

УДК 532-8; 621

*Асташкин Ю.С.*

***ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВ НА ДИСПЕРСНЫХ  
ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦАХ.***

*Представлены расчеты работы образования пузырька на дефектах дисперсных частиц в легкоплавких металлах*

*Дисперсные частицы, зародышеобразование пузырьков, дефекты частиц,*

*Astashkin U.S.*

*Bubbles nucleation on dispersed solid particles.*

*Calculation of the work of bubbles nucleation on defects of dispersed solid particles in low melting metals are presented.*

*Dispersed particles, bubbles nucleation, low melting metals*

Известно, что для реального жидкого металла характерно присутствие специфических примесей в виде дисперсных частиц: оксидов, нитридов, сульфидов, а также пленок окислов. Обзор литературы по этой тематике приведен в работах [1-4]. Ковалентные нитриды алюминия, галлия и индия химически устойчивы, тугоплавки, термостойки. Оксиды практически нерастворимы в алюминии, Долговременность существования мелкодисперсных включений в жидком металле определяется прочностью, и термической устойчивостью их материала. Величины прочности и термической устойчивости некоторых тугоплавких окислов, известные из работ Кинжери и других исследователей [5,6] приведены в работе [7]. Так прочность оксида  $A_2O_3$  –15,4 кг/см<sup>2</sup>, при температуре  $T_{max} = 1900^\circ C$ , оксида  $SiO_2$  –16,8 кг/см<sup>2</sup> при  $T_{max} = 1100^\circ C$ . Термическая устойчивость при оценке на качественном уровне: хорошая и отличная соответственно.

В таблице 1 приведены значения углов смачивания некоторых оксидов и веществ в расплавах олова и висмута [5-9],

Таблица 1

Sn	$Al_2O_3$	$Si_2H_2$	Графит	Mo
$\theta^\circ$	174	166	156	130
Bi $\theta^\circ$	150	140	136	160

Для оксидных частиц в алюминии при температуре до 800 °С значения угла смачивания  $\theta \cong 150^\circ - 160^\circ$  [1].

При кавитации и кипении чистой жидкости обычно рассматривается гетерогенное образование зародыша пузырька и его рост до критического радиуса на дефектах твердой поверхности [10-11]. В ряде работ было показано снижение работы образования –  $W_{ks}$  для критического зародыша на дефектах конической формы, цилиндрической формы и других дефектах твердой протяженной поверхности [10]. Обширный обзор этих работ приведен в монографии [10]. Банковым было получено выражение для работы зародышеобразования на выступе твердой поверхности, согласно которому она выше по сравнению с величиной на плоской поверхности [11]:

$$W_{ks} = W_k \Phi(\alpha, \beta), \text{ где } \Phi(\alpha, \beta) - \text{ функция углов } \alpha \text{ и } \beta. \quad (1)$$

На основании анализа выражения (1) для работы образования критического зародыша для выступа был сделан вывод, что сферический выступ на твердой поверхности не может рассматриваться как потенциальный центр зародышеобразования [11]. Для случая плоской твердой поверхности указанная функция (1) практически совпадает с функцией Фольмера, зависящей только от угла смачивания  $\Phi(\theta)$  [10-12]. Детальный физический анализ для случая чисто парового пузырька с использованием функции  $\Phi(\theta)$  дан в монографии [13].

В расплавах металлов, не содержащих растворенного газа, гетерогенное зародышеобразование паровой фазы может реализоваться на мелкодис-

персных частицах различной природы, возможные модели которых приведены на рис. 1a,b,c.

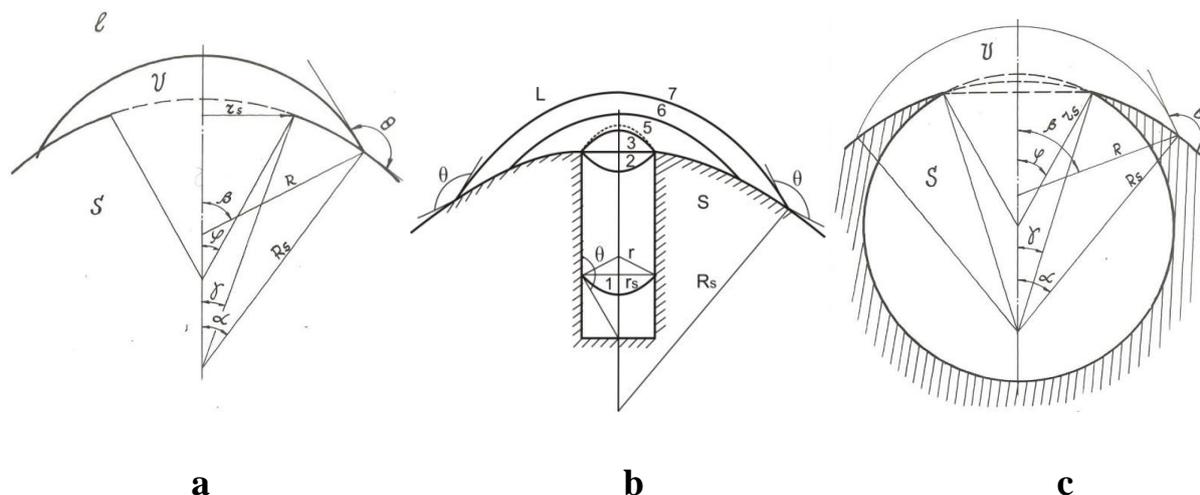


Рис.1abc Модели мелкодисперсных примесей в расплавах металлов: **a** – с конической впадиной, **b** – цилиндрической впадиной, **c** – резервуарной впадиной.

Выражения для работы зародышеобразования для этих моделей приведены ниже (2). Для случая отсутствия дефектов поверхности сферической частицы и асимметричного роста пузырька значение работы образования должно незначительно отличаться от работы на выступе сферической формы. Поэтому по сравнению с выражением для работы образования на выступе или впадине (1) выражение для этих моделей (2) включает в себя функции Банкова [11] и усложняется в зависимости от формы впадины:

$$W_s^* = W^* \Phi_s(\alpha, \beta, \gamma, \varphi) \quad (2),$$

где

$$\Phi_s(\alpha, \beta, \gamma, \varphi) = \frac{3}{2} \sin^2 \beta \left[ f_A(\alpha, \beta) - \cos \Theta \frac{\sin^2 \gamma}{\sin^2 \alpha} f_A(\gamma, \varphi) \right] - \frac{\sin^2 \beta}{4} [f_V(\alpha, \beta) + \gamma \frac{\sin^2 \gamma}{\sin^2 \alpha} f_V(\gamma, \varphi)] , \quad \text{где } f_A(\alpha, \beta) \text{ и } f_V(\alpha, \beta) \text{ функции Банкова [11].}$$

Для случая конической впадины на сферической частице (рис.1a) в выражении (2):

$$f_A(\gamma, \varphi) = \left( \frac{1}{1 + \cos \gamma} - \frac{1}{2 \sin \varphi} \right), \quad f_V(\gamma, \varphi) = \left( \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2} + 3 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} + 2 \operatorname{ctg} \varphi \right).$$

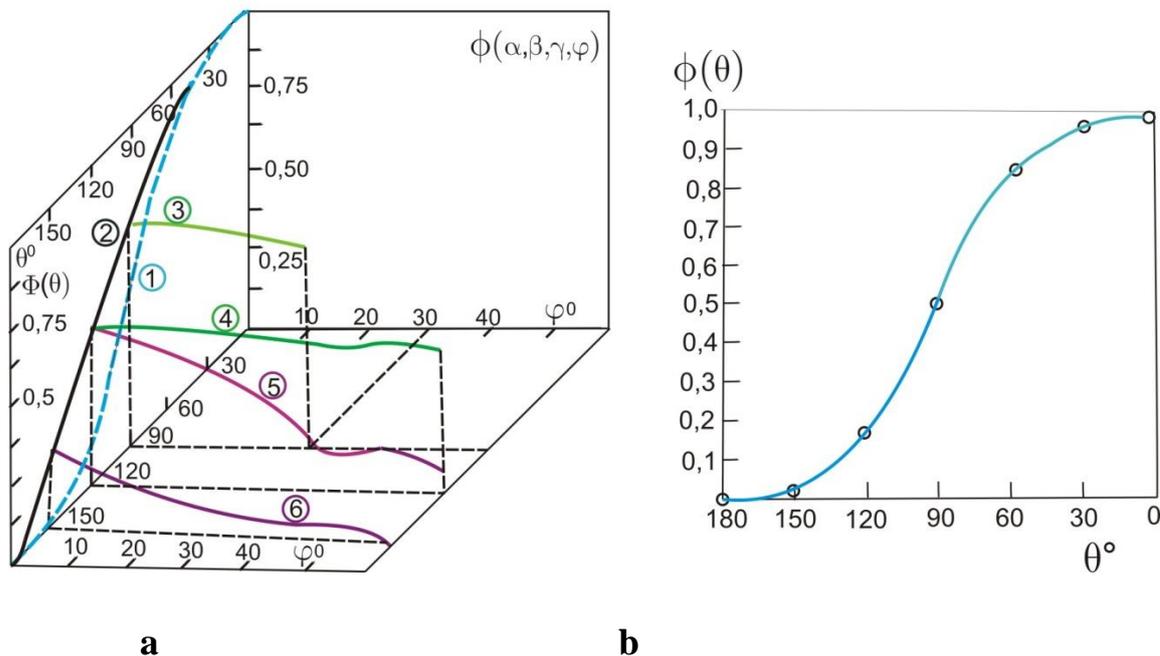


Рис 2ab. а) функция  $\Phi(\alpha, \beta, \gamma, \varphi)$  для случая сферической частицы с конической впадиной в зависимости от угла  $\varphi$  и  $\theta$  при значении угла  $\beta = 120^\circ$ .  $r_s/R_s = 1/2$ .

1 – функции Банкова  $\Phi(\alpha, \beta, \gamma, \varphi)$  для выступа. 2– функция Фольмера  $\Phi(\theta)$   $\theta = 90^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\sin \gamma = 1/2 \sin \varphi$ . 4.  $\theta = 120^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\sin \gamma = 1/2 \sin \varphi$ . 5  $\theta = 120^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\gamma = \varphi$ . 6  $\theta = 150^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\gamma = \varphi$ .

б) Зависимость функции Фольмера от угла смачивания для случая плоской поверхности,

На рис.2а и 2б для сравнения приведены также значения функции Фольмера –  $\Phi(\theta)$ . Выражение  $\theta = 180^\circ - (\beta - \alpha)$ , полученное Банковым для выступа используется, но соотношение между радиусом критического пузырька и радиусом выступа:  $R_s = R^* \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$  не может быть непосредственно использовано в данном расчете из-за большего количества углов и более сложной связи между ними. Так например, при равенстве углов  $\gamma = \varphi$ , ( $\sin \gamma = \sin \varphi$ ) коническая впадина имеет вид центрального сектора, при равенстве углов  $\gamma = \alpha$ , – узкого центрального сектора. Поэтому при расчете соотношение углов задается в функциональном виде.

Результаты расчетов  $\Phi(\alpha, \beta, \gamma, \varphi)$  представлены на рис.2 для трех значений угла смачивания  $\theta=90^\circ$  – кривая 3,  $120^\circ$ – кривые 4,5,  $150^\circ$ –кривая 6. Углы  $\alpha, \beta$  связаны с углом  $\theta$  соотношением:  $\theta = 180^\circ - (\beta - \alpha)$ ,  $\beta = 120^\circ$ , угол  $\alpha$  соответственно принимает значения:  $30^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$ . Полученные данные при радиусе горловины  $r_0 = 0,5R_s$ ,  $\sin \gamma = 0,5 \sin \varphi$ , для указанной функции (кривая – 3), незначительно отличаются от данных для случая зарождения на выступе (кривая –2). Причем, они остаются выше, чем для плоской поверхности (кривая 1). Для впадины с центральным сектором (углы  $\gamma = \varphi$ ) и увеличения угла смачивания  $\theta \geq 120^\circ$  (кривые – 5,6) значения функции  $\Phi(\alpha, \beta, \gamma, \varphi)$  существенно снижаются и работа зародышеобразования на дисперсной частице делается меньше, чем на плоской поверхности.

Для резервуарной впадины выражение (2) примет вид:

$$f_A(\gamma, \varphi) = \left( \frac{1}{1+\cos \varphi} - \frac{1}{1-\cos \varphi} \right); \quad f_V(\gamma, \varphi) = \left( \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2} + 3 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} + \operatorname{ctg}^3 \frac{\varphi}{2} + 3 \operatorname{ctg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right)$$

Значение функции –  $\Phi(\alpha, \beta, \gamma, \varphi)$  в этом случае всегда ниже, чем для конической впадины, а для углов смачивания  $\theta \geq 120^\circ$ , расчетные значения работы зародышеобразования значения ничтожно малы по сравнению с работой в однородной жидкости. Наибольшие значения работы зародышеобразования характерны для модели с цилиндрической впадиной при тех же значениях углов смачивания. Как известно, на протяженной плоской поверхности для несмачиваемой впадины цилиндрического типа, пузырек критического радиуса может расти на участке поверхности, окружающий горловину [10]. Для случая дисперсной частицы с радиусом горловины  $r_0$  для случая  $R_s \gg r_0$  предположение о росте пузырька на этом участке означает пренебрежение кривизной и допущение случайного преобладания актов переноса вакансий в область растущего пузырька [14,15].

В самой цилиндрической поре первичный пузырек может сохраняться длительное время, и такая пора является потенциальным активным центром зародышеобразования. Сложный вопрос, о возможной связи оксидов с растворенным водородом в расплавленном алюминии в зависимости от температуры и давления рассматривался в ряде работ и находится вне рамок данной работы [3-4].

Мелкодисперсные частицы для случая зарождения должны находиться в жидкости или в объеме жидкого металла во взвешенном состоянии. Динамика мелкодисперсных частиц в расплавах металлов оценивалось в работе [7]. В этой связи представляет интерес сопоставление гравитационного и броуновского смещения частицы в расплавах металлов. Влияние броуновского движения на смещение сферических частиц в расплавах легкоплавких металлов было оценено в работе [7]. С этой целью использовалось модифицированное выражение Эйнштейна – Смолуховского, приведенное в известной монографии [16,17]. Броуновское смещение значительно преобладает над гравитационным смещением для частиц с радиусом  $R_s \leq 0,5$  микрона, гравитационное смещение преобладает – у частиц с радиусом  $R_s \geq 1$  микрона.

Использованные источники.

1. Добаткин В.И., Габидуллин Р.М., Колачев Б.А., Макаров Б.С., Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах.// М. Металлургия .1976 – 264 с.
2. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов. М. Мир. 1974– 294 с.
3. Eskin G.I., Eskin D.G. Ultrasonic treatment light alloy melts.// Gordon and Breach. Amsterdam. 1998, CRC press, Amsterdam, 2014
4. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка цветных металлов и сплавов.// В кн. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность. М. Наука. 1986– 275 с.

5. Кинжери В.Д. Исследования при высоких температурах.// М. Изд-во Инлит., 1962 – 126 с.
6. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов.// М. Госиздат физ-матлит. 1959– 353 с.
7. Асташкин Ю.С. Динамика мелкодисперсных частиц в расплавах легкоплавких металлов. Теория и практика современной науки. №12, 1920– 10 с.
8. Гуляев А.П. Металловедение.// М. Metallurgia. 1977– 641 с.
9. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. // М. Metallurgia. 1989 –384 А.И. Манохин. М. Наука. 1986 –275с
10. Несис Е.И. Кипение жидкостей. М. Наука. 1973 –279 с.
11. Банков С.Г. Вскипание на твердой поверхности в отсутствие газовой фазы. //В сб. Вопросы физики кипения. М. Мир. 1964– 81-98 с.
12. Volmer M. Kinetik der Phasenbildung// Leipzig 1939
13. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость//М. Наука. 1972 –312 с.
14. Асташкин Ю.С. Кавитационная прочность и пороги кавитации в расплавах металлов.//М. Мисис. Научные труды №132, 1981– 26-33 с.
15. Ficher J.C. J. Appl. Phys. v.19, №11, 1948– 1062- 1070 p,
16. Хаппель Д.Ж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса.// М. Мир. 1976– 630 с.
17. Там же . Сравнение гравитационных и броуновских смещений частиц в воде и воздухе.// Таблица. 477-478 с.