

УДК 534.141 : 534.8

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-43-50

Влияние ультразвука на процесс проникновения металлического расплава в субмикронные частицы и их агломераты

© 2016 г. **О.Б. Кудряшова, Д.Г. Эскин, А.П. Хрусталёв, С.А. Ворожцов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИТГУ), г. Томск

Институт проблем химико-энергетических технологий (ИПХЭТ) СО РАН, г. Бийск

Brunel University, Uxbridge, United Kingdom

Статья поступила в редакцию 11.02.16 г., доработана и подписана в печать 07.04.16 г.

На основе теории акустической кавитации и капиллярных явлений рассматриваются процессы деагломерирования и смачиваемости субмикронных частиц в расплаве металла при ультразвуковом воздействии. Получены основные зависимости, связывающие время воздействия с физико-химическими свойствами частиц и расплава, а также с характеристиками акустического излучения. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений времени ультразвуковой обработки расплава алюминия, содержащего субмикронные частицы оксида алюминия, и установлено удовлетворительное согласие полученных результатов.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, расплав металла, наночастицы, пропитка, кавитация.

Кудряшова О.Б. – докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН (659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1). E-mail: olgakudr@inbox.ru.

Эскин Д.Г. – канд. техн. наук, профессор кафедры математической физики НИТГУ (634050, г. Томск, пр-т Ленина, 36), профессор Брунельского университета (Великобритания). E-mail: Dmitry.Eskin@brunel.ac.uk.

Хрусталёв А.П. – аспирант кафедры прочности и проектирования НИТГУ. E-mail: tofik0014@mail.ru.

Ворожцов С.А. – канд. техн. наук, зав. лабораторией нанотехнологий металлургии НИТГУ. E-mail: vorn1985@gmail.com.

Для цитирования: Кудряшова О.Б., Эскин Д.Г., Хрусталёв А.П., Ворожцов С.А. Влияние ультразвука на процесс проникновения металлического расплава в субмикронные частицы и их агломераты // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 3. С. 43–50. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-43-50.

Kudryashova O.B., Eskin D.G., Khrustalyov A.P., Vorozhtsov S.A.

Ultrasound effect on molten metal propagation into submicron particles and their agglomerates

Based on the theory of acoustic cavitation and capillary phenomena, the article considers the processes of deagglomeration and wetting of submicron particles in a metal melt under ultrasound exposure. Basic dependences were found that link the exposure time to the physical and chemical properties of particles and melt, and to acoustic radiation characteristics. Experimental and calculated time values of ultrasonic treatment of aluminum melt containing submicron particles of aluminum oxide were compared, and the obtained results were found satisfactorily fit.

Keywords: ultrasonic treatment, metal melt, nanoparticles, impregnation, cavitation.

Kudryashova O.B. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Department of physics high-energy conversion materials IP CET SB RAS (659322, Russia, Biysk, Socialisticheskaya str., 1). E-mail: olgakudr@inbox.ru.

Eskin D.G. – Cand. Sci., Prof., Department of mathematical physics, Tomsk State University (TSU) (634050, Russia, Tomsk, Lenin str., 36), Prof., Brunel University (Brunel Centre for Advanced Solidification Technology, Brunel University; Kingston Lane, Uxbridge, UB8 3PH, UK). E-mail: Dmitry.Eskin@brunel.ac.uk.

Khrustalyov A.P. – Post-Graduate Student, TSU. E-mail: tofik0014@mail.ru.

Vorozhtsov S.A. – Cand. Sci. (Tech.), Head of the Metallurgy nanotechnology laboratory, TSU. E-mail: vorn1985@gmail.com.

Citation: Kudryashova O.B., Eskin D.G., Khrustalyov A.P., Vorozhtsov S.A. Vliyanie ul'trazvuka na protsess proniknoveniya metallichesкого расплава v submikronnye chastitsy i ikh aglomeraty. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2016. No. 3. С. 43–50. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-43-50.

Введение

Традиционная технология получения прутков деформируемого материала через матрицу (мундштук). Оно осуществляется способом «тандем» (заготовка за заготовкой), при котором задний неограниченной длины из пористого и порошкообразного сырья базируется на продавливании

конец предшествующей заготовки (пресс-остаток) выдавливается из конической полости матрицы передним концом очередного брикета. Одним из перспективных направлений создания композиционных сплавов с улучшенными механическими свойствами является модифицирование расплава субмикронными наночастицами. Однако при этом возникает проблема их введения в расплав [1, 2]:

- обладая большой удельной поверхностью и энергией, наночастицы легко слипаются;
- их окисление начинается при сравнительно низких температурах;
- зачастую они плохо смачиваются жидкостью (что особенно важно при введении частиц в жидкость);
- они легко образуют в воздухе аэрозоль, который в некоторых случаях является самовозгорающимся и даже взрывоопасным.

Все это делает очень сложным, а в некоторых случаях — и невозможным, прямое введение нанопорошков в расплавы.

Известно, что ультразвуковое (УЗ) воздействие повышает эффективность протекания процессов фильтрации и пропитки: в них происходит движение жидкой фазы внутри пор и каналов в твердой фазе. Интенсификации этих процессов способствует увеличение скорости относительного движения жидкости. Не случайно поэтому многочисленные работы посвящены исследованиям влияния вибрации, ультразвука и ударных волн на течение жидкостей в капиллярах [3—5].

Интенсификация этих процессов может быть достигнута при создании избыточного давления в устье капилляра — так называемого звукокапиллярного эффекта, т.е. резкого возрастания глубины и скорости проникновения жидкости в капиллярные каналы (трещины, поры) под действием ультразвука. Кавитационные пузырьки, схлопываясь, создают в жидкости мощный импульс давления, что способствует ускорению проникновения жидкости в поры и трещины пропитываемой поверхности.

На практике для ввода частиц в расплав используется УЗ-воздействие [6—8]. Предполагается, что ультразвуковая кавитация способствует смачиваемости неметаллических частиц и их лучшему распределению по объему. Одна из гипотез, объясняющая повышенную эффективную смачиваемость, связывает улучшенный доступ расплава к поверхности неметаллических частиц и проникновение расплава в дефекты поверхности (капил-

ляры) с ультразвуковой кавитацией [5]. Пульсирующие и схлопывающиеся пузырьки способствуют очистке поверхности частиц от адсорбированного газа и примесей, а также заполнению тонких поверхностных капилляров за счет звукокапиллярного эффекта.

Качественно процесс можно описать следующим образом. В условиях развитой ультразвуковой кавитации звуковое поле «загоняет» расплав в капиллярные каналы и поры частиц, даже если они плохо смачиваются. Кавитационные пузырьки, пульсируя и схлопываясь вблизи агломератов, создают избыточное давление, позволяющее жидкости проникнуть в узкие поры и преодолеть капиллярное давление. Как известно из теории капиллярного смачивания [9], жидкость при создании избыточного давления способна проникать в капилляры на глубину или высоту, на порядок большую, чем естественный уровень, обусловленный силой поверхностного натяжения. Насыщение агломерата частиц расплавом существенно меняет его свойства и облегчает его разделение на отдельные частицы, т.е. способствует деагломерации.

В данной работе предлагается распространить идею звукокапиллярного эффекта на процесс деагломерации конгломератов неметаллических частиц, в том числе нанопористых. Цель исследования — предложить математическую модель, позволяющую оценить время ультразвуковой обработки расплава, требующееся для насыщения пор агломератов частиц жидким металлом, в зависимости от характеристик порошка и использования ультразвукового воздействия.

Математическая модель

Наночастицы, вводимые в расплав металла, существуют в форме микронных и субмикронных агломератов, так как благодаря своей развитой поверхности они агломерируют сразу после своего создания. Такие агломераты содержат нанопоры и наноканалы. Размер кавитационных пузырьков зависит от частоты ультразвука, вязкости жидкости и поверхностного натяжения [10]. Экспериментальные исследования [11] показали, что диаметр кавитационных пузырьков в расплаве алюминия составляет 50—300 мкм (при частоте 17,5 кГц), т.е., пульсируя в ультразвуковом поле, их размеры сопоставимы с размерами агломератов.

В режиме развитой кавитации каждый агломерат, помещенный или проходящий через ка-

витационную зону, окружен пульсирующими и схлопывающимися пузырьками, так как в этих условиях индекс кавитации (отношение объема пузырьков к объему кавитационной области) стремится к единице [10]. Концентрация упрочняющих расплав частиц значительно меньше — около 1 мас.%. Поэтому можно предположить, что в каждый момент времени возле устья капилляра захлопнется хотя бы один кавитационный пузырек, создав импульс давления, способствующий заполнению капилляра жидкостью.

Наиболее точное качественное и количественное описание эффекта дает кавитационная теория, в которой предполагается, что движение жидкости в капилляре осуществляется под действием импульса давления, возникающего у устья капилляра при захлопывании кавитационного пузырька [12]. Используются следующие допущения:

- жидкость безгранична и несжимаема;
- пузырек схлопывается у устья капилляра в каждый период сжатия;
- пузырек имеет сферическую форму;
- влияние пульсаций соседних пузырьков и граничных стенок не учитывается.

Максимальное давление, создаваемое кавитационным пузырьком, можно оценить по приближенной формуле Ф.А. Бронина для несжимаемой жидкости [13]:

$$p_{\max} = p_{ef} \left[1 + \frac{(1+3\delta)z^3 - 4}{4} \sqrt{\frac{(1+3\delta)z^3 - 4}{4[(1+3\delta)z^3 - 3\delta z^4]}} \right]. \quad (1)$$

Здесь

$$z = \frac{R_{\max}}{R_{\min}} = \frac{1+3\delta}{\delta} = \left(\frac{(p_a + p_s)}{p_v} \right)^{\frac{1}{3(\gamma-1)}},$$

$$\delta = \frac{p_{vg}}{p_{ef}} \approx \frac{p_v}{p_{ef}},$$

где δ — параметр газосодержания; R_{\max} и R_{\min} — максимальный и минимальный радиусы колеблющегося в акустическом поле пузырька; p_a — атмосферное давление; p_s — звуковое давление; p_v — давление насыщенного пара; p_{vg} — давление парогазовой смеси, γ — показатель адиабаты.

Расчет по формуле (1) показывает, что максимальное давление при захлопывании пузырька растет с ростом параметра газосодержания.

В выражение (1) входит эффективное давление p_{ef} , отличающееся по величине от p_s из-за того, что кавитирующая жидкость является неоднородной. Она представляет собой нелинейную среду, в кото-

рой невозможно вычислить мгновенное значение звукового давления, так как нет полного описания процесса пульсации всех пузырьков в кавитационной области.

Поскольку в большинстве случаев размеры пузырьков существенно меньше длины волны звукового поля, в модели кавитации жидкость с парогазовыми включениями [10] принято представлять как новую среду с некоторыми эффективными акустическими характеристиками, отличными от свойств некавитирующей жидкости. Для плоской волны выражение для эффективного звукового давления запишется как

$$p_{ef} = \frac{v_{os}}{2} \rho_c c_c. \quad (2)$$

где ρ_c и c_c — плотность и скорость звука кавитирующей среды; v_{os} — колебательная скорость поверхности излучателя.

Интенсивность ультразвука связана со звуковым давлением следующим соотношением:

$$I = p_{ef} v_{os} / 2.$$

Поэтому с учетом выражения (1) отметим, что максимальное давление, создаваемое кавитационным пузырьком при захлопывании, пропорционально интенсивности действующего акустического излучения, повышается с ростом газосодержания жидкости и в первом приближении (без учета скорости осцилляций пузырьков) не зависит от частоты излучения.

Выражение (1) позволяет рассчитать давление, создаваемое в жидкости при захлопывании пузырька. Оно распространяется импульсно по капилляру, способствуя проникновению расплава и вытеснению газовой фазы из пористой частицы (агрегата). Хотя давление имеет импульсный характер, но продолжительность импульса, которую можно принять равной периоду ультразвуковых колебаний, значительно (в десятки тысяч раз) меньше рассматриваемых времен заполнения пор. Поэтому можно считать, что в устье поры имеется источник постоянного давления с эффективной величиной избыточного давления $p_{вх} = p_{\max} / \sqrt{2}$.

Критерием успешного проникновения металлического расплава в пористую частицу будем считать полное заполнение ее пор жидким металлом с вытеснением из них газа, а временем проникновения — время полного заполнения пор. Примем также, что все частицы имеют сферическую форму, один размер и поры одинаковых радиуса и глубины.

Теория капиллярного поднятия при избыточном давлении возле устья капилляра изложена в монографии [9], следуя которой приведем основные соотношения для описания этого процесса. В соответствии с формулой Лапласа можно считать, что на длине столбика жидкости в капилляре существует перепад давления

$$\Delta p = 2\sigma \cos\theta / R_{cr}, \quad (3)$$

где R_{cr} — радиус капилляра; θ — угол смачивания; σ — поверхностное натяжение.

При наложении избыточного давления p_{ex} скорость движения мениска в капилляре определяется выражением

$$v_{cr} = \frac{dl}{dt} = \frac{R_{cr}^2 (p_{ex} + 2\sigma \cos\theta / R_{cr})}{8(\eta_l l_l + \eta_a l_a)}, \quad (4)$$

где η_l — вязкость расплава; η_a — вязкость газовой фазы; l_l и l_a — длины капилляров, заполненная расплавом и воздухом соответственно (общая длина капилляра $l_{cr} = l_l + l_a$). Вязкость газовой фазы (воздуха, водорода, паров металла) существенно меньше вязкости расплава: $\eta_a \ll \eta_l$.

В этом случае уравнение (4) запишется следующим образом:

$$v_{cr} = \frac{R_{cr}^2 p}{8\eta_l l_l}, \quad (5)$$

где суммарное давление равно

$$p = p_{ex} + 2\sigma \cos\theta / R_{cr} = p_{ex} + \Delta p. \quad (6)$$

Равновесие жидкости в капилляре наступает при равенстве значений ее весового и избыточного давлений. Предельная высота капиллярного поднятия, таким образом, определится по формуле

$$h = p / g\rho_l, \quad (7)$$

где g — ускорение свободного падения; ρ_l — плотность жидкости.

В случае плохой смачиваемости частиц расплавом металла второй член в уравнении (6) будет отрицательным и может достигать больших величин для малых радиусов капилляров, поэтому для достижения эффекта проникновения расплава в поры необходимо, чтобы избыточное давление превышало лапласовское ($p_{ex} > \Delta p$).

Определим критическую величину радиуса поры (R_{cr}^*), при которой в заданных условиях избыточное давление уравновесит капиллярное ($p = 0$):

$$R_{cr}^* = 2\sigma \cos\theta / p_{ex}. \quad (8)$$

Если же $p_{ex} > \Delta p$, то расплав алюминия проникнет в поры. Наложение избыточного давления позволит полностью вытеснить из капилляра (поры) газ и заполнить его жидкостью в течение некоторого времени.

Интегрирование уравнения (5) с начальными условиями, когда жидкость еще не вошла в капилляр (при $t = 0, l = 0$), дает следующее выражение для времени полного проникновения (при $t = t_{wt}, l = l_{cap}$) при избыточном давлении p_{ex} :

$$t_{wt} = \frac{4\eta_l l_{cr}^2}{R_{cr}^2 p}. \quad (9)$$

Найти отношение l_{cr} / R_{cr} для используемых на практике порошков можно исходя из следующей модели. Примем, что частица порошка имеет сферическую форму и диаметр D , а ее поверхность равномерно и полностью покрыта конусообразными порами радиусом R_{cr} и высотой l_{cr} . Экспериментально можно определить диаметр частиц порошка и удельную поверхность (S_{ss}). С учетом сделанных предположений путем несложных геометрических преобразований получим

$$\frac{l_{cr}}{R_{cr}} = \frac{8}{3} S_{ss} D\rho, \quad (10)$$

где ρ — истинная плотность частицы.

В таблице приведены собственные данные измерения удельной поверхности некоторых порошков, применяемых при модификации расплава алюминия (полученные методом БЭТ с помощью автоматического газоадсорбционного анализатора TriStar II), и расчетные значения масштабного фактора l_{cr} / R_{cr} .

Размер, удельная поверхность частиц порошков (эксперимент) и отношение длины пор к их радиусу (расчет)

Порошок	D_{av} , мкм	S_{ss} , м ² /г	l_{cr} / R_{cr}^*
γ -Al ₂ O ₃	0,036	35–40	14,2
ScF ₃	—	17	—
80 мас.% AlN, 20 мас.% Al ₂ O ₃ , AlOOH, Al(OH) ₃	0,038	14–20	6,8
ZrO ₂ (Y ₂ O ₃) [15]	1,5	7	110
Al ₂ O ₃	0,2–5,0	60	465
*Расчет по формуле (10).			

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости отношения l_{cr}/R_{cr} от диаметра частиц и удельной поверхности порошка в практически важных диапазонах этих параметров [14]. Наиболее сложными в смысле проникновения расплава в поры будут частицы с наибольшим отношением l_{cr}/R_{cr} , т.е. микронные «рыхлые» агломераты с большой удельной поверхностью порошка.

Для расчета времени проникновения расплава в поры частиц необходимо определить величину суммарного давления $p_{ex} + \Delta p$. В работе [15] исследовано избыточное давление, создаваемое в капиллярах при захлопывании кавитационных пузырьков при ультразвуковой кавитации в расплаве алюминия. Установлено, что его величина может достигать очень высоких значений (в зависимости от близости захлопнувшегося пузырька к устью капилляра) — от 1 МПа до 4 ГПа и более (в среднем 10–400 МПа). С другой стороны, давление Δp может достигать величин того же порядка: в соответствии с формулой (3) $\Delta p = 80 \div 320$ МПа для $R_{cr} = 5 \div 20$ нм в системе «расплав алюминия — частица оксида алюминия» (краевой угол $\theta = 152^\circ$, $\sigma = 0,9$ Н/м) [16].

На рис. 2 показаны расчетные зависимости модуля лапласовского давления $|\Delta p|$ и суммы $p_{ex} + \Delta p$ в поре-капилляре от ее радиуса и избыточного давления, а на рис. 3 — зависимость критического радиуса пор-капилляров, рассчитанная по формуле (8) для расплава алюминия, от величины p_{ex} .

В практически реализуемых условиях, когда избыточное давление в расплаве составляет десятки мегапаскалей, проникновение расплава в капилляры частиц становится возможным. При этом для заполнения относительно больших пор ($R_{cr} = 100 \div 1000$ нм) выполняется условие $R_{cr} \gg R_{cr}^*$ (типичный радиус пор в частицах существенно превышает критический, определяемый выражением (8), в котором можно пренебречь лапласовским давлением). С учетом реализуемых в режиме развитой кавитации уровней избыточного давления в порах (десятки и сотни мегапаскалей) время проникновения расплава в поры частиц в соответствии с выражением (9) составит порядка нескольких миллисекунд. Если же в частицах порошка имеется большое количество нанопор ($R_{cr} = 5 \div 100$ нм), лапласовская составляющая общего давления в поре является существенной, и суммарная его величина будет $p \sim 10 \div 100$ Па.

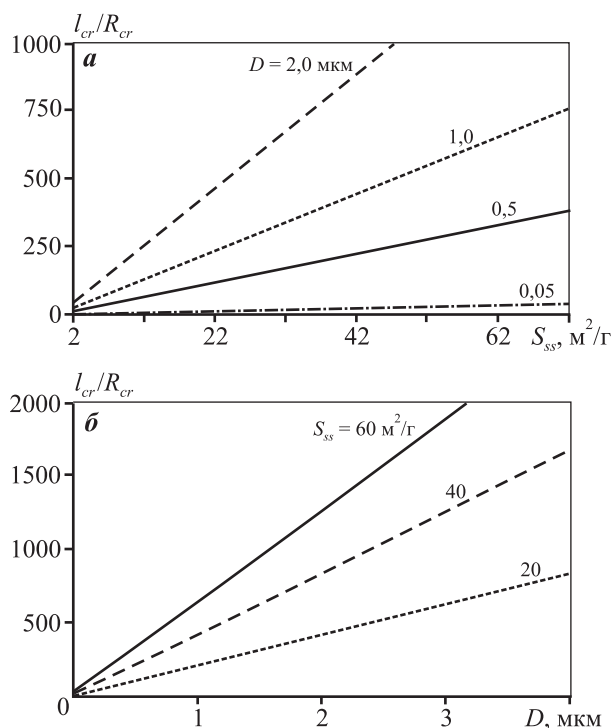


Рис. 1. Зависимость отношения длины пор к их радиусу от удельной поверхности порошка (а) и диаметра частиц (б)

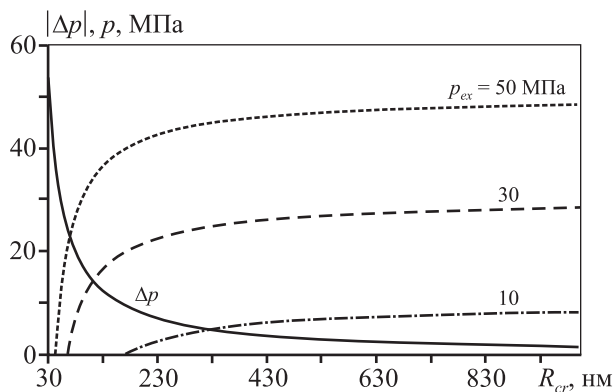


Рис. 2. Зависимость модуля лапласовского давления и результирующего давления ($p = p_{ex} + \Delta p$) в поре от ее радиуса

Время пропитки агломерата (t_{wt}) в соответствии с уравнением (9) пропорционально квадрату длины пор (l_{cr}) и вязкости расплава (η_l), обратно пропорционально площади сечения пор и величине давления $p = p_{ex} + \Delta p$. При $p_{ex} \gg \Delta p$ поверхностное натяжение жидкости не влияет на время проникновения.

На рис. 4, а показана зависимость t_{wt} от l_{cr}/R_{cr} (отношение длины поры к ее радиусу). При выполнении условия $R_{cr} \gg R_{cr}^*$ (относительно крупнопо-

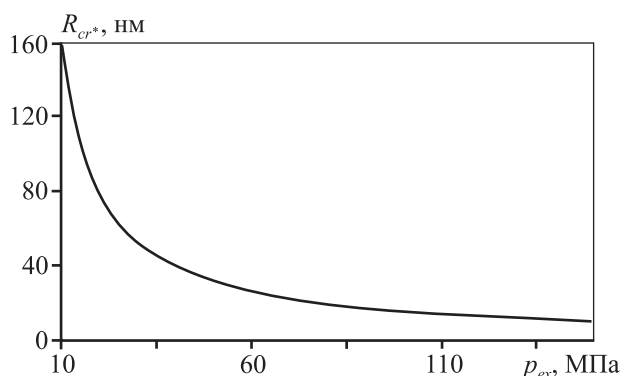


Рис. 3. Зависимость критического радиуса пор от избыточного давления

ристые порошки) на время проникновения влияют не абсолютные значения длины и радиуса пор, а их отношение, но в случае высокодисперсных порошков с большим количеством нанопор величина t_{wf} зависит от физико-химических свойств системы частица—расплав (поверхностное натяжение, краевой угол) и радиуса пор.

В экспериментах по введению мелкодисперсных частиц в расплав металла продолжительность ультразвуковой обработки измеряется минутами. Но при расчете времени, необходимого для пропитки частицы расплавом при условии $R_{cr} \gg R_{cr}^*$, оно составит порядка нескольких микросекунд. В случае $R_{cr} \sim R_{cr}^*$ капиллярное давление сопоставимо по величине с избыточным, и обе эти величины составляют порядка десятков мегапаскалей, а результирующее давление $p \sim 10\text{--}100$ Па (область малых значений R_{cr} на рис. 2, а).

На рис. 4, б показаны зависимости времени проникновения расплава в поры частиц отношения длины пор к их радиусу от давления в капилляре при различных значениях.

При увеличении избыточного давления (пропорционально росту интенсивности ультразвукового воздействия) сначала происходит резкое уменьшение длительности проникновения, однако дальнейшее повышение p_{ex} не дает заметного выигрыша во времени.

Полученные теоретические результаты косвенно подтверждаются экспериментальными данными по ультразвуковой обработке частиц оксидов, карбидов и боридов в матрице алюминиевого расплава (см., например, обзор в [8]). При этом главные параметры воздействия — это продолжительность обработки и амплитуда вибрации. Смачиваемость частиц и их распределение в объеме жидкости улучшались с увеличением времени обработки.

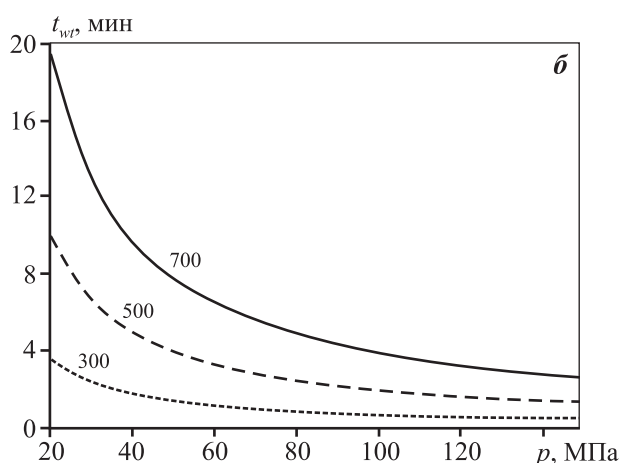
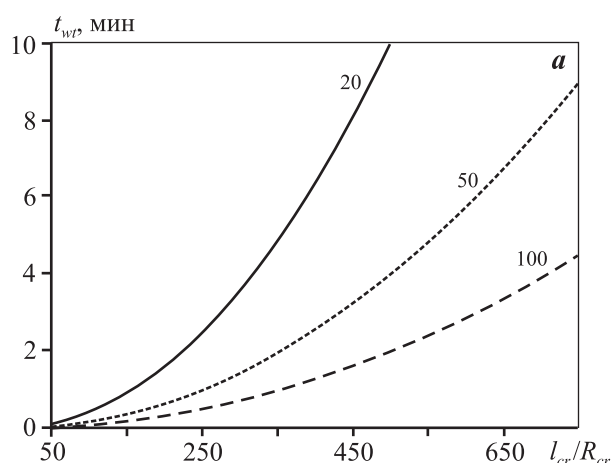


Рис. 4. Зависимость времени проникновения расплава в поры частиц от отношения длины пор к их радиусу для различных значений p_{ex} (а) и от давления в капилляре для различных значений масштабного фактора l_{cr}/R_{cr} (б)
Цифры у кривых: а — p_{ex} , Па; б — l_{cr}/R_{cr}

Найденная экспериментальная зависимость продолжительности УЗ-воздействия от размеров частиц (для $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в 99,99 %-ном расплаве алюминия при температуре 700—720 °С и акустической мощности 500 Вт) показывает, что с уменьшением диаметра частиц требуемое время обработки увеличивается [17]. Проведен расчет по формуле (9) для $p = 50$ Па в предположении, что масштабный фактор частиц l_{cr}/R_{cr} уменьшается обратно пропорционально их диаметру. Его результаты, а также экспериментальные данные приведены на рис. 5.

Несмотря на то, что расчетное время пропитки частиц растет быстрее с уменьшением их размеров, чем это наблюдалось в эксперименте, можно говорить о хорошем согласии полученных результатов математического моделирования с экспериментальными.

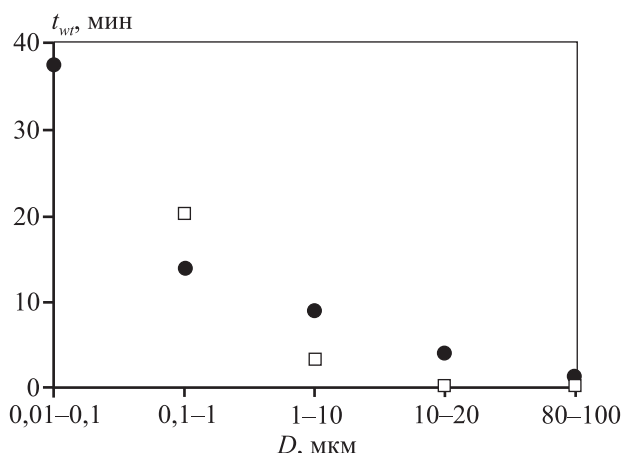


Рис. 5. Время ультразвуковой кавитационной обработки расплава алюминия для деагломерации частиц $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от диаметра частиц
 ● – эксперимент [17], ■ – расчет по формуле (9)

Выводы

Создана математическая модель проникновения расплава металла в субмикронные частицы и их агломераты под действием ультразвука, основанная на известных соотношениях, описывающих капиллярные явления и ультразвуковую кавитацию. Проведенное параметрическое исследование предложенной модели позволяет сделать следующие выводы.

1. Ультразвуковое воздействие делает возможным пропитку агломератов частиц расплавом металла, а значит, способствует введению в расплав частиц, при условии создания кавитационного режима обработки. Насыщение агломерата частиц расплавом улучшает его разделение на отдельные частицы (деагломерацию).

2. Время пропитки пропорционально вязкости расплава, квадрату отношения длины пор к их радиусу, которое можно оценить исходя из величины удельной поверхности порошка и размера агломератов. Время проникновения обратно пропорционально внешнему давлению устья пор, а значит, и интенсивности УЗ-воздействия.

3. В режиме развитой кавитации (избыточное давление порядка десятков мегапаскалей) для агломератов с относительно крупными порами (радиусом более 100 нм) лапласовским капиллярным давлением можно пренебречь ($p_{ex} \gg \Delta p$). При этом время проникновения не зависит от абсолютных значений радиуса пор агломератов частиц и поверхностного натяжения расплава. Время пропитки таких агломератов расплавом при ульт-

развуковом воздействии очень мало (порядка миллисекунд).

4. В практически важном случае обработки частиц, имеющих большое количество нанопор с радиусом менее 100 нм, лапласовское капиллярное давление сопоставимо с избыточным давлением, создаваемым при захлопывании кавитационных пузырьков, и на динамику процесса оказывают существенное влияние величина радиуса пор и физико-химические свойства частиц и расплава. Время пропитки таких частиц расплавом составит порядка единиц и десятков минут.

5. Сравнение расчетных значений времени пропитки частиц оксида алюминия расплавом алюминия с экспериментальными данными свидетельствует об адекватности предложенной модели.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.587.21.0019 (уникальный идентификатор RFMEFI58715X0019).

Литература

1. Крушенко Г.Г. Средства и технологии увеличения содержания нанопорошков в алюминиевых модифицирующих прутках // Нанотехника: 2011. No. 3. С. 55–61.
2. Yang Y., Li X. Ultrasonic cavitation based nanomanufacturing of bulk aluminum matrix nanocomposites // J. Manufact. Sci. Eng. 2007. Vol. 129. P. 497–501.
3. Коновалов Е.Г., Германович И.Н. Ультразвуковой капиллярный эффект // Докл. АН БССР. 1962. Т. 6. No. 8. С. 492–493.
4. Розин Ю.П., Тихонова В.С., Костючек М.Н. Об anomalно больших постоянных давлениях в непосредственной близости от излучателя // Укр. физ. журн. 1975. No. 2. С. 214–220.
5. Прохоренко П.П., Дежкунов Н.В., Коновалов Г.Е. Ультразвуковой капиллярный эффект. Минск: Наука и техника, 1981.
6. Игнатьев И.Э., Пастухов Э.А., Игнатьева Е.В. Принципиальное различие методов низкочастотного и ультразвукового воздействия на расплавы // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2014. No. 5. С. 7–11.
7. Vorozhtsov S.A., Eskin D.G., Tamayo J., Vorozhtsov A.B., Promakhov V.V., Averin A.A., Khrustalyov A.P. The Application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites // Metal. Mater. Trans. A. 2015. Vol. 46A. No. 4. P. 2870–2875.

8. *Eskin G.I., Eskin D.G.* Ultrasonic treatment of light alloy melts // Boca Raton: CRC Press, 2014.
9. *Ролдугин В.И.* Физикохимия поверхности. Долгопродурный: ИД «Интеллект», 2011.
10. *Сиротюк М.Г.* Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: ЕЕ Медиа, 2007.
11. *Tzanakis I., Xu W.W., Lebon G.S.B., Eskin D.G., Pericleous K., Lee P.D.* In situ synchrotron radiography and spectrum analysis of transient cavitation bubbles in molten aluminium alloy // *Phys. Proc.* 2015. No. 70. P. 841–845.
12. *Китайгородский Ю.И., Дроздалова В.И.* Расчет высоты и скорости подъема жидкости по капиллярам при воздействии ультразвуковых колебаний // Применение ультразвука в металлургии. М.: Металлургия, 1977. С. 12–16.
13. *Бронин Ф.А.* Расчет некоторых параметров динамики кавитационной полости в звуковом поле // Тр. МИСиС. 1970. С. 53–57.
14. *Vorozhtsov S., Zhukov, I., Vorozhtsov A., Zhukov A., Eskin D., Kvetinskaya A.* Synthesis of micro- and nanoparticles of metal oxides and their application for reinforcement of al-based alloys // *Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 2015. P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/718207>.
15. *Tzanakis I., Xu W.W., Eskin D.G., Lee P.D., Kotsovinos N.* In situ observation and analysis of ultrasonic capillary effect in molten aluminium // *Ultrasonic Sonochemistry.* 2015. No. 27. P. 72–80.
16. *Тимошкин А.В.* Комплексное рафинирование и модифицирование силуминов методом высокоскоростной струйной обработки расплава: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МАТИ—РГТУ, 2003.
17. *Эскин Г.И.* К условиям введения несмачиваемой тугоплавкой фазы в расплав алюминия с помощью ультразвука // *Технол. легких сплавов.* 1974. No. 11. С. 21–25.
6. *Ignat'ev I.E., Pastuhov E.A., Ignat'eva E.V.* Principial'noe razlichie metodov nizkochastotnogo i ul'trazvukovogo vozdeystviya na rasplavy [The fundamental difference methods low-frequency and ultrasonic affecting on the melt]. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2014. No. 5. P. 7–11.
7. *Vorozhtsov S.A., Eskin D.G., Tamayo J., Vorozhtsov A.B., Promakhov V.V., Averin A.A., Khrustal'ov A.P.* The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites. *Metal. Mater. Trans. A.* 2015. Vol. 46A. No. 4. P. 2870–2875.
8. *Eskin G.I., Eskin D.G.* Ultrasonic treatment of light alloy melts. Boca Raton: CRC Press, 2014.
9. *Roldugin V.I.* Fizikohimiya poverhnosti [Physical chemistry of surfaces]. Dolgoprudnyj: ID «Интеллект», 2011.
10. *Sirotyuk M.G.* Moshchnye ul'trazvukovye polya [Powerful ultrasonic fields]. Ed. L.D. Rozenberg. Moscow: EE Media, 2007.
11. *Tzanakis I., Xu W.W., Lebon G.S.B., Eskin D.G., Pericleous K., Lee P.D.* In situ synchrotron radiography and spectrum analysis of transient cavitation bubbles in molten aluminium alloy. *Phys. Proc.* 2015. No. 70. P. 841–845.
12. *Kitajgorodskij Yu.I., Drozhalova V.I.* Raschet vysoty i skorosti podema zhidkosti po kapillyaram pri vozdeystvii ul'trazvukovykh kolebanij. In: *Primenenie ul'trazvuka v metallurgii* [Calculation of height and fluid rise velocity in capillaries when exposed to ultrasonic vibrations. In: *Application of ultrasound in metallurgy*]. Moscow: Metallurgiya, 1977. P. 12–16.
13. *Bronin F.A.* Raschet nekotorykh parametrov dinamiki kavitatsionnoi polosti v zvukovom pole [Estimation of some characteristics of dynamics of cavitation cavities in the sound field]. *Trudy MISIS.* 1970. P. 53–57.
14. *Vorozhtsov S., Zhukov, I., Vorozhtsov A., Zhukov A., Eskin D., Kvetinskaya A.* Synthesis of micro- and nanoparticles of metal oxides and their application for reinforcement of al-based alloys. *Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 2015. P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/718207>.
15. *Tzanakis I., Xu W.W., Eskin D.G., Lee P.D., Kotsovinos N.* In situ observation and analysis of ultrasonic capillary effect in molten aluminium. *Ultrasonic Sonochemistry.* 2015. No. 27. P. 72–80.
16. *Timoshkin A.V.* Kompleksnoe rafinirovanie i modifitsirovanie siluminov metodom vysokoskorostnoi struinoi obrabotki rasplava [Integrated the refining and modification silumins method of high-speed inject melt treatment]; Diss. Ph.D. Moscow: МАТИ—RSTU, 2003.
17. *Eskin G.I.* K usloviyam vvedeniya nesmachivaemoi tugo-plavkoi fazy v rasplav alyuminiya s pomoshch'yu ul'trazvuka [To introducing conditions nonwetttable infusible phase aluminum melt by ultrasound]. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 1974. No. 11. P. 21–25.

References

1. *Krushenko G.G.* Sredstva i tekhnologii uvelicheniya sodержaniya nano-poroshkov v alyuminievyyh modifiziruyushchih prutka [Tools and technologies to increase the content of nanopowders into modifying aluminum rods]. *Nanotekhnika.* 2011. No. 3. P. 55–61.
2. *Yang Y., Li X.* Ultrasonic cavitation based nanomanufacturing of bulk aluminum matrix nanocomposites. *J. Manufact. Sci. Eng.* 2007. Vol. 129. P. 497–501.
3. *Konovalov E.G., Germanovich I.N.* Ul'trazvukovoj kapillyarnyj ehffekt [The ultrasonic capillary effect]. *Doklady akademii nauk BSSR.* 1962. T. 6. No. 8. P. 492–493.
4. *Rozin Yu.P., Tihonova V.S., Kostyuchek M.N.* Ob anomal'no bol'shih postoyannyh davleniyah v neposredstvennoj blizosti ot izluchatelya [On anomalously high constant pressure in immediate vicinity of the radiant]. *Ukr. fiz. zhurn.* 1975. No. 2. P. 214–220.
5. *Prohorenko P.P., Dezhkunov N.V., Konovalov G.E.* Ul'tra-