

Высокое качество электронно-оптических приборов и систем во многом определяет функциональные возможности сложных радиоэлектронных комплексов, лазерных систем обнаружения, волоконно-оптических систем связи, медицинской аппаратуры, кинофотоаппаратуры и контрольно-измерительных приборов. В этих изделиях большое значение имеет чистота поверхности отдельных деталей, оптических и электронных модулей. При любой точности обработки минимальное количество посторонних веществ на рабочих поверхностях не позволяет получить требуемые оптические и электрические характеристики, что ведёт к увеличению брака, отказам аппаратуры в процессе эксплуатации, получению недостоверных данных. Для осуществления необходимого режима ультразвуковой очистки необходим выбор оптимальных значений интенсивности ультразвука и частоты колебаний. Актуальной задачей является оптимизация параметров ультразвукового поля в ваннах групповой обработки, установление закономерностей физико-химических процессов очистки сложнопрофилированных и микрорельефных поверхностей оптических и электронных модулей в жидких моющих средах при частотной и фазовой модуляции сигнала.

УДК 534.8:621.396.6

АКТИВАЦИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

д-р техн. наук, проф. В.Л. ЛАНИН, В.И. ЗАХАРЕВИЧ
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);
В.С. ТОМАЛЬ
(РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника», Минск)

Исследованы процессы газовой и токовой активации кавитационной области при ультразвуковой очистке твердых тел в водных растворах поверхностно-активных веществ с частотной и фазовой модуляцией ультразвукового сигнала. Исследования показали, что в зависимости от вида загрязнения преобладающую роль в очистке играют различные процессы. Так, разрушение слабо взаимосвязанных загрязнений происходит, в основном, под действием пульсирующих (незахлопывающихся) кавитационных пузырьков. На краях пленки загрязнений пульсирующие пузырьки, совершая интенсивные колебания, преодолевают силы сцепления пленки с поверхностью, проникают под пленку, разрывают и отслаивают ее. Радиационное давление и звукокапиллярный эффект способствуют проникновению моющего раствора в микропоры, неровности и глухие каналы. Акустические течения осуществляют ускоренное удаление загрязнений с поверхности. Если же загрязнения прочно связаны с поверхностью, то для их разрушения и удаления с поверхности необходимо наличие захлопывающихся кавитационных пузырьков, создающих микроударное воздействие на поверхность. В результате активации интенсивность кавитации в жидкой среде растет в среднем на 10...30 %.

Введение. Функциональные возможности сложных радиоэлектронных комплексов, лазерных систем обнаружения, волоконно-оптических систем связи, медицинской аппаратуры, контрольно-измерительных и других приборов во многом определяет качество электронно-оптических приборов и систем.

Анализ причин отказов изделий показывает, что их четвертая часть приходится на долю плохого качества очистки поверхностей [1]. Ручная очистка органическими растворителями приводила к значительному количеству брака, травматизму, выбросам паров растворителей в атмосферу и загрязнению окружающей среды. Хлорированные углеводороды токсичны, обладают канцерогенным и мутагенным воздействием, образуют смог и требуют утилизации отходов методом захоронения. Общеизвестен основной недостаток спиртов – их пожаро- и взрывоопасность. Хладоны разрушают озоновый слой и усиливают парниковый эффект. Экологические проблемы вызвали повышенный интерес к процессам и устройствам ультразвуковой очистки электронных и электронно-оптических изделий. Весьма актуальна проблема создания новых безопасных моющих композиций на основе водных растворов поверхностно-активных веществ, способных очищать микрорельефные поверхности от загрязнений [2].

Воздействие ультразвуковых (УЗ) полей на жидкие среды вызывает в них процессы кавитации, а также макро- и микропотоки в объеме жидкости, прилегающей к излучаемой поверхности ванны. Захлопывание кавитационных газовых полостей сопровождается образованием ударных микроволн $(1...5) \cdot 10^8$ Па, которые разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности изделий,

но и в определенной степени изменяют морфологию поверхности [3]. Микро- и макропотоки в пограничных слоях способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефной поверхности. Актуальной задачей является оптимизация параметров ультразвукового поля в ваннах групповой обработки, установление закономерностей физико-химических процессов очистки сложнопрофилированных и микрорельефных поверхностей оптических и электронных модулей в жидких моющих средах при частотной и фазовой модуляции ультразвукового сигнала.

Моделирование распределения давления ультразвукового поля. В процессах УЗ-очистки используются колебания значительной мощности, при этом в подвергаемой ультразвуковому воздействию жидкости происходит ряд вторичных эффектов, из которых важнейшее значение имеют переменные звуковые давления, акустические потоки и кавитация [4, 5]. При различном расположении излучателей ультразвука изменяются размеры кавитационной области и эффективность создания кавитационных пузырьков. Распространение УЗ-давлений в жидкой среде описывается волновым уравнением:

$$\frac{1}{\rho_0 c_w^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность жидкой среды; p – давление; c_w – скорость распространения УЗ-давлений в среде; t – время; x, y, z – декартовы координаты.

Для решения уравнения (1) задавались граничные условия:

- на границах ванны:

$$\mathbf{n} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right) = 0, \quad (2)$$

$$P_A = p_0 \cdot \sin(\omega t) + p_0 \cdot \sin([\omega - 100]t) + p_0 \cdot \sin([\omega + 100]t); \quad (3)$$

$$P_B = p_0 \cdot \sin(\omega t + 4/6\pi) + p_0 \cdot \sin([\omega - 100]t + 4/6\pi) + p_0 \cdot \sin([\omega + 100]t + 4/6\pi); \quad (4)$$

$$P_C = p_0 \cdot \sin(\omega t + 2/6\pi) + p_0 \cdot \sin([\omega - 100]t + 2/6\pi) + p_0 \cdot \sin([\omega + 100]t + 2/6\pi). \quad (5)$$

В начальный момент времени полагалось равенство давления нулю $p(x, y, z) = 0$. Уравнение (1) решалось с учетом граничных условий (2) – (5) и с помощью прикладной программы COMSOL для различных вариантов расположения УЗ-преобразователей на дне ванны [6]. Условия импеданса поверхности объекта, погруженного в ванну:

$$n(-1/\rho_0)(vp - q) - i\omega p / Z = 0, \quad (6)$$

где n – число стенок ванны; q – коэффициент отражения; Z – акустический импеданс.

Отражение или поглощение стенками ванны УЗ-колебаний также изменяет результаты моделирования. Моделирование проводилось в предположении, что стенки ванны твердые, а следовательно, отражающие. Условия отражения от стенки ванны:

$$n(1/\rho_0)(vp - q) = 0. \quad (7)$$

Моделирование УЗ-давлений в ваннах с распределенными по площади излучателями показало, что максимальная амплитуда изменения давления УЗ-волны наблюдается у поверхности излучателей и на расстояниях, равных 4λ . Более равномерное УЗ-поле по объему ванны в результате суперпозиции волн создается для расположения излучателей в узлах решетки треугольной структуры с длиной стороны, кратной $\lambda/\sqrt{3}$ (рис. 1).

На распределение УЗ-давлений в объеме ванны влияет присутствие в жидкой среде твердых тел, которые в определенной степени отражают УЗ-волны. Более сильное влияние на распределение давлений оказывает кассета с деталями, расположенная на расстоянии, кратном λ от дна ванны (рис. 2). За счет отражения от поверхностей деталей увеличивается УЗ-давление в прилегающих слоях жидкости.

Газовая активация. Для увеличения интенсивности кавитации в локальном объеме возможно искусственно создавать кавитационные пузырьки, подавая в ванну воздух с помощью компрессора. Воздух проходит через фильтр, который разбивает воздушный поток на пузырьки микронного размера (рис. 3). Далее эти пузырьки под воздействием ультразвука захлопываются и очищают поверхность детали. Для более равномерного распределения кавитационных пузырьков по площади ванны форма фильтра выбрана плоской. Для создания пузырьков микронных размеров необходимо выполнять следующие условия: давление воздуха не должно превышать 0,2...0,3 МПа, диаметр отверстий в фильтре должен составлять

единицы микрометра, а расстояние между ними по сравнению с диаметром должно быть значительно (рис. 4). Эти условия в определенной степени предотвращают объединение пузырьков микронных размеров в большие газовые полости. Фильтр изготовлен из корпуса и двух пористых пластин, полученных порошковой металлургией из оксида титана и спрессованных вместе.

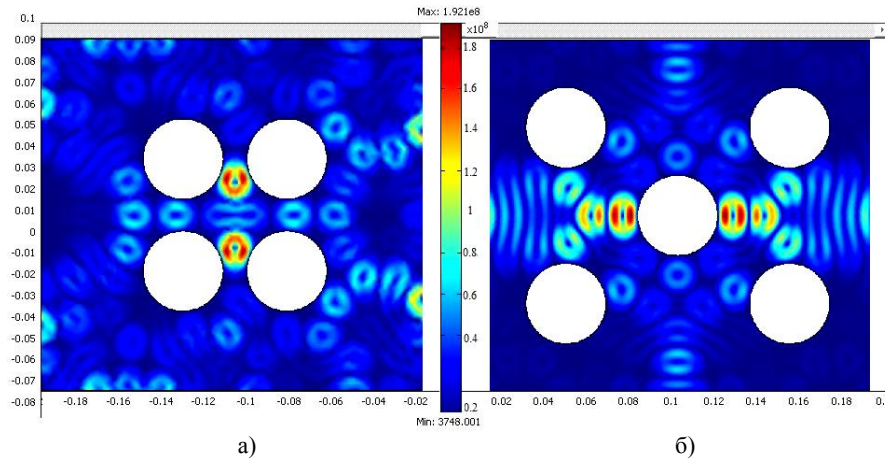


Рис. 1. Распределение УЗ-давлений по площади ванны:

а – линейное расположение излучателей; б – в узлах решетки треугольной структуры

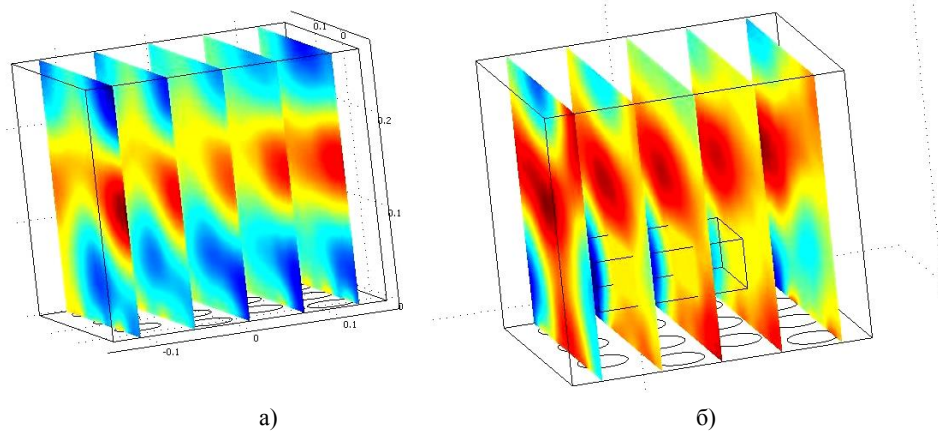


Рис. 2. Распределение УЗ-давлений в объеме ванны:

а – без кассеты; б – с кассетой

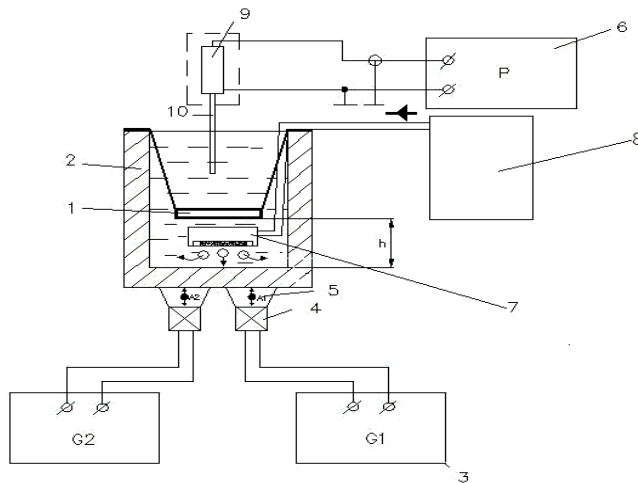


Рис. 3. Схема УЗ-очистки с газовой активацией:
 1 – очищаемая деталь; 2 – ванна; 3 – генератор; 4 – преобразователь;
 5 – излучатель; 6 – индикатор кавитационного давления;
 7 – фильтр; 8 – компрессор; 9 – датчик пьезоэлектрический;
 10 – волновод приемный

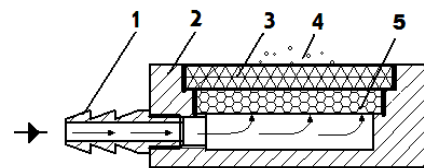


Рис. 4. Фильтр для создания пузырьков:
 1 – штуцер; 2 – корпус; 3 – фильтрующая пластина
 с размерами отверстий 2...5 мкм;
 4 – газовые пузырьки; 5 – фильтрующая пластина
 с размерами отверстий 100...200 мкм

Для улучшения процесса газовой активации целесообразно подавать на фильтр УЗ-колебания, что диспергирует воздушные пузырьки в жидкую среду.

Токовая активация. Для повышения эффективности очистки жидкости между излучателем УЗ-колебаний и обрабатываемым изделием или деталью пропускали электрический ток с помощью внешнего источника, достаточный для выделения газовых пузырьков размером 50...100 мкм, которые являются зародышами кавитации. В результате увеличивается интенсивность кавитационных процессов, что ускоряет процесс разрушения жировых пленок на поверхности детали и повышает качество очистки за счет более равномерного распределения зародышей кавитации по всей обрабатываемой поверхности. При обработке поверхности детали большой площади и для повышения равномерности обработки минус от внешнего источника подключали на деталь, а плюс – на излучатель. В полярных жидкостях (водные растворы) ускоряется миграция ионов водорода к обрабатываемой поверхности. Отдавая положительный заряд, ионы выделяются в виде газовых пузырьков атомарного водорода, являющихся зародышами кавитации (рис. 5). Очищаемую деталь погружают в жидкость на расстояние h от дна ванны и с помощью провода подключают к одному из полюсов внешнего источника тока. Другой полюс источника соединяют с ванной.

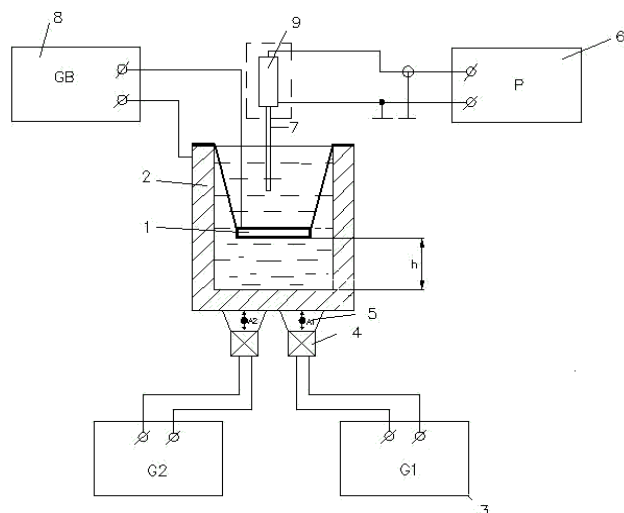


Рис. 5. Схема УЗ-очистки с токовой активацией:

- 1 – очищаемая деталь; 2 – ванна; 3 – генератор;
- 4 – преобразователь; 5 – излучатель;
- 6 – индикатор кавитационного давления; 7 – волновод приемный;
- 8 – источник тока; 9 – датчик пьезоэлектрический

При подаче электрических колебаний УЗ-частоты от генератора на преобразователь в последнем возбуждаются механические колебания той же частоты амплитудой A_1 , которые через излучатель диафрагменного типа передаются в ванну. Под действием постоянного электрического тока в направлении от излучателя к обрабатываемой детали в жидкости происходит перемещение ионов водорода, их восстановление, образование газовых зародышей кавитации, что и ускоряет процесс УЗ-очистки.

В случае необходимости локальной и более производительной обработки минус от внешнего источника подключают к излучателю УЗ-колебаний, а плюс – на деталь. В этом случае ионы водорода устремляются к излучателю,

восстанавливаются в виде газовых пузырьков. Вблизи поверхности излучателя ввиду значительных амплитуд колебаний происходит быстрый рост пузырьков до критических размеров и их захлопывание, что сопровождается интенсивными кавитационными явлениями. Величина пропускаемого тока через жидкость зависит от степени ее полярности, размеров обрабатываемой детали.

Результаты исследований и их обсуждение. В качестве показателя неравномерности кавитационного поля использовалось среднеквадратичное отклонение кавитационного давления по площади и глубине ванны, выраженное в процентах. Площадь ванны разбивалась на участки, в пределах каждого участка проводилось измерение кавитационного давления в пяти точках – в центре и по углам.

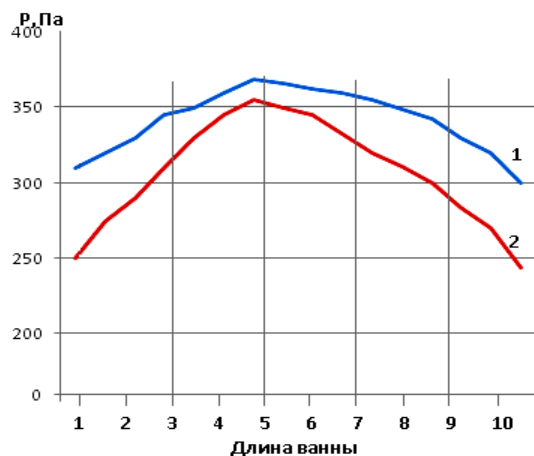


Рис. 6. Распределение давлений при газовой активации:

- 1 – с газовой активацией; 2 – без активации

При газовой активации наибольшее увеличения кавитационного давления (на 40...50 Па) достигнуто при расположении фильтра вдали от излучателей (рис. 6). При расположении фильтра над излучателями давление увеличивается незначительно (на 10...30 Па).

Токовая активация проводилась при плотностях тока от 22 до 30 А/м². Наилучшие показатели достигнуты при плотности тока 25 А/м², когда кавитационное давление увеличилось от 70 до 150 Па (рис. 7).

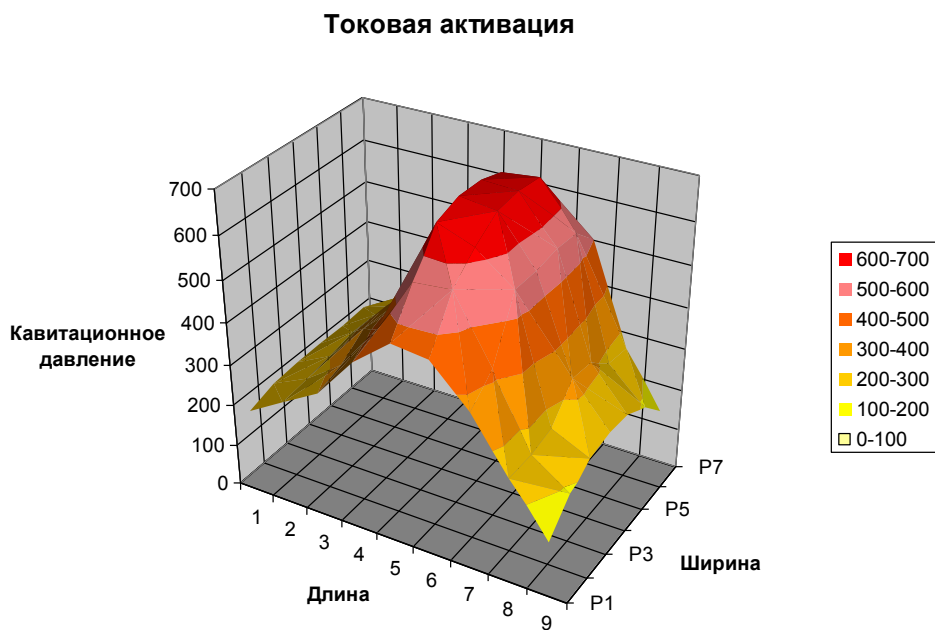


Рис. 7. Распределение УЗ-давлений по объему ванны при токовой активации

В УЗ-ваннах очистки наибольшее кавитационное давление (300...350 Па) создается в водных растворах поверхностно-активных веществ с концентрацией до 3 % в объеме жидкой среды между преобразователями, т.е. наилучшая очистка будет происходить примерно на середине ванны. При частотной модуляции УЗ-сигнала поле давлений распределилось от 60 до 525 Па, а при токовой активации кавитационное давление повысилось на 70...120 Па, т.е. на 25...30 %. Повышение кавитационного давления при токовой активации способствует ускорению процесса удаления загрязнений в 1,5...1,7 раза.

Выводы

1. Моделирование УЗ-давлений в жидкой среде показало, что распределение давлений по площади и объему ванны существенно зависит от расположения излучателей ультразвука и деталей в ванне. Наилучшие результаты получены при расположении излучателей в шахматном порядке, а деталей – на высоте, равной длине волны. В этом случае неравномерность распределения УЗ-давлений по площади и объему ванны не превышает 10 %.

2. В УЗ-ваннах оптимальная кавитационная область с давлением 300...350 Па создается в водных растворах поверхностно-активных веществ с концентрацией до 3 % в объеме жидкой среды при частотной модуляции УЗ-сигнала.

3. Газовая активация жидкой среды при УЗ-обработке увеличивает интенсивность кавитации в рабочей зоне в среднем на 10...20 %, а токовая активация – на 25...30 %, что позволяет сократить время обработки деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Savage, T. Ultrasonic cleaning in industry / T. Savage // Wire Industry. – 2005. – № 6. – P. 424 – 426.
2. Грачев, А. Особенности ультразвуковой очистки печатных узлов при поверхностном монтаже / А. Грачев // Chip News. Инженерная микроэлектроника. – 2004. – № 10. – С. 50 – 53.
3. Основы физики и техники ультразвука / Б.А. Агранат [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
4. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электроники / С.П. Кундас [и др.]. – Минск: Бест-принт, 2002. – 404 с.
5. Ланин, В.Л. Массоперенос в жидких средах при совместном воздействии ультразвуковых и электрических полей / В.Л. Ланин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 4. – С. 117 – 121.
6. Morse, P.M. Theoretical Acoustics / P.M. Morse, K.U. Ingard. – N.Y.: Princeton Univ. Press, 1986. – 928 p.

Поступила 14.07.2008