

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА ПРИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Жарко Н.А., Стреха В. А.

Дежунов Н.В. – к.т.н., доцент,  
Савилова Ю. И. – к.т.н., доцент

В работе получены новые данные, подтверждающие гипотезу о кавитационной природе ультразвукового капиллярного эффекта и указывающие на возможность использования капилляра в качестве датчика активности кавитации. Исследовалась связь свечения, генерируемого в кавитационной области – звуколюминесценции.

Ультразвуковой капиллярный эффект (УЗКЭ) - явление увеличения высоты и скорости подъема жидкости в капилляре под действием ультразвука [1, 2]. Этот эффект может характеризоваться либо высотой подъема жидкости в капилляре НУЗ, либо избыточным давлением воздуха  $\Delta P_0$ , которое необходимо создать над мениском в капилляре, чтобы удерживать его на высоте обычного капиллярного подъема  $H_0$ .

Было показано, что кавитация играет важную роль в образовании потока жидкости, направленного в капилляр. Ее значение можно проиллюстрировать, используя пороговую природу кавитации. В докавитационных условиях увеличения подъема жидкости в капилляре не было зафиксировано. При плавном увеличении амплитуды колебаний излучателя граница раздела жидкость-газ (мениск) приходит в движение скачком в момент возникновения кавитационного облачка у входа в капилляр (рис.1).

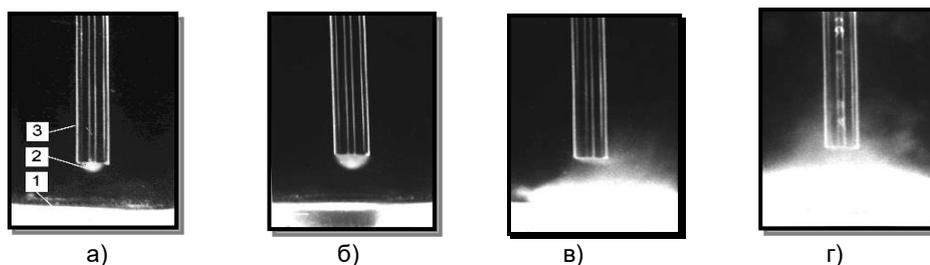


Рисунок 1 – эволюция кавитационной области у торца капилляра в воде при увеличении амплитуды  $A$  колебаний излучателя. 1 – излучатель; 2 – кавитационное облачко; 3 – капилляр;  $A$ , мкм = 1(а); 2.5 (б); 6 (в); 10 (г)

При наличии кавитации на торце капилляра величина УЗКЭ не зависит от ориентации капилляра относительно оси излучателя.

Основной результат наших экспериментов показывает, что при амплитудах колебаний ниже порога ЗЛ не наблюдается повышения уровня жидкости в капилляре.

В таблице представлены результаты измерений пороговой амплитуды  $A_{зл.пор}$ , при которой возникает ЗЛ, и пороговой амплитуды  $A_{узкэ.пор}$ , при которой начинается подъем жидкости в капилляре, т. е. возникает УЗКЭ. Пороги были измерены при двух положениях капилляра относительно излучателя, когда торец капилляра находился на небольшом расстоянии от излучателя ( $d = 0.05$  мм) и на значительном удалении от него ( $d = 5$  мм).

При малых  $d$  ( $d \leq 0.05$  мм) пороги ЗЛ и УЗКЭ либо совпадают (в пределах точности установки заданной амплитуды  $A$ ), либо  $A_{узкэ.пор}$  ненамного превосходит  $A_{зл.пор}$ , т. е. в этом случае оба эффекта возникают практически одновременно.

Таблица 1. Пороговые амплитуды возникновения ЗЛ и УЗКЭ для различных жидкостей

Параметр	d	Жидкость					
		1	2	3	4	5	6
$A_{зл.пор}$	0.05	7.0	2.5	1.5	0.7	0.5	0.4
$A_{узкэ.пор}$		8.5	3.0	1.5	0.9	0.5	0.5
$A_{зл.пор}$	5.0	8.0	3.5	2.3	1.1	0.7	0.4
$A_{узкэ.пор}$		-	5.0	3.0	1.6	1.2	0.7

Примечание: 1 – глицерин, 2 – водно-глицериновая смесь 60% (по весу) глицерина и 40% воды, 3 – вода, 4 – хлорбензин, 5 – изоамиловый спирт, 6 – ацетон,  $t = 25$  °С. Точность установки заданной амплитуды  $\pm 4\%$ .

Если вход в капилляр находится на значительном удалении от излучателя ( $d \geq 5$  мм),  $A_{узкэ.пор}$  обычно отличается от  $A_{зл.пор}$  в большей степени, чем при  $d \leq 0.05$  мм. Это можно было бы ожидать, поскольку звуковое

поле в нашем случае не является сфокусированным и при увеличении амплитуды колебаний излучающей поверхности преобразователя кавитация появляется вначале вблизи у поверхности излучателя и только при больших амплитудах - в дальнем. Поле зрения фотоумножителя перекрывает оба зазора ( $d = 0.05$  мм и  $d = 5$  мм), т. е. свечение регистрируется из всего объема жидкости над излучателем, в то время как капилляр является локальным датчиком.

Интересно, что за исключением ацетона во всех жидкостях оба порога ниже, когда капилляр находится вблизи излучателя; соответствующее отношение порогов ЗЛ лежит в диапазоне 0.6 – 0.9, а отношение порогов УЗКЭ - в диапазоне 0.4 - 0.6. Это означает, что близость торца капилляра способствует зародышеобразованию инерционной кавитации.

Данные, представленные на рисунке 2, были получены при б зазоре  $d = 5$  мм между капилляром и излучателем. Здесь  $L$  – выходной сигнал фотоумножителя. Для  $\Delta P_0$  выбрана линейная шкала, а для  $L$  – логарифмическая. Каждая точка на графиках – результат усреднения трех независимых измерений.

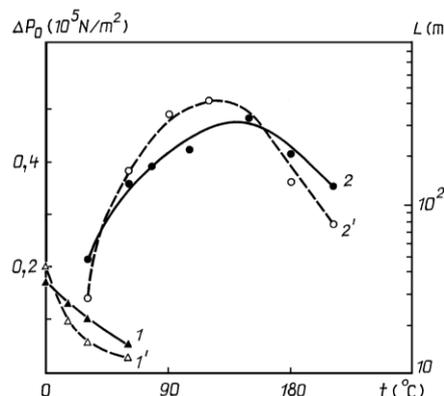


Рисунок 2 - зависимости интенсивности ЗЛ ( $L$  (штриховые линии) и  $\Delta P_0$  (сплошные линии) от температуры  $t$

Корреляция эмиссии ЗЛ и ультразвукового капиллярного эффекта (таблица 1, рис. 2) указывает на связь нестационарной кавитации и УЗКЭ и может рассматриваться в качестве подтверждения гипотезы о кавитационной природе этого эффекта [2, 3].

В соответствии с этой гипотезой механизм УЗКЭ выглядит следующим образом. Под действием ультразвука кавитационное облачко (или кавитационный кластер) появляется у входа в капилляр. Кавитационные пузырьки захлопываются асимметрично с образованием микроструй жидкости. Попадание каждой такой струи в канал капилляра вызывает увеличение подъема мениска в капилляре на некоторую высоту  $\Delta h_{\text{под}}$ . Суммирование этих приращений вызывает экспериментально наблюдаемое увеличение высоты и скорости подъема (или проникновения) жидкости в капиллярные каналы. Чем выше концентрация пузырьков в кавитационной области и чем сильнее они захлопываются, тем большего эффекта можно ожидать.

В описываемых выше экспериментах датчик звуколюминесценции воспринимал свечение из всего объема жидкости между поверхностью излучателя и капилляром. Капилляр же является по существу локальным датчиком. Поэтому можно ожидать лучшего согласования результатов измерения порогов УЗКЭ и ЗЛ, например, когда локальный датчик находится вблизи поверхности излучателя (где кавитация возникает в первую очередь), чем в случае, когда капилляр расположен на значительном удалении от излучателя.

Применительно к задаче металлизации отверстий малого диаметра ультразвуковая интенсификация может обеспечить ускорение процесса и повышение качества покрытия за счет ультразвукового капиллярного эффекта.

Список использованных источников:

1. Прохоренко, П.П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежунев, Г.Е. Коновалов; под ред. В.В. Клубовича. – Минск.: Наука и техника, 1981. – 135 с.
2. Dezhkunov, N.V. The use of a capillary as a sensor of cavitation / N.V. Dezhkunov, T.G. Leighton // In: Nonlinear acoustics at the beginning of 21-t century. Edited by O. Rudenko and O. Sapozhnikov, MSU, Moscow. – 2003. - V. 2. - P.1163-1166.
3. Dezhkunov, N.V. Characterization of acoustic cavitation in water and molten aluminum alloy / N.V. Dezhkunov [etc.]. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2013. – V.20. – № 2. – P. 754-761.