

Технология и оборудование ультразвуковой очистки изделий электроники

Экологические проблемы в электронике вызвали повышенный интерес к процессам и устройствам ультразвуковой очистки электронных и электронно-оптических изделий. Для удаления стойких загрязнений с поверхностей изделий необходимо создать направленные акустические течения в жидкой среде и обеспечить равномерность кавитационного поля в ультразвуковой ванне.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.unibel.by

Владимир Томаль

os_vt@mail.belpak.by

Экологические проблемы очистки

Анализ причин отказов изделий электроники показывает, что их четвертая часть приходится на долю плохого качества очистки поверхностей [1]. Моющими веществами в электронике всегда были органические растворители. Ручная очистка приводила к значительному количеству брака, травматизму, выбросам паров растворителей в атмосферу и загрязнению окружающей среды. Общеизвестен основной недостаток спиртов: их пожаро- и взрывоопасность. Хлорированные углеводороды токсичны, обладают канцерогенным и мутагенным действием, образуют смог и требуют утилизации отходов методом захоронения. Хладоны разрушают озоновый слой и усиливают парниковый эффект. Поэтому актуальна проблема создания новых безопасных моющих композиций, экологически безопасных технологических процессов и оборудования для очистки изделий.

Альтернатива органическим растворителям и хладонам — это ультразвуковая (УЗ) очистка в водных растворах поверхностно активных веществ (ПАВ). 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 [2]. Возникающие микро- и макропотоки способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефных поверхностей. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты интенсифицируют процесс удаления загрязнений с поверхностей деталей и изделий под действием УЗ-поля. Использование рабочих частот в диапазоне 80–120 кГц обеспечивает неразрушающую очистку и удаление загрязнений размером до 1 мкм с микрорельефных поверхностей [3].

Основным преимуществом УЗ-очистки перед другими известными методами удаления загрязне-

ний является высокая производительность, сочетающаяся с хорошим качеством очистки изделий от любых поверхностных пленок. Развитие технологии УЗ-очистки и обезжиривания поверхностей изделий за последние десятилетия показало, что наиболее производителен групповой способ обработки мелких изделий, уложенных в кассеты или корзины. Для обеспечения высокого качества очистки необходимо создать направленные акустические течения и обеспечить равномерность распределения интенсивности УЗ-поля в объеме жидкости.

Процессы и установки ультразвуковой очистки

Разрушение поверхностных пленок загрязнений в жидкости происходит в результате кавитации и направленных акустических течений, причем основной вклад дает кавитация. В связи с этим обоснована необходимость обеспечения равномерности кавитационной области. Однако распределение кавитационных пузырьков в этой области в большинстве случаев неравномерно. В жидкой среде количество таких пузырьков существенно превышает число их зародышей. Вокруг захлопывающегося пузырька идет процесс размножения зародышей, в результате чего появляются скопления пузырьков той или иной формы. Наличие таких скоплений существенно нарушает равномерность распределения пузырьков: в скоплениях число их велико, а в пространстве между скоплениями мало. В жидкой среде можно наблюдать скопления кавитационных пузырьков, имеющих форму макропотока, исходящего из одной точки. Конфигурация макропотока существенно меняется при незначительном изменении рабочей частоты, что связано с интерференционной структурой ближнего поля излучателя.

Таким образом, существует проблема получения в технологическом объеме ванн очистки равномерной кавитационной области. В часто используемых конструкциях дном ванны служит излучающая диафрагма магнитострикционного преобразователя типа ПМС-6-22. Распределение акустического давления, создаваемого такими системами, крайне нерав-

номерно — до 50%. В центре ванны над диафрагмой давление принимает максимальное значение и уменьшается к краю мембраны. Иногда для обеспечения равномерности УЗ-поля на большой площади используют изгибно-колеблющуюся диафрагму, возбуждаемую системой распределенных магнитострикционных преобразователей, припаянных попарно в пучностях изгибных колебаний пластины. Такую конструкцию имеет преобразователь ПМС-38. Однако распределение акустического давления в жидкой среде над такой системой имеет максимумы и минимумы, а сборка и настройка таких систем чрезвычайно сложна.

При УЗ-очистке электронных и оптико-электронных изделий основным требованием, предъявляемым к УЗ-технологическим системам, является высокая равномерность воздействия УЗ-колебаний на изделия. Поэтому для возбуждения УЗ-колебаний используют различное число пакетных пьезоэлектрических преобразователей (ППП) 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 полосы преобразования, поскольку в большей степени перекрываются АЧХ отдельных преобразователей, что позволяет скомпенсировать неизбежный разброс их собственных резонансных частот.

По сравнению с линейным расположением ППП более перспективна модульная система распределенных ППП, установленных в шахматном порядке таким образом, что если мысленно провести прямые через их центры, то образуется решетка треугольной структуры с длиной стороны, кратной

$$(n \times \lambda) / \sqrt{3},$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$; λ — длина УЗ-волны в жидкой среде [5] (рис. 1). Такое расположение преобразователей создает равномерное по площади УЗ-поле при трехфазном возбуждении за счет суперпозиции волн, излучаемых ППП, которые подключены к разным каналам УЗ-генератора.

Расстояние между центрами в группе кратно длине волны λ распространяющихся в жидкости УЗ-волн. ППП в каждой группе электрически соединены параллельно и подключены к соответствующим каналам А, В или С модульного УЗ-генератора (рис. 2).

Канал представляет собой транзисторный автогенератор, выполненный по полумостовой схеме с индуктивной обратной связью по току, работающий в ключевом режиме. Блок питания каждого канала собран по двухполупериодной схеме выпрямления без фильтрации, за счет чего осуществляется амплитудная и частотная модуляция выходного сигнала частотой 100 Гц. При этом выходной сигнал канала представляет собой сумму трех гармонических колебаний с основной частотой ω и боковыми частотами $(\omega+100)$ и $(\omega-100)$ Гц. Поскольку автогенераторы питаются пульсирующим напряжением, то наблюдается эф-

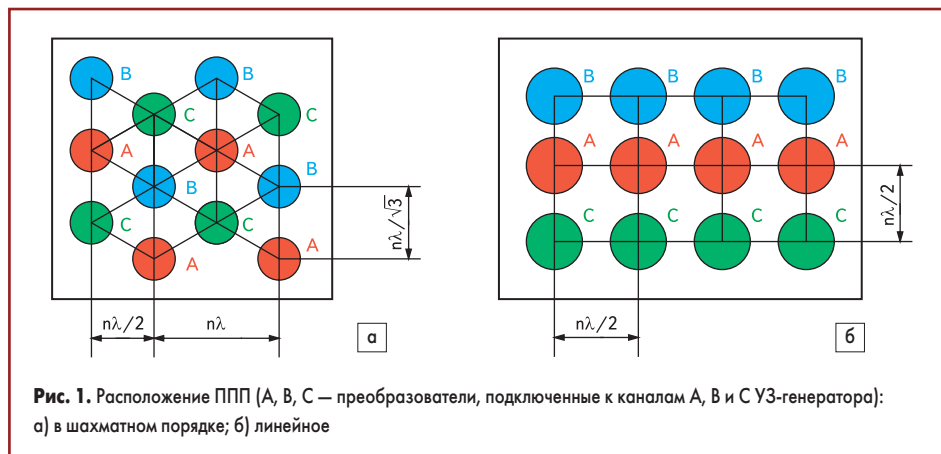


Рис. 1. Расположение ППП (А, В, С — преобразователи, подключенные к каналам А, В и С УЗ-генератора): а) в шахматном порядке; б) линейное

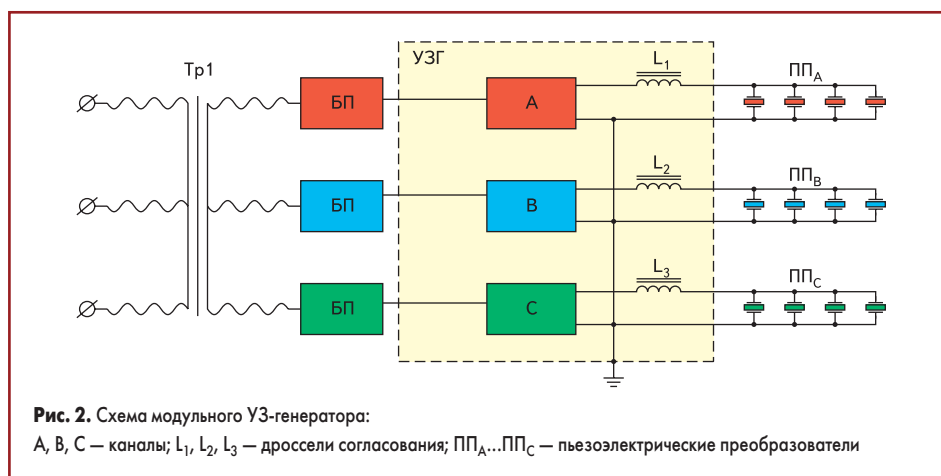


Рис. 2. Схема модульного УЗ-генератора: А, В, С — каналы; L_1, L_2, L_3 — дроссели согласования; ПП_А...ПП_С — пьезоэлектрические преобразователи

фект периодического качания частоты, что дополнительно способствует усреднению ближнего поля в результате периодического изменения интерференционной картины. Полные входные сопротивления групп преобразователей образуют вместе с компенсирующими индуктивностями резонансные контуры, определяющие рабочую частоту соответствующих каналов генератора. В связи с этим все изменения технологических условий (температуры и состава раствора), а также внесение кассеты с деталями в ванну приводят к изменению полного входного сопротивления преобразователя, а значит, и к изменению частоты генерируемых колебаний.

Выпрямители блоков питания каналов через понижающие трансформаторы подключены к соответствующим фазам трехфазной сети переменного тока, в результате чего сигналы на выходе каналов сдвинуты по фазе на 120° , а на преобразователи поступают группы импульсов УЗ-колебаний, сдвинутые по фазе на тот же угол (рис. 3). Область наибольшего акустического давления, соответствующая максимальному напряжению на преобразователе, последовательно перемещается от преобразователя А к В и от В к С (или наоборот при перефазировке каналов) в каждой группе. В результате возникают направленные потоки жидкости из зоны большего акустического давления в зону меньшего давления.

Так как движение областей происходит со сравнительно низкой частотой (100 Гц), то в жидкой среде с определенной вязкостью возникают вихревые макропотоки, которые наряду с микропотоками, возникающими

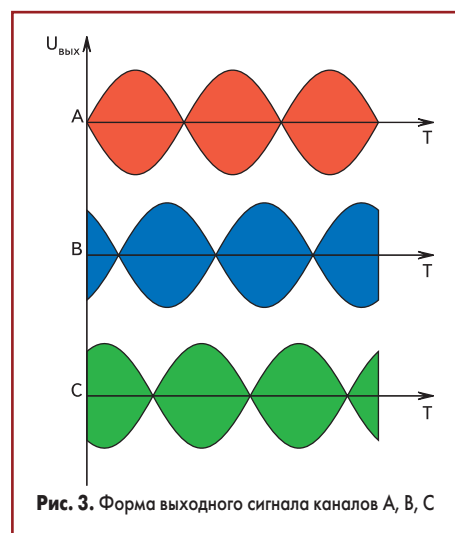


Рис. 3. Форма выходного сигнала каналов А, В, С

в вязком пограничном слое вблизи препятствий, интенсифицируют процессы массопереноса и растворения загрязнений.

УЗ-установки для процессов удаления загрязнений включают различные по конструкции ванны, которые используют для очистки как в непроточных средах на основе водных растворов ПАВ, так и в проточной воде. Ванны для очистки в проточных (рис. 4а) и непроточных и моющих средах (рис. 4б) отличаются тем, что первые оснащены переливным карманом. Для повышения эффективности обмена моющей среды в рабочем объеме ванны подачу свежих порций раствора необходимо осуществлять противотоком сверху и снизу ванны через ряд отверстий небольшого диаметра (3–6 мм). Верхний ряд отверстий

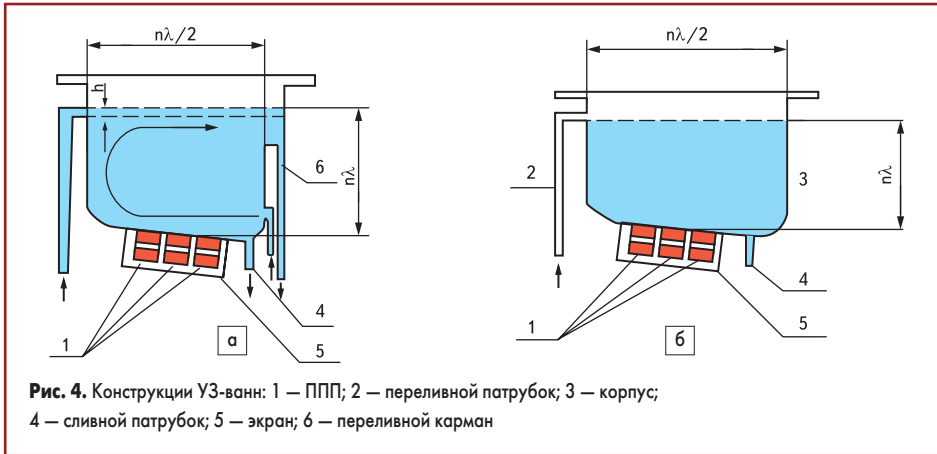


Рис. 4. Конструкции УЗ-ванн: 1 — ППП; 2 — переливной патрубком; 3 — корпус; 4 — сливной патрубком; 5 — экран; 6 — переливной карман

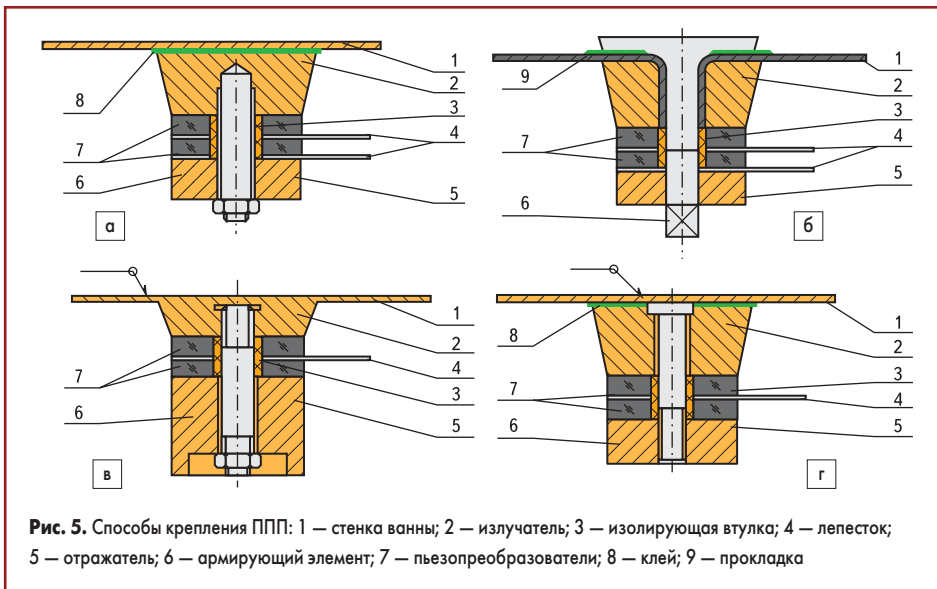


Рис. 5. Способы крепления ППП: 1 — стенка ванны; 2 — излучатель; 3 — изолирующая втулка; 4 — лепесток; 5 — отражатель; 6 — армирующий элемент; 7 — пьезопреобразователи; 8 — клей; 9 — прокладка

должен быть затоплен на глубину $h = 8-15$ мм. Такая конструкция ванны для очистки в проточной среде обладает большой равномерностью распределения кавитационного давления, поскольку моющие потоки имеют практически ламинарный характер.

Емкость ванны выбирается в зависимости от габаритных размеров обрабатываемой детали или при групповой очистке в зависимости от заданной производительности установки и необходимого времени очистки в каждой ванне. Основное требование, которое необходимо выполнять для обеспечения равномерного воздействия УЗ-колебаний на объект очистки — кратность линейных размеров ванны в поперечном сечении $\lambda/2$ (оптимальная высота уровня моющей среды кратна λ).

Ответственный момент при проектировании УЗ-ванн — выбор способа крепления ППП к ванне, так как это определяет долговечность ванны и эффективность ее работы. ППП могут быть закреплены на стенках ванны с помощью эпоксидного компаунда (рис. 5а), механически (рис. 5б), сваркой (рис. 5в), а также комбинированным способом (рис. 5г). Наиболее технологичен комбинированный способ, который не создает зон скопления загрязнений и обеспечивает наиболее полную передачу УЗ-колебаний в моющую среду. Поскольку в этом случае стягивающая шпилька приварена к стенке ванны, клеевой шов механически разгружен.

Стенки ванн, на которых установлены преобразователи, могут совершать изгибные колебания, нарушающие равномерность распределения энергетических характеристик акустического поля. Из теории акустического поля, которое создают изгибно-колеблющиеся упругие пластины, известно, что такие пластины практически не излучают энергии, если длина изгибной волны меньше длины ультразвуковой волны в окружающей среде.

Этот феномен называется акустическим коротким замыканием, и такая пластина аналогична идеальному жесткому экрану [5]. Скорость распространения изгибных волн в пластине определяется выражением:

$$C_{изз} = 4 \sqrt{\frac{\pi^2 E}{3\rho(1-G^2)}} \sqrt{d \times f}, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга, ρ — плотность материала пластины, G — коэффициент Пуассона, d — толщина пластины, f — частота колебаний.

Тогда критерий выбора оптимальной толщины стенок ванны или погружной акустической системы будет иметь вид:

$$d_{онм} \leq \frac{C_{изз}^2}{\pi \times f} \sqrt{\frac{3\rho(1-G^2)}{E}}. \quad (2)$$

В тех случаях, когда по условиям прочности толщина стенок ванны должна быть больше

$d_{онм}$, преобразователи необходимо устанавливать на отдельных съемных панелях или использовать погружные акустические системы.

Как правило, УЗ-ванны изготавливают из коррозионно-стойких высоколегированных хромоникелевых сталей марок 12Х18Н10Т, Х18Н9Т или титановых сплавов марок ВТ-3, ВТ-41, которые обладают высокой химической и кавитационной стойкостью. Хромоникелевые стали обладают хорошей пластичностью при холодном деформировании и удовлетворительной свариваемостью, что облегчает качественное изготовление ванн, имеющих форму любой степени сложности. Кроме того, они значительно дешевле титановых сплавов и характеризуются большими колебательными скоростями, а это при постоянном сопротивлении излучения позволяет получать более высокие значения звукового давления в моющей среде.

Для повышения эрозионно-кавитационной стойкости ванн и эффективности преобразования электрической энергии в акустическую внутренние поверхности стенок ванн полируют, поскольку дефекты на излучающей поверхности являются стабильными центрами адгезии молекул воздуха, которые могут действовать как зародыши кавитации. Шероховатость излучающей поверхности приводит к уменьшению порогового значения колебательной скорости, при которой в моющей среде начинает развиваться кавитация, что снижает эффективность преобразования электрической энергии в акустическую и эффективность установки в целом.

УЗ-ванны фирмы Elmasonic (рис. 6) имеют объем от 82 до 180 л, подогрев жидкости — от 30 до 80 °С, мощность излучателей — от 1,8 до 3,2 кВт.



Рис. 6. УЗ-ванны: TI-N-80 (сверху) и TI-N-160 (снизу)

Кавитационные поля в ультразвуковых ваннах

Для оценки интенсивности кавитации в жидких средах используют методы, основанные на сравнении параметров образцов до и после воздействия на них кавитации; регистрации температурных полей или специальной обработке возникающих акустических сигналов в зоне обработки.

С помощью тестовых образцов, закрепляя их в определенном месте рабочего объема и сохраняя время выдержки постоянным, можно количественно исследовать зависимость эрозии от свойств жидкости и параметров УЗ-поля, однако ошибка при исследовании кавитационной области составляет до 25%. Малая точность метода объясняется неоднородностью кавитационной области, изменением ее расположения в объеме жидкости и другими случайными факторами.

Оценка эрозионной активности кавитационной области значительно облегчается, если в качестве образца используют тонкую алюминиевую фольгу толщиной 0,05 мм. Эрозионную активность оценивают по степени разрушения фольги, помещаемой в УЗ-ванну параллельно поверхности излучателя на расстоянии 5–10 мм до излучателя. После испытаний фольгу высушивают на воздухе и определяют площадь разрушений емкостным методом. Недостатки метода заключаются в длительности измерений и отсутствии непрерывного контроля процесса кавитации.

Кавитационное поле в жидкостях имеет сложный спектральный состав, поскольку в случайные моменты времени возникает и захлопывается множество пузырьков и вызванное ими акустическое излучение проявляется в виде широкополосного шума со спектром в полосе от нескольких сотен Гц до сотен кГц. На фоне сплошного спектра кавитационного шума наблюдаются отдельные дискретные субгармонические компоненты, отражающие частотный спектр поля, что является характерным признаком кавитации и используется для регистрации ее возникновения [6].

Спектральный анализ формы сигналов путем разложения в ряд Фурье позволил выделить спектральные линии, соответствующие основной частоте воздействия, ее гармоникам, субгармоникам и ультрагармоникам колебаний полости. Помимо основной частоты и гармоник высоких частот nf_0 ($n=1, 2, 3, \dots$) в спек-

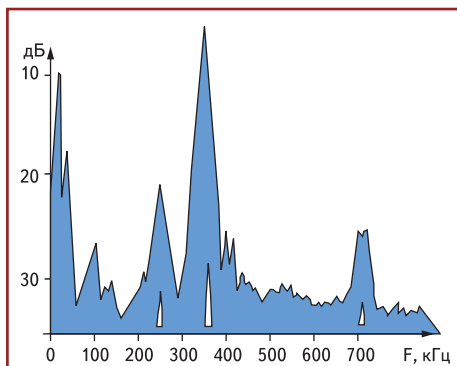


Рис. 7. Спектр кавитационного шума в воде

тре содержатся серии субгармоник $nf_0/2, nf_0/3, nf_0/4$ и имеет место сплошной «белый» шум, генерируемый кавитационными пузырьками различных резонансных размеров.

Для спектрального исследования кавитационного шума в диапазоне 20 кГц – 50 МГц использован анализатор спектра С4-54. В кавитационную область жидкости в УЗ-ванне погружался волноводный датчик, сигнал с которого усиливался и подавался на анализатор. Основная частота колебаний преобразователя контролировалась частотомером ЧЗ-34. Анализ спектрограмм показал, что максимальный прирост в кавитационном спектре при увеличении излучаемой мощности дает сплошной шум, а также субгармоники. Наибольшая спектральная плотность кавитационного шума находится в полосе частот от 20-й до 40-й гармоники основной частоты УЗ-преобразователя (рис. 7).

При настройке УЗ-ванны вначале оценивают амплитуду колебаний каждого УЗ-преобразователя с помощью контактного измерителя вибраций (рис. 8а). Для оценки кавитационного давления в жидкой среде измеряют квадратичную величину уровня шумов в диапазоне его наибольшей спектральной плотности с помощью кавитометра [7], состоящего из датчика, полосового фильтра, квадратичного детектора и регистрирующего прибора.

Кавитометр (рис. 8б) измеряет кавитационные давления от 5 до $5 \cdot 10^4$ Па в диапазоне частот 18–60 кГц с точностью $\pm 10\%$. Давление в кавитационной области воспринимается металллическим щупом, соединенным с пьезоэлектрическим преобразователем. Электрический сигнал с преобразователя поступает на усилитель, расположенный в корпусе датчика и служащий для согласования высокоомной цепи преобразователя с входом прибора.



Рис. 8. а) Измеритель УЗ-вибраций; б) кавитометр

Аттенуатор на входе измерительного прибора ослабляет входной сигнал с датчика при большой мощности УЗ. Полосовой фильтр, выполненный по схеме Чебышева третьего порядка, выделяет часть спектра сигнала, характерную для кавитационных импульсов. Далее сигнал через квадратичный детектор и усилитель постоянного тока подается на стрелочный прибор. Показания прибора регистрируют через 1–2 с, когда процесс кавитации принимает устойчивый характер.

Исследованы зависимости кавитационного давления от температуры среды и концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ) в растворе. С повышением температуры кавитационное давление уменьшается, поскольку повышается упругость пара в полостях и снижается их кинетическая энергия, что приводит к уменьшению интенсивности ударных волн (рис. 9). Параллельно происходит образование новых, в основном заполненных паром пузырьков, что приводит к расширению области кавитации и уменьшению неравномерности ее распределения.

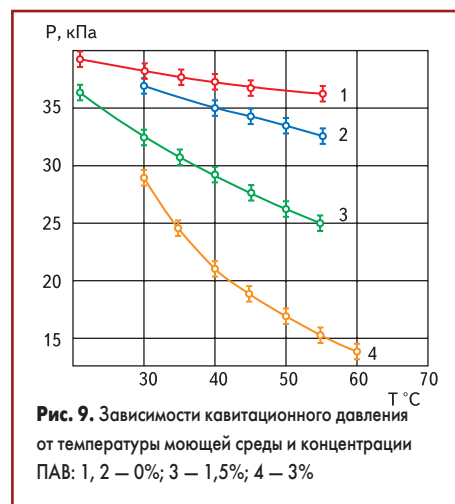


Рис. 9. Зависимости кавитационного давления от температуры моющей среды и концентрации ПАВ: 1, 2 – 0%; 3 – 1,5%; 4 – 3%

Скорость уменьшения кавитационного давления по мере роста температуры моющей среды зависит от ее физико-химических свойств. Так, для чистой воды (зависимости 1 и 2) скорость изменения меньше, чем для водных растворов ПАВ (зависимости 3 и 4). ПАВ уменьшают силу поверхностного натяжения, что приводит к снижению порога кавитации, росту числа кавитационных пузырьков и, следовательно, к повышению равномерности кавитационного поля. Однако уменьшение силы поверхностного натяжения приводит к уменьшению скорости захлопывания кавитационных пузырьков и снижению микроударного действия кавитации. С ростом температуры влияние ПАВ возрастает (кривые 3 и 4).

С увеличением концентрации ПАВ их влияние усиливается, однако увеличивать ее свыше 10% нецелесообразно ввиду трудности последующего удаления. Таким образом, измеряя кавитационное давление, можно устанавливать такие режимы, при которых эффективность воздействия УЗ-колебаний и ПАВ будут оптимальными. Для УЗ-очистки оптимальная температура моющих сред на основе водных растворов ПАВ находится в пределах 50–60 °С, а концентрация ПАВ — 3–4%.

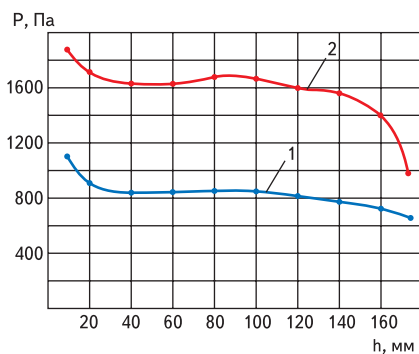


Рис. 10. Распределение давления УЗ-поля в центре ванны в зависимости от расстояния до излучателя:
1 — при наличии кассеты с деталями; 2 — без нее

Оценена неравномерность кавитационного поля в рабочем объеме УЗ-ванны с модульным расположением излучающих систем. В качестве показателя неравномерности поля использовано среднеквадратичное отклонение кавитационного давления по площади и глубине ванны, выраженное в процентах.

Площадь ванны разбивалась на участки, в пределах которых измерялось кавитационное давление в пяти точках — в центре и по углам. Измерения проводились в зоне очистки, а также на различных расстояниях от излучателя. Детали располагались перпендикулярно площади излучения. С удалением от излучателя величина кавитационного давления уменьшается (рис. 10).

Кассета с изделиями, находящаяся в ванне, уменьшает величину кавитационного давления и снижает неравномерность кавитационного поля. Неравномерность распределения кавитационного поля по площади ванны составляет в среднем 3–5%, а по глубине — 6–10%. Поскольку неравномерность поля по глубине ванны больше, чем по площади, то в установках очистки предусмотрено устройство вертикального циклического перемещения кассеты с изделиями для усреднения воздействия УЗ-поля по глубине.

Для поддержания необходимой по технологическому процессу температуры моющего раствора ванны оснащены трубчатыми электронагревательными элементами.

Автоматизированные линии ультразвуковой очистки

Разработанные УЗ-ванны применены в механизированных и роботизированных линиях очистки: УП-1, РТКП-1, РТКП-3, «Орфей», что позволило повысить производительность и улучшить условия труда, снизить потери и исключить применение пожароопасных веществ. Роботизированный технологический комплекс РТКП-1 (рис. 11) имеет следующие функциональные возможности:

- технологическую гибкость за счет унификации технологий очистки на основе водных растворов ПАВ с использованием органических композиций;
- программную перенастройку основных и вспомогательных систем и возможность



Рис. 11. Роботизированные линии УЗ-очистки: а) РТКП-1; б) «Орфей»

Таблица. Характеристики автоматизированных линий УЗ-очистки

Наименование показателя	УП-1	РТКП-1	РТКП-3	Орфей
Производительность, шт./ч	2800	5500	7800	2500
Диаметр деталей, мм	10–80	10–90	10–220	10–90
Мощность потребляемая, кВт	60	80	28	11
Частота УЗ, кГц	44	44	44	44
Мощность УЗ-генератора, Вт	300	300	300	300
Частота качания, Гц	0,5	0,5	0,4	0,4
Амплитуда качания, мм	50	50	50	40
Диапазон температур, °С	20–100	25–100	25–80	20–80
Емкость ванн, л	24	34	50	14
Количество ванн	10	11	10	10
Количество УЗ-ванн	5	6	4	5
Габаритные размеры, м	7,0×3,6×2,6	7,6×4,8×2,6	6,8×1,0×2,0	3,6×0,8×1,2
Масса установки, кг	1800	2800	1200	800

встраивания в гибкие производственные системы за счет автоматизации всех систем комплекса и управления ими от ПЭВМ;

- автоматическое приготовление моющих растворов, заправку и пополнение уровней в ваннах; фильтрацию, автоматическое смешивание горячей и холодной воды до заданных технологических параметров и подачи в ванны;
- тонкую фильтрацию, подогрев и рециркуляцию воздуха для сушки.

Применение ЭВМ позволило объединить функции аналитического контроля, обработки получаемой информации и управления процессом очистки. Особое внимание уделено удобству обслуживания оборудования и технике безопасности. Значительно сокращена численность обслуживающего персонала, устранен контакт рабочих с моющими растворами. Полностью ликвидирована возможность производственных аварий, связанных с взрыво- и пожароопасностью используемых ранее растворителей, созданы системы регенерации и повторного использования отработанных водных моющих композиций.

Отличием РТКП-3 является независимое перемещение при работающем механизме качания, что позволяет производить очистку в ваннах с разными составами и с различным временем. Комбинации модулей и легко перенастраиваемая система управления роботом на микропроцессорной основе позволяют одновременно производить очистку поверхности изделий как из химически стойких, так и нестойких материалов.

Для очистки изделий малых серий разработана модульная автоматизированная линия «Орфей», особенность которой — оснащение каждого модуля независимыми системами интенсификации технологического процесса

и управления, возможность эксплуатации модулей как порознь, так и в составе технологических линий, высокая производительность, низкое энергопотребление при относительно малой емкости ванн и небольших габаритах. Сравнительные характеристики линий УЗ-очистки приведены в таблице.

Серийно выпускаемые автоматизированные линии очистки электронных и электронно-оптических изделий позволили существенно повысить производительность труда, улучшить условия труда, снизить потери и исключить применение пожароопасных веществ.

Литература

1. Savage T. Ultrasonic cleaning in industry // Wire Industry. 2005. № 6.
2. Fuchs F. J. The Key to Ultrasonics-Cavitation and Implosion // Precision Cleaning. 1995. № 3 (10).
3. Кундас С. П., Ланин В. Л., Тявловский М. Д., Достанко А. П., Томаль В. С. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т. 2. Минск: Бестпринт, 2003.
4. Томаль В. С. Ультразвуковое оборудование для процессов удаления загрязнений с микрорельефных поверхностей электронно-оптических изделий // Доклады БГУИР. 2006. № 3.
5. Ультразвуковая технология / Под ред. Б. А. Аграната. М.: Металлургия, 1984.
6. Ilyihev V. I., Koretz V. L., Melnicov N. P. Spectral characteristics of acoustic cavitation // Ultrasonics. 1989. № 27.
7. Ланин В. Л., Томаль В. С. Оптимизация кавитационных полей в ультразвуковых ваннах очистки // Доклады НАН Беларуси. 2007. Т. 51. № 3.