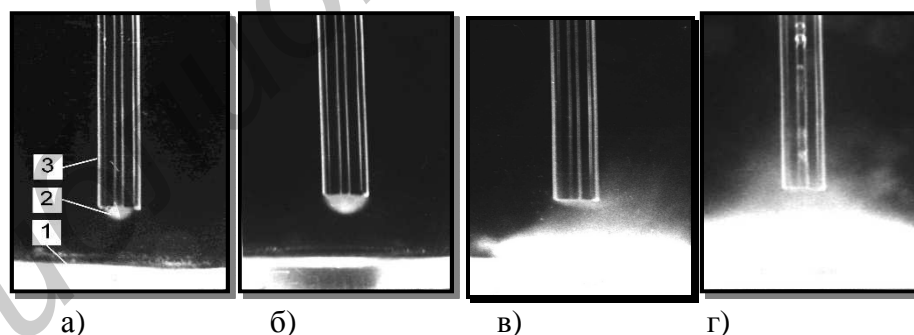


Н.В. Дежкунов, доц., канд. техн. наук;
 А.В. Котухов; В.С. Гаврилюк; Л.К. Кушнер;
 И.И. Кузьмар; А.А. Хмыль, проф. д-р техн. наук
 БГУИР, г. Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Ультразвуковой капиллярный эффект (УЗКЭ) представляет собой явление увеличения высоты и скорости подъема жидкости в капилляре под действием ультразвука [1, 2]. Этот эффект может характеризоваться либо высотой подъема жидкости в капилляре $H_{УЗ}$, либо избыточным давлением воздуха ΔP_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).



1 -- излучатель; 2 -- кавитационное облачко; 3 -- капилляр; 1 -- излучатель; 2 -- кавитационное облачко; 3 -- капилляр; А, мкм = 1(а); 2.5 (б); 6 (в); 10 (г)

Рисунок 1 – эволюция кавитационной области у торца капилляра в воде при увеличении амплитуды А колебаний излучателя

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

В настоящей 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 (ЗЛ) и УЗКЭ,

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

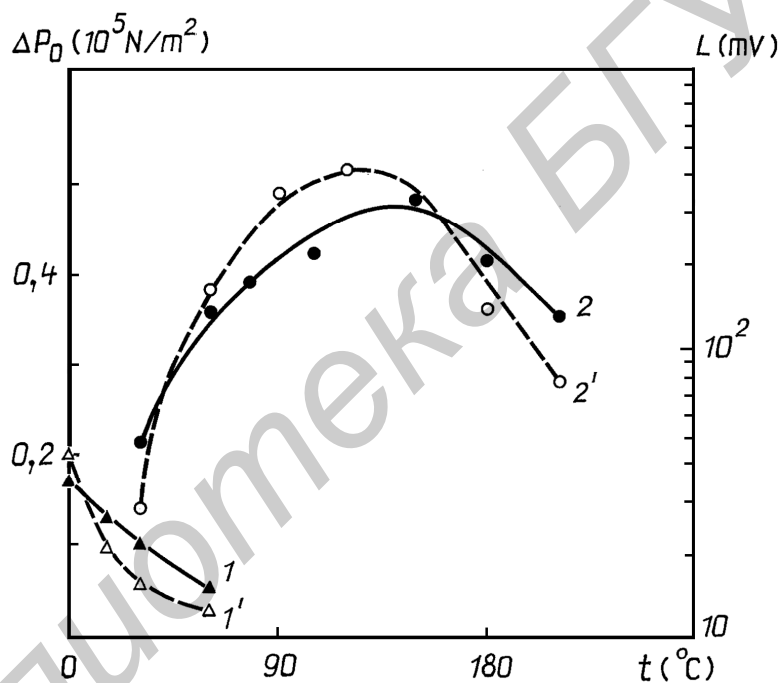
Параметр	d	Жидкость					
		1	2	3	4	5	6
$A_{зл.пор}$	0.05	7.0	2.5	1.5	0.7	0.5	0.4
$A_{узкэ.пор}$		8.5	3.0	1.5	0.9	0.5	0.5
$A_{зл.пор}$	5.0	8.0	3.5	2.3	1.1	0.7	0.4
$A_{узкэ.пор}$		-	5.0	3.0	1.6	1.2	0.7

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 зазора $d = 5$ мм между капилляром и излучателем. Здесь L – выходной сигнал фотоумножителя. Для ΔP_0 выбрана линейная шкала, а для L – логарифмическая. Каждая точка на графиках – результат усреднения трех независимых измерений.



Жидкость: 1 - вода, $d = 5$ мм; 2 - глицерин, $d = 0,05$ мм

Рисунок 2 - зависимости интенсивности ЗЛ L (штриховые линии) и ΔP_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. Кавита-

ционные 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоренко, П.П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкун, Г.Е. Коновалов; под ред. В.В. Клубовича. – Минск.: Наукаи 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.