличается от равномерного и толщина про-

плавленно слоя в этот момент составляет всего лишь $\Delta r = 3.7$ мкм. В последующие моменты времени глубина проплава может увеличиться до 4.5 мкм. Полное расплавление может реализоваться при $R_0 > 2$ см.

Таким образом, микрозерно кварца размером 10 мкм может быть выплавлено “сухим” способом за счет тепловой энергии, возникающей при резком адиабатическом сокращении радиуса газового пузырька от 2 до 0.6 см. Столь высокие температуры ($>T_{пл}$ кварца 1610°C), инициирующие начало плавления поверхности микрозерна кварца, могут быть реализованы лишь при сантиметровых размерах расширившегося газового пузырька, что, очевидно, возможно лишь при больших объемах адиабатической полости.

Аналогичные расчеты были выполнены для микрозерна самородного золота ($T_{пл} = 1063^\circ\text{C}$, $C_p = 25.23$ Дж/(моль \cdot $^\circ\text{C}$), $\chi = 1$ см²/с) с радиусом 50 мкм, результаты которых приведены на рис. 2. В этом случае необходимый для полного расплавления микрозерна энергозатрат $\Delta Q = 1.06 \cdot 10^4$ эрг достигается при $R_0 = 0.2$ см. При этом $R_{min} = 0.06$ см, а глубина проплава составляет величину $\Delta r = 14$ мкм. Для полного расплавления микрозерна из самородного золота в рамках данной модели требуется $R_0 > 0.5$ см.

Из соотношений уравнения (2) следует, что величины температуры прогрева твердой частицы и энергозатрат сжимающегося пузырька зависят от его размера в момент его наибольшего расширения. Естественно, что для более легкоплавких веществ, составляющих большинство минеральных микросферул, требуются на 1–2 порядка меньшие размеры пузырька.

Следует иметь в виду, что используемая модель является весьма упрощенной и нуждается в ряде уточнений, в частности в более последовательном учете динамики процессов на границе раздела жидкость–пар, реального уравнения состояния и процесса теплопередачи от окружающей среды к микрозерну.

Тем не менее вероятность резких флуктуаций температур, сопровождаемых генерацией тепло-

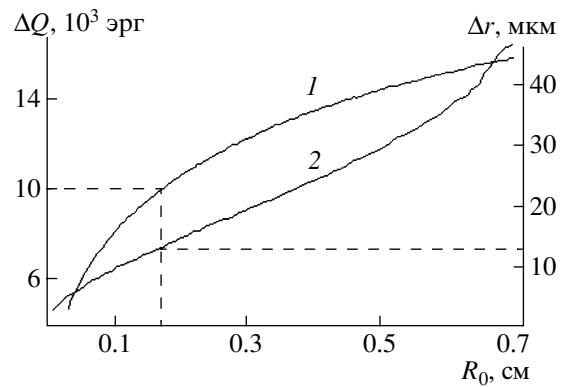


Рис. 2. Величина энергозатрат ΔQ (кривая 1) и толщина проплавленного слоя Δr (кривая 2) микрозерна золота в зависимости от изменения начального радиуса парогазового пузырька.

вой энергии, достаточной для проплавления твердых частиц в потоке вскипающего гидротермального раствора, подтверждается приведенными выше расчетами кавитационной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 00–05–64709).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я., Сыромятникова А.С. // Зап. ВМО. 1999. Ч. 128. № 5. С. 71–75.
2. Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я. и др. // Геохимия. 2003. № 1. С. 83–93.
3. Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я. и др. // Геохимия. 2003. № 11.
4. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Алпатов В.А. // Геология руд. месторождений. 1998. Т. 40. № 2. С. 137–156.
5. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 2.
6. Пэк А.А. В кн.: Рудообразующие процессы и системы. М.: Наука, 1989. С. 68–78.
7. Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М.: Наука, 1990.
8. Карлсруу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.