

УДК 534.8: 621.396.6

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В.С. ТОМАЛЬ

РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника»
Филимонова, 25, Минск, 220114, Беларусь

Поступила в редакцию 24 января 2012

Для повышения эффективности ультразвуковой очистки в ваннах с распределенными преобразователями необходимо обеспечить оптимальное кавитационное давление, концентрацию ПАВ, температурные режимы в моющих средах, а также величину ультразвукового давления.

Ключевые слова: очистка, технология, ванны, ультразвук.

Проблемы очистки электронно-оптических изделий

Высокое качество электронно-оптических изделий во многом определяет качество того оборудования, в котором они используются – электронных систем, медицинской аппаратуры, кино-фотоаппаратуры и контрольно-измерительных комплексов. В самих приборах большое значение имеет чистота поверхности отдельных деталей и узлов. При любой точности обработки минимальное количество посторонних веществ на оптических поверхностях не позволяет получить требуемые оптические характеристики, что ведет к увеличению брака, отказам приборов и аппаратуры в процессе эксплуатации, увеличению вероятности получения недостоверных данных [1].

Очистка электронных изделий после пайки – заключительная операция, ответственная за полную удаленность всех загрязнений, сопровождающих производство печатных плат, хранение, сборку и пайку. Поэтому очистка должна удалять загрязнения всех типов: очистки солей электролитов, травящих растворов, флюсов, активаторов флюсов, жировые отпечатки пальцев, пыль, абразивные частицы. Некачественная очистка изделий при их эксплуатации или хранении приводит к снижению сопротивления изоляции, физическому разрушению проводников в результате коррозии, сами продукты коррозии могут привести к утечке тока, нарушению влагозащитного покрытия и т.д. [2]. Все это приводит к снижению показателей надежности изделий.

При поверхностном монтаже компонентов, когда, с одной стороны, повышается плотность размещения компонентов, контактных площадок, печатных проводников, а с другой – критическими становятся проблемы влияния остаточных флюсов, коррозии проводников, брака изоляции, повышаются требования к чистоте поверхности изделий, поэтому операции их очистки после пайки усложняются [3].

Для возбуждения УЗ-колебаний в ваннах очистки используют различное число пакетных пьезоэлектрических преобразователей мощностью (50–100 Вт), закрепленных на боковых стенках и днище ванны в определенном порядке, с параллельным их подключением к генератору [4]. В этом случае эффективность и устойчивость работы преобразователей зависит от ширины рабочей полосы частот, что позволяет перекрывать амплитудно-частотные характеристики отдельных преобразователей и компенсировать неизбежный разброс их собственных резонансных частот.

Развитие технологии УЗ-очистки за последние десятилетия показало, что наиболее производительным является групповой способ обработки мелких изделий, уложенных в кассеты или корзины в УЗ-ваннах. Воздействие 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, давления в которых могут достигать $(1-5) \cdot 10^8$ Па. Такие микроудары разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности изделий, но и в определенной степени изменяют морфологию поверхности. Возникающие микро- и макропотоки способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефной поверхности. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты, возникновение микро- и макропотоков, определяют интенсификацию процесса удаления загрязнений со сложно профилированных поверхностей изделий под действием УЗ-поля [5].

Таким образом, одной из главных проблем при УЗ-очистке электронных и оптических изделий в УЗ-технологических системах с распределенными преобразователями, является получение равномерной кавитационной области в технологическом объеме УЗ-ванны.

Моделирование ультразвукового давления в ваннах очистки

Влияние ультразвука на процесс очистки основано, главным образом, на действии переменных давлений, возникающих в жидкой среде при воздействии УЗК, а также кавитационных процессов в жидкой среде. В том случае, если источником колебаний служит плоский источник, распределение переменных давлений и скоростей в ванне зависит от трех координат (x , y , z) и имеет весьма сложный характер. При работе плоского источника колебаний, встроенного в дно ванны, в колебаниях принимают участие и стенки: следовательно, прилегающие слои жидкости колеблются не только в вертикальной, но и горизонтальной плоскости. Кроме того, у стенок ванн всегда имеется градиент скоростей, так как слои жидкости вследствие трения о твердые тела движутся с меньшими скоростями.

Считая стенки достаточно массивными и пренебрегая их колебаниями, а также градиентом скоростей, для середины достаточно большой ванны можно принять ультразвуковое поле плоскопараллельным при относительно малых удельных интенсивностях. Необходимо также учитывать искажение плоскопараллельного поля вследствие кавитации. Математические трудности, связанные с изучением УЗ-поля при кавитации, до настоящего времени еще не преодолены, поэтому представляется возможным только приближенное математическое решение задачи.

Распространение УЗ-волн в среде описывается волновым уравнением [6]:

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

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

Для решения волнового уравнения задавались следующие граничные условия:

- на границах ванны:

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

- на ультразвуковых излучателях, обозначенных литерой A (рис. 1):

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

- на ультразвуковых излучателях, обозначенных литерой B :

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

- на ультразвуковых излучателях, обозначенных литерой C :

$$P_B = p_0 \sin(\omega t + 2/6 \pi) + p_0 \sin([\omega - 100]t + 2/6 \pi) + p_0 \sin([\omega + 100]t + 2/6 \pi).$$

В начальный момент времени полагалось равенство давления нулю давления жидкости: $p(x, y, z) = 0$. Задавая граничные условия для системы излучателей A , B и C , расположенных на дне ванны, получена объемная картина распределения УЗ-давления в ванне.

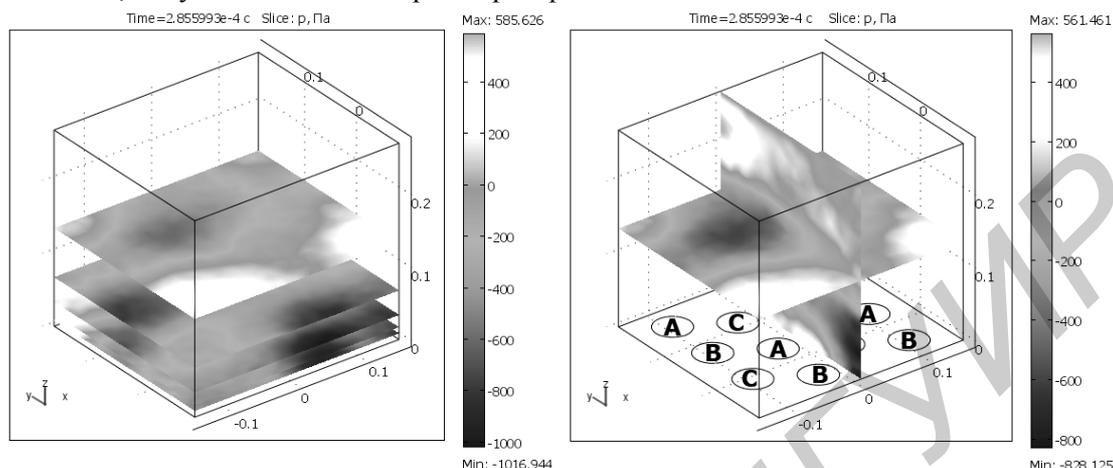


Рис. 1. Распределения УЗ давления в плоскостях и объеме ванны

В результате моделирования определены области наибольшего акустического давления, расположенные на расстояниях от плоскости излучения, кратных $n\lambda/4$, где возникают вихревые макро- и микропотоки (шлихтинговского или рэлеевского типа), которые интенсифицируют процессы массопереноса и растворения загрязнений.

Исследования равномерности ультразвукового поля в ваннах

Качество ультразвуковой очистки электронно-оптических деталей в значительной степени зависит от величины кавитационного давления и равномерности его распределения в рабочем объеме моющей среды, которые, в свою очередь, зависят от выбора технологических режимов. Величина кавитационного давления измерялась с помощью прибора, принцип действия которого основан на измерении спектра мощности кавитационного шума [4]. В качестве показателя неравномерности кавитационного поля использовалось среднее квадратическое отклонение кавитационного давления по площади (глубине), в зависимости от показателя в центре ванны, выраженное в процентах.

На рис. 2,а представлена зависимость неравномерности распределения кавитационного давления по площади ванн от расстояния до дна и числа работающих пьезокерамических преобразователей ПП (кривая 1 – 12 ПП, кривая 2 – 10 ПП, кривая 3 – 8 ПП, кривая 4 – 6 ПП, кривая 5 – 4ПП). С удалением от излучающей поверхности (дна ванны) равномерность распределения кавитационного давления повышается и достигает максимального значения в центральной области ванны. Высокая неравномерность распределения кавитационного давления в непосредственной близости от излучающей поверхности объясняется неравномерностью распределения звукового давления в ближнем поле. Поскольку преобразователи возбуждаются амплитудно-модулированным сигналом с синусоидальной модуляцией, спектр излучаемых колебаний содержит три частоты: ω , $\omega + \Omega$ и $\omega - \Omega$, где ω – частота УЗ-колебаний (44 кГц), а Ω – частота модуляции (100 Гц). В результате сложения этих волн с отраженными от стенок и поверхности жидкости волнами, возникает сложная интерференционная картина. С увеличением количества работающих преобразователей неравномерность распределения звукового давления растет. Однако благодаря тому, что прямые и отраженные амплитудно-модулированные волны обладают малой степенью когерентности, отсутствуют области с максимальным и минимальным давлением, что позволяет получить высокую равномерность воздействия УЗ-колебаний на очищаемое изделие в центре ванны. Учитывая такой характер распределения кавитационного давления, очищаемые изделия необходимо располагать на расстоянии не ближе $1,5-2,0 \lambda$ от дна ванны. Для частоты 44 кГц это расстояние составляет 50–70 мм.

В водных растворах с поверхностно активными веществами (ПАВ) с содержанием до 1,2 % (рис. 2,б) кавитационное давление ниже, так как ПАВ уменьшают силу поверхностного натяжения, что приводит к снижению порога кавитации и уменьшению скорости захлопывания кавитационных пузырьков, и, следовательно, к снижению микроударного действия кавитации.

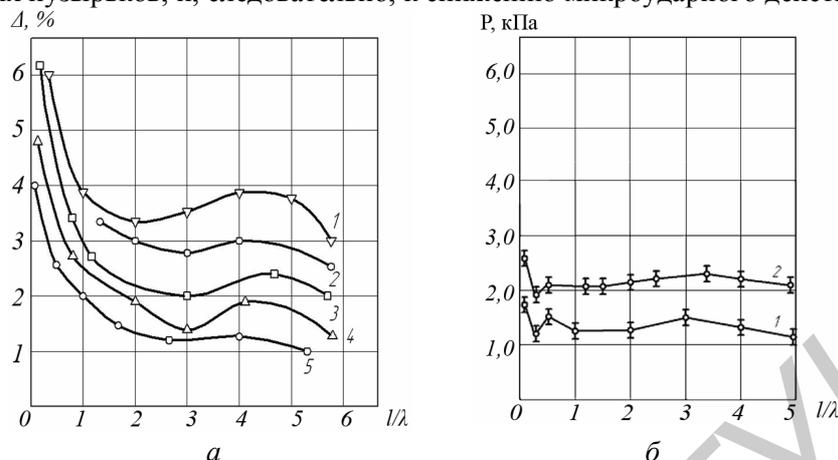


Рис. 2. Зависимость неравномерности распределения кавитационного давления по площади ванн (а) от соотношения расстояния до дна к длине волны: 1 – 12 ПП, 2 – 10 ПП, 3 – 8 ПП, 4 – 6 ПП, 5 – 4 ПП и по глубине (б): 1 – в ванне с ПАВ, 2 – в ванне с дистиллированной водой

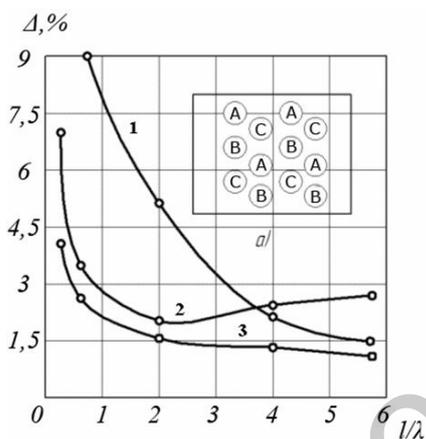


Рис. 3. Топология расположения УЗ-преобразователей на дне ванны и неравномерность распределения кавитационного давления по площади ванны в зависимости от расстояния до дна и количества работающих преобразователей: 1 – преобразователи каналов А, В, С, 2 – преобразователи каналов А, В, 3 – преобразователи канала А

Аналогичный характер изменения кавитационного давления по глубине наблюдается и в других ваннах аналогичной конструкции. На рис. 3,а приведена схема расположения УЗ преобразователей на дне ванны, а на рис. 3,б – зависимость неравномерности распределения кавитационного давления по площади ванны от расстояния до ее дна и количества работающих преобразователей. Обозначения внутри кружков А, В, С соответствуют каналам УЗ-генератора, к выходу которого подключены преобразователи. По мере приближения к поверхности моющей среды неравномерность распределения кавитационного давления по площади ванны уменьшается. Неравномерность распределения кавитационного давления по глубине составляет 5,4%.

При отключении канала С кавитационное давление УЗ-генератора уменьшается всего на 2 дБ, однако резко возрастает неравномерность его распределения (кривая 2 рис. 3,б), как по площади, так и по глубине. Неравномерность распределения кавитационного давления по глубине увеличивается до 13,4%. Увеличение неравномерности распределения кавитационного давления в объеме моющей среды объясняется, во-первых, смещением геометрического центра излучения преобразователей по отношению к геометрическому центру ванны, во-вторых – нарушением симметрии фазового сдвига между выходными сигналами каналов УЗ-генератора. При отключении каналов В и С уровень кавитационного давления УЗ-генератора уменьшается на 7 дБ, а неравномерность его распределения по площади уменьшается по сравнению с предыдущим случаем (кривая 3) и составляет 11,4%. Повышение равномерности распределения кавитационного давления по площади ванны объясняется восстановлением геометрической симметрии в расположении работающих преобразователей, а также восстановлением синфазности излучаемого сигнала, т.к. в этом случае все четыре работающих преобразователя подключены к выходу одного канала генератора. Таким образом, отключение отдельных групп преобразователей может привести к существенному нарушению равномерности кавитационного давления в объеме моющей среды и к снижению качества очистки.

Зависимость распределения кавитационного давления по глубине обусловлена нелинейным характером распределения интенсивных УЗ-волн. В непосредственной близости от излучающей поверхности ($0 < l < \lambda/4$) превалирует процесс поглощения энергии интенсивной звуковой волны вследствие необратимых процессов, обусловленных вязкостью и теплопроводностью среды, за счет конструктивного расположения нагревателей в нижней части ванны. Однако, по мере распространения интенсивной УЗ-волны, искажается ее форма, что приводит к расширению ее спектрального состава и увеличению амплитуды высокочастотных составляющих спектра, что обуславливает увеличение кавитационного давления в области $l > \lambda/4$.

Сложным образом на качество ультразвуковой очистки оптических деталей влияет температура, так как она оказывает влияние как на акустические эффекты, так и на процессы растворения. Влияние температуры на величину кавитационного давления и равномерность его распределения в объеме моющей среды исследовалось в ваннах, заполненных различными моющими средами. На рис. 4 приведены зависимости кавитационного давления от температуры среды и ее вида.

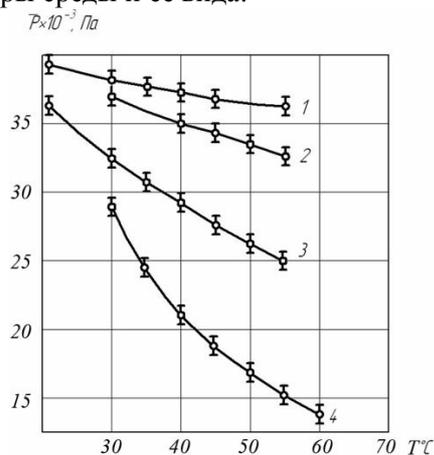


Рис. 4. Зависимости кавитационного давления от температуры моющей среды и ее вида: 1 – в ванне с водопроводной водой, 2 – в ванне с деионизованной водой, 3 – в ванне с раствором ПАВ с концентрацией 1,5%, 4 – в ванне с раствором ПАВ с концентрацией 3%

устанавливать такие температурные режимы, при которых эффективность воздействия ультразвуковых колебаний и эффективность ПАВ будут оптимальными. При ультразвуковой очистке оптических деталей оптимальная температура моющих сред на основе водных растворов ПАВ лежит в пределах 30–50°.

Заключение

В результате исследований влияния технологических режимов на величину кавитационного давления и неравномерность его распределения в объеме моющей среды установлено, что наилучшая зона расположения очищаемых деталей находится на расстоянии $1,5\lambda-4\lambda$ от излучающей поверхности, оптимальная температура в растворах ПАВ составляет 30–50°С, величина кавитационного давления меньше чем в чистой воде, а равномерность его очистки обеспечивает высокую равномерность воздействия УЗ-колебаний на очищаемые изделия и, следовательно, высокое качество очистки.

THE CHOICE OF OPERATING PRACTICES OF ULTRASONIC CLEANING OF ELECTRON-OPTICAL PRODUCTS

V.S. TOMAL

Abstract

In order to increase the efficiency of ultrasonic clearing in baths with the distributed converters, there should be provided optimal cavitation pressure, concentration surface acoustic wave (SAW), temperature conditions in detergent environments and the value of ultrasonic pressure.

Список литературы

1. Касинский Н.К., Лысянный Ю.К., Томаль В.С. // Техника. Экономика. Организация. 2001. №4. С. 2–4.
2. Savage T. // Wire Industry. 2005. №6. P. 424–426.
3. Ларин В.П., Лучкова Л.В. // Приборы и системы управления. 1991. №8. С. 43–44.
4. Кундас С.П., Ланин В.Л., Тявловский М.Д. и др. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Минск, 2003.
5. Томаль В.С. // Доклады БГУИР. 2007. №1. С. 40–45.
6. Morse P.M., Ingard K.U. Theoretical Acoustics, Princeton Univ. Press, 1986.