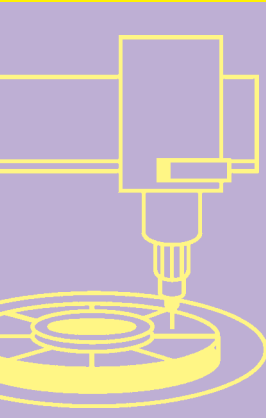


УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЧИСТКА МИКРОРЕЛЬЕФНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ



Экологические проблемы, связанные с производством оптоэлектроники, вызвали повышенный интерес к процессам и устройствам ультразвуковой очистки электронных и оптоэлектронных изделий. Для удаления стойких загрязнений с микрорельефных поверхностей изделий необходимо создать направленные акустические течения в жидкой среде и обеспечить равномерность кавитационного поля в ультразвуковой ванне.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЧИСТКИ

Анализ причин отказов изделий оптоэлектроники показывает, что четверть из них 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. Хлорированные углеводороды токсичны, обладают канцерогенным и мутагенным воздействием, образуют смог и требуют утилизации отходов путем захоронения. Общеизвестен основной недостаток спиртов: их пожаро- и взрывоопасность. Хладоны разрушают озоновый слой и усиливают парниковый эффект.

Поэтому актуальна проблема создания новых безопасных моющих композиций, технологических процессов и оборудования для очистки таких изделий. Предпочтение отдается моющим композициям на основе экологически безопасных органических растворителей и водных растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ), способных очищать микрорельефные поверхности от грязи.

Альтернативой органическим растворителям и хладонам является ультразвуковая (УЗ) очистка в водных растворах 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, давление в которых может 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 грязи и ускорению процесса очистки микрорельефной поверхности. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты, возникновение микро- и макропотоков определяют интенсификацию процесса удаления загрязнений при сложном профиле поверхности изделий под действием УЗ-поля. Использование рабочих частот в диапазоне 80–120 кГц обеспечивает неразрушающую очистку и удаление частиц грязи размером до 1 мкм с микрорельефных поверхностей [3]. Развитие технологии УЗ-очистки и обезжиривания поверхностей изделий за последние десятилетия показало, что наиболее производительным является групповой метод обработки мелких изделий, уложенных в кассеты или корзины. Для обеспечения высокого качества изделий необходимо создать направленные акустические течения в жидкой среде и обеспечить равномерное распределение интенсивности УЗ-поля в объеме жидкости.

ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

Ультразвуковые технологические системы для удаления грязи включают различные по конструкции ванны, которые используются для очистки как в непроточных средах на основе водных растворов ПАВ, так и в проточной воде или в органических растворителях. Ванны для очистки в непроточных и проточных моющих средах (рис.1) отличаются друг от друга тем, что последние оснащены переливным карманом или воронкой. Для повышения эффективности обмена моющей среды в рабочем объеме ванны подачу раствора необходимо осуществлять противотоком (как показано на рис.1а,б) слева, сверху и снизу ванны через ряд отверстий небольшого диаметра (3–6 мм). Верхний ряд отверстий должен быть затоплен на глубину $h=8-15$ мм. Такая конструкция ванны для очистки в проточной моющей среде будет обладать большой равномерностью распределения кавитационного давления, поскольку потоки моющей среды имеют практически ламинарный характер.

В верхней части ванны для очистки в органических растворителях происходит конденсация паров растворителя, поэтому уровень растворителя должен составлять $1/3$ полной высоты ванны, а отношение ширины ванны к длине должно быть $1/3$ или $1/2$. Такой выбор соотношений обеспечивает минимальные потери растворителя при испарении.

Емкость ванн выбирается в зависимости от габаритов обрабатываемой детали или (при групповой очистке) от требуемой 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 половине длины волны колебаний, распространяющихся в моющей среде. Оптимальная высота уровня моющей среды должна быть кратна длине волны.

Обеспечить равномерное воздействие УЗ-поля в жидкости можно в основном двумя способами. Первый состоит в разработке ванн с равномерным полем излучения, создаваемым изгибно-колеблющейся диафрагмой, возбуждаемой системой распределенных магнитострикционных преобразователей, закрепленных попарно в пучностях изгибных колебаний или пьезокерамических преобразователей, укрепленных в определенном порядке на стенках ванны. Второй заключается в разработке специальных устройств, обеспечивающих равномерную очистку с неравномерным полем путем электрического или механического сканирования поля по поверхности изделий.

Разрушение поверхностных пленок грязи в жидкости происходит в результате кавитации и направленных акустических течений, причем основной вклад дает кавитация. В связи с этим обоснована необходимость равномерного распреде-

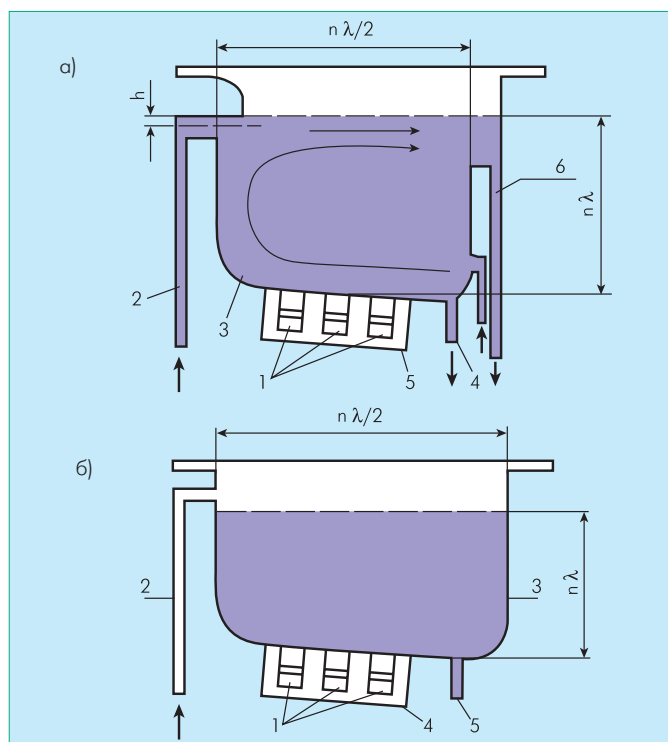


Рис.1 Конструкции ванн УЗ-очистки для проточных (а) и непроточных (б) моющих средств: 1 – преобразователь, 2 – переливной патрубок, 3 – корпус, 4 – сливной патрубок, 5 – экран; 6 – переливной карман

ления кавитационной области. Однако распределение кавитационных пузырьков в этой области в большинстве случаев неравномерно. В жидкой среде количество кавитационных 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 или даже равно нулю. Как правило, скопления возникают на границе раздела "жидкость – твердое тело", где всегда в достаточном количестве присутствуют кавитационные зародыши. Часто можно наблюдать скопления кавитационных пузырьков в виде макропотока, который исходит из одной точки. Причины образования скоплений такой формы пока не ясны, однако конфигурация макропотока существенно меняется при незначительном изменении рабочей частоты. Можно предположить, что макропотоки связаны с интерференционной структурой ближнего поля излучателя – фактором, сильно реагирующим на изменения частоты.

Следовательно, есть проблема получения равномерной кавитационной области в технологическом объеме ванны для очистки. Обычно в используемых конструкциях дном ванны служит излучающая диафрагма преобразователя ПМС-6-22. Неравномерность распределения акустического давления, создаваемая таким преобразователем, очень велика – до 50%. В центре ванны над диафрагмой давление имеет 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 акустическое давление над такой системой также имеет максимумы и минимумы, а сборка и настройка этих систем чрезвычайно сложна.

Более перспективной является модульная система распределенных УЗ-преобразователей, установленных в шахматном порядке так, что если мысленно провести прямые через их центры, то образуется решетка треугольной структуры с длиной стороны, кратной $n\lambda/\sqrt{3}$, где n – целые числа 1, 2, 3...; λ – длина УЗ-волны в жидкой среде [4] (рис.2). Такое расположение преобразователей создает равномерное по площади поле при трехфазном возбуждении за счет суперпозиции УЗ-волн, излучаемых преобразователями, подключенными к разным каналам.

Расстояние между центрами в группе кратно длине λ распространяющихся в жидкости УЗ-волн. УЗ-преобразователи в каждой группе электрически соединены параллельно и подключены к соответствующим каналам А, В или С модульного УЗ-генератора (рис.3).

Канал представлен транзисторным автогенератором, работающим в ключевом режиме. Схема питания каждого канала двухполупериодная без фильтрации, за счет чего осуществляется амплитудная и частотная (100 Гц) модуляция выходного сигнала, который представлен суммой трех гармоник: с основной ω и боковыми частотами ($\omega \pm 100$ Гц).

Выпрямители блоков питания 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.4). Область наибольшего акустического давления, соответствующая максимальному напряжению на преобразователе, последовательно перемещается от преобразователя А к В и далее к С (или наоборот при изменении фаз каналов) в каждой группе. В результате

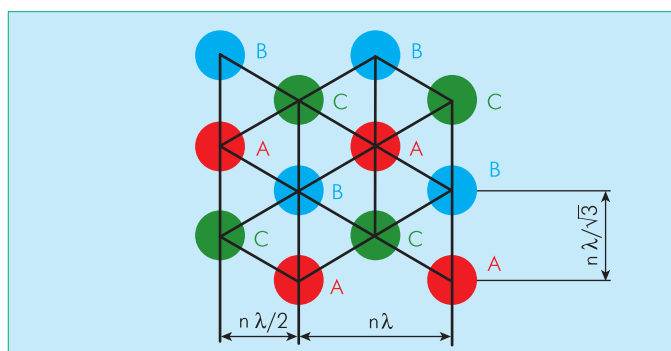


Рис.2 Расположение УЗ-преобразователей: А, В, С – преобразователи, подключенные к каналам А, В и С УЗ-генератора

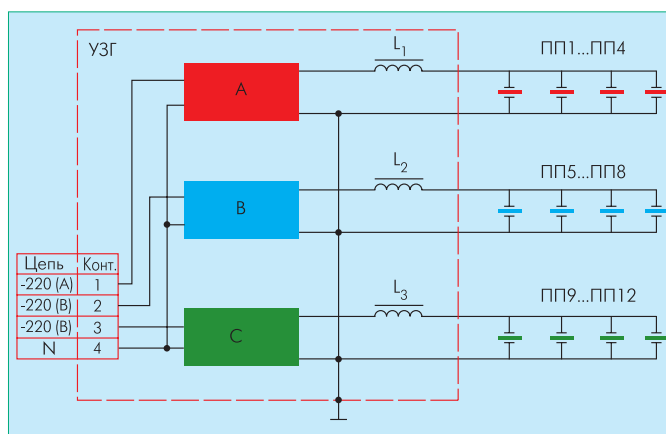


Рис.3 Схема модульного УЗ-генератора: А, В, С – каналы; L1, L2, L3 – дроссели согласования; ПП1...ПП12 – пьезоэлектрические преобразователи

возникают направленные макропотоки жидкости из зоны большего в зону меньшего акустического давления.

Так как движение областей происходит со сравнительно низкой частотой (100 Гц), то в жидкой и вязкой средах возникают вихревые макропотоки, которые вместе с микропотоками различной природы в УЗ-поле интенсифицируют процессы массопереноса и растворения, а значит и процесс очистки.

Питание пульсирующим напряжением, из-за нелинейности пьезоэлементов, приводит к эффекту периодического изменения (качания) частоты, что 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, внесение кассеты с деталями в ванну) приводят к изменению полного входного сопротивления преобразователя, а значит, и к изменению частоты генерируемых колебаний. Правильный выбор рабочей точки позволяет обеспечить автоподстройку частоты.

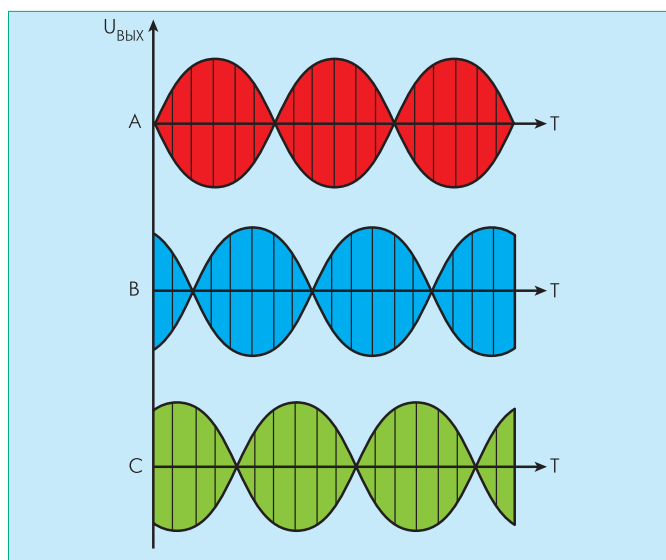


Рис.4 Форма выходного сигнала каналов А, В, С

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, на регистрации температурных полей или специальной обработке возникающих акустических сигналов [5].

С помощью тестовых образцов, закрепленных в определенном месте рабочего объема, можно количественно исследовать зависимость эрозии от свойств жидкости и параметров УЗ-поля, однако ошибка при этом достигает 25%, что объясняется неоднородностью кавитационной области и другими случайными факторами. Эта оценка облегчается, если в качестве образца используют алюминиевую фольгу толщиной 0,05 мм. Эрозионную активность оценивают по степени разрушения фольги в УЗ-ванне. Недостатки метода — длительность измерений и отсутствие непрерывного контроля процесса кавитации.

Кавитационное поле в жидкостях имеет сложный спектральный состав, вызванный акустическим излучением при захлопывании множества пузырьков. Он имеет вид широкополосного шума со спектром в полосе от нескольких сотен герц до сотен килогерц. На фоне сплошного спектра кавитационного шума наблюдаются отдельные дискретные компоненты, что является характерным признаком кавитации и используется для экспериментальной регистрации ее возникновения [6].

Спектральный анализ позволил выделить спектральные линии, соответствующие основной частоте воздействия и гармоникам колебаний полости. Помимо основной частоты и гармоник высоких частот nf_0 ($n=1, 2, 3, \dots$) в спектре содержатся серии субгармоник $nf_0/2, nf_0/3, nf_0/4$. Во всем диапазоне имеет место "белый" шум, генерируемый кавитационными пузырьками различных размеров. Для его исследования в диапазоне 20 кГц–50 МГц использовался анализатор спектра С4-54. 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.5).

При настройке УЗ-ванны вначале оценивают амплитуду колебаний каждого УЗ-преобразователя с помощью контактного измерителя вибраций (рис.6а). Для оценки интенсивности кавитационного давления в жидкой среде измеряют квадратичную величину уровня шумов в диапазоне его наибольшей спектральной плотности с помощью кавитометра [3], состоящего из датчика, полосового фильтра, квадратичного детектора и регистрирующего прибора. Показания прибора имеют линейную зависимость от активной мощности в диапазоне 0–2 кВт.

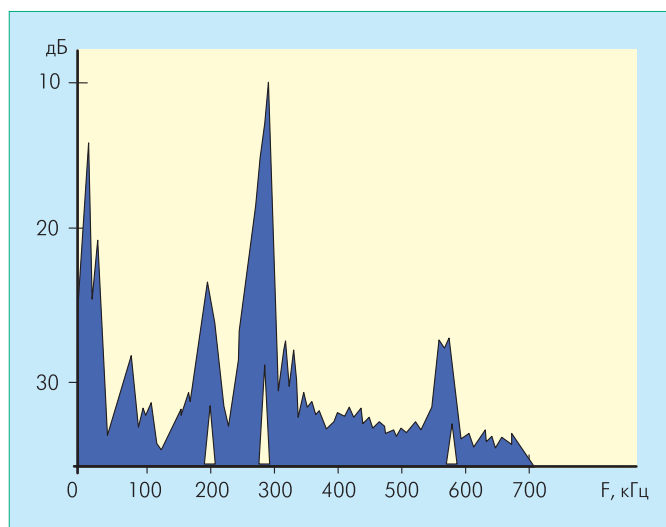


Рис.5 Спектр кавитационного шума в воде

Кавитометр (рис.6б) измеряет кавитационное давление от 5 до $5 \cdot 10^4$ Па в диапазоне частот 18–60 кГц с точностью $\pm 10\%$. Давление в кавитационной области воспринимается плоским диском размером 1 см², соединенным упругим волноводом с пьезоэлектрическим преобразователем. Электрический сигнал с преобразователя поступает на согласующий усилитель, расположенный в корпусе датчика. Полосовой фильтр позволяет выделить часть спектра сигнала, характерную для кавитационных импульсов. Далее сигнал детектируется и подается на стрелочный прибор. Показания прибора регистрируются через 1–2 с, когда процесс кавитации принимает устойчивый характер.

Были исследованы зависимости кавитационного давления от температуры среды и концентрации 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.7). Параллельно происходит образование новых, в основном заполненных паром, пузырьков, что приводит к расширению области кавитации и уменьшению неравномерности ее распределения.

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

Рост концентрации усиливает влияние ПАВ (рис.8), однако увеличивать ее выше 10% нецелесообразно ввиду трудности последующего удаления. Таким образом, измеряя кавитаци-

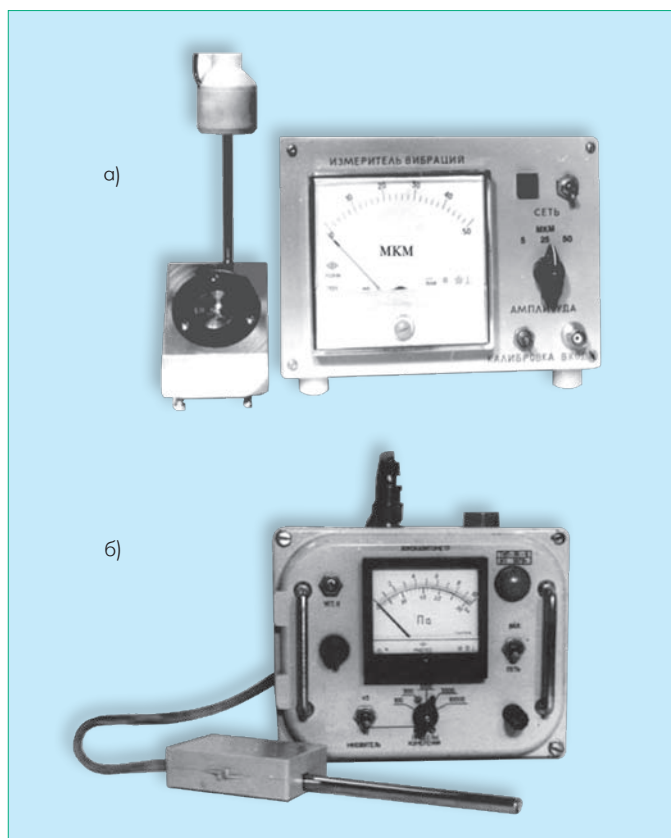


Рис.6 Измеритель УЗ-вибраций (а) и кавитометр (б)

онное давление, можно устанавливать такие температурные режимы, при которых эффективность воздействия УЗ-колебаний и ПАВ будут оптимальными. Для УЗ-очистки оптимальная температура моющих сред на основе водных растворов ПАВ лежит в пределах 50–60°C при концентрации ПАВ 3–4%.

Оценивалась также неравномерность кавитационного поля в рабочем объеме УЗ-ванны с модульным расположением излучающих систем. Показателем неравномерности служило среднеквадратичное отклонение кавитационного давления по площади и глубине ванны. Площадь ванны разбивалась

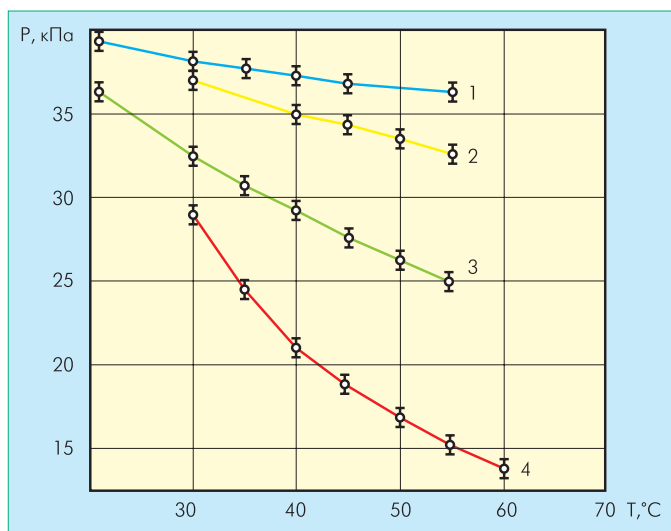


Рис.7 Зависимость кавитационного давления от температуры моющей среды и концентрации ПАВ: 1,2 – 0%, 3 – 1,5%, 4 – 3%

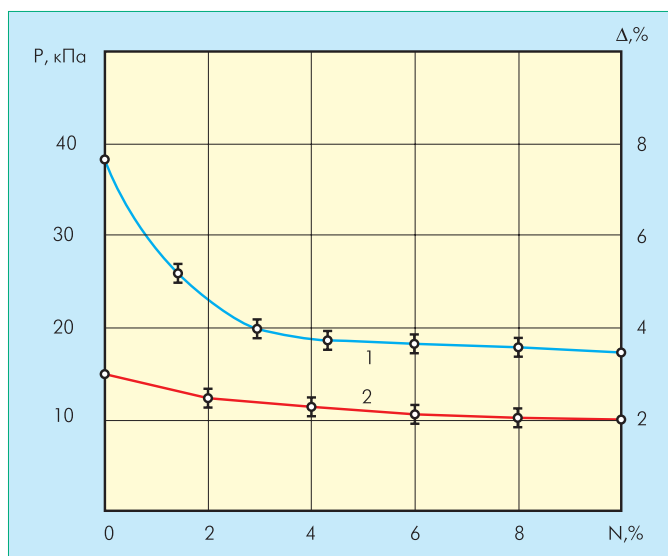


Рис.8 Зависимости кавитационного давления от концентрации ПАВ в центре ванны на расстоянии 4λ от дна (1) и неравномерности кавитационного давления по площади ванны (2)

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 уменьшалась (рис.9).

Кассета с изделиями, помещенная в ванну, уменьшает величину кавитационного давления и снижает неравномерность кавитационного поля. Она составляет в среднем по площади 3–5% и по глубине 6–10%. Поскольку неравномерность поля по глубине больше, чем по площади, то предусмотрено устройство вертикального циклического перемещения кассеты с оптическими изделиями для усреднения воздействия УЗ-поля по глубине. Для поддержания необходимой температуры моющего раствора ванны оснащены трубчатыми электронагревательными элементами.

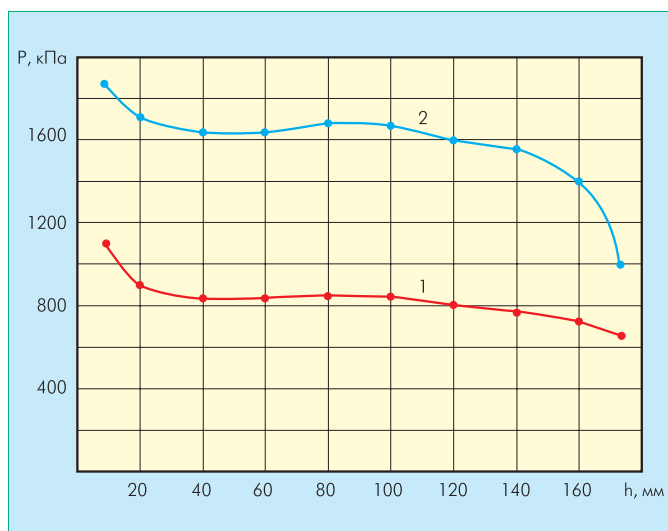


Рис.9 Распределение давления УЗ-поля в центре ванны в зависимости от расстояния до излучателя: 1 – при наличии кассеты с деталями; 2 – без кассеты

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ЛИНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

Разработанные ванны применены в механизированных и роботизированных линиях очистки: УП-1, РТКП-1, РТКП-3, РТКП-4, "Орфей", что позволило повысить производительность и улучшить условия труда, снизить потери и исключить применение пожароопасных веществ. Роботизированный технологический комплекс РТКП-1 (рис.10) имеет следующие особенности:

- набор унифицированных технологий очистки на основе водных растворов ПАВ с применением органических композиций;
- программную перенастройку основных и вспомогательных систем и возможность встраивания в гибкие производственные системы за счет автоматизации управления всеми системами комплекса;
- автоматическое приготовление моющих растворов, заправка и пополнение уровней в ваннах; фильтрацию, автоматическое поддержание нужной температуры воды, подаваемой в ванны;
- тонкую фильтрацию, подогрев и рециркуляцию воздуха для сушки.

Применение компьютеров позволило объединить функции аналитического контроля, обработки получаемой информации и управления процессом очистки. Особое внимание уделено удобству обслуживания оборудования и технике безопасности. Значительно сокращен обслуживающий персонал, устранен контакт рабочих с моющими растворами. Ликвидирована возможность аварий, связанных с взрыво- и пожароопасностью используемых растворителей, созданы системы регенерации и повторного использования отработанных водных моющих композиций.

Характеристики линий УЗ-очистки

Параметр	КП-2	УП-1	РТКП-1	РТКП-3	"Орфей"
Производительность, шт./ч	250–3000	100–2800	380–5500	120–7800	380–2500
Диаметр деталей, мм	10–80	10–80	10–90	10–220	10–90
Потребляемая мощность, кВт	32	60	80	28	11
Частота УЗ, кГц	44	44	44	44	44
Мощность УЗ-генератора, Вт	300	300	300	300	300
Частота качания, Гц	0,75–1,5	0,5	0,5	0,4	0,4
Амплитуда качания, мм	60	50	50	50	40
Диапазон температур, °С	20–90	20–100	25–100	25–80	20–80
Емкость ванн, л	24	24	34	50	14
Число ванн	7	10	11	10	10
Число УЗ-ванн	3	5	6	4	5
Габариты, мм	5,6×1,0×1,7	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	800	1800	2800	1200	800

Отличительной особенностью 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 переналаживаемая 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" с высокой производительностью и низким энергопотреблением при относительно малой емкости ванн и небольших габаритах. Сравнительные характеристики линий УЗ-очистки приведены в таблице.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Savage T.** Ultrasonic cleaning in industry. – Wire Industry, 2005, No.6, p.424–426.
2. **Fuchs F.J.** The key to ultrasonic cavitations and implosion. – Precision Cleaning, 1995, No.3, p.13–17.
3. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники / С.П.Кундас, В.Л.Ланин, М.Д.Тявловский, А.П.Достанко, В.С.Томаль. Т.2. – Минск: Бестпринт, 2003. – 224с.
4. **Томаль В.С.** Ультразвуковое оборудование для процессов удаления загрязнений с микрорельефных поверхностей электронно-оптических изделий. – Доклады БГУИР, 2006, №3, с.40–45.
5. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А.Аграната. – М.: Металлургия, 1984. – 503с.
6. **Ilychev V.I., Koretz V.L., Melnicov N.P.** Spectral characteristics of acoustic cavitation. – Ultrasonics, 1989, № 27, p.357–361.

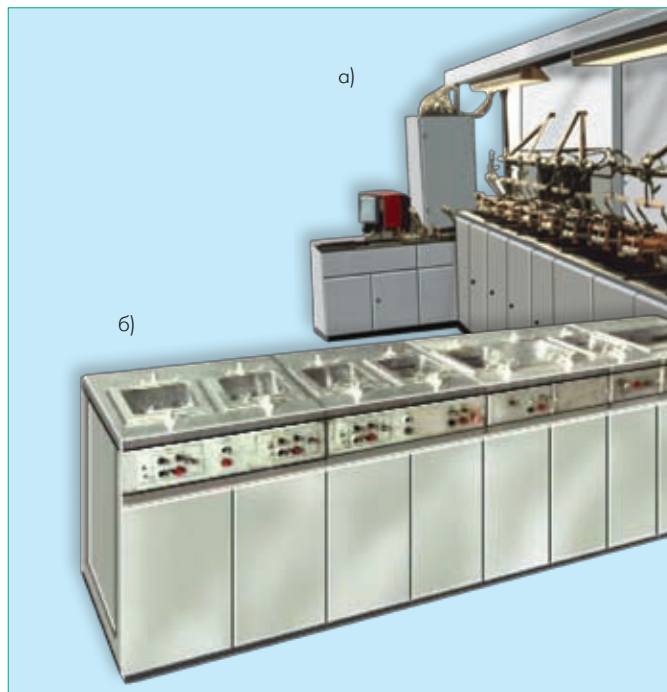


Рис.10 Роботизированные линии УЗ-очистки: РТКП-1 (а) и "Орфей" (б)