

3350



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Лабораторный практикум

Минск 2008

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Лабораторный практикум
для студентов специальностей 1-38 01 01 «Механические
и электромеханические приборы и аппараты»
и 1-52 02 01 «Технология и оборудование
ювелирного производства»

М и н с к 2 0 0 8

УДК 621.7/9.047(075.8)

ББК 30.61я7

Э 45

Составители

М.Г. Киселёв, А.В. Дроздов

Рецензент

Ж.А. Мрочек

Э 45 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: лабораторный практикум для студентов специальностей 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты» и 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства» / сост.: М.Г. Киселёв, А.В. Дроздов. – Минск: БНТУ, 2008. – 190 с.

В практикуме содержится восемь лабораторных работ, предназначенных для изучения основных явлений, положенных в основу электрофизических и электрохимических методов обработки.

Логически продуманная последовательность изложения материала, доступность теоретического описания изучаемых принципов, подробное изложение порядка выполнения практической части в каждой лабораторной работе повышает вероятность правильного выполнения студентом всех опытов. Данный лабораторный практикум может быть полезен студентам других специальностей машино- и приборостроительного направления при изучении ими технологических курсов, в программах которых предусмотрено рассмотрение электрохимической обработки материалов.

Содержание

Введение	4
Лабораторная работа № 1	
Изучение акустических колебательных систем технологического назначения	6
Лабораторная работа № 2	
Изучение методов и средств измерения параметров акустических колебательных систем.	25
Лабораторная работа № 3	
Изучение технологии и оборудования для ультразвуковой очистки.	47
Лабораторная работа № 4	
Звукокапиллярный эффект в жидкостях.	70
Лабораторная работа № 5	
Ультразвуковая сварка пластмасс и сварка пластмасс трением.	87
Лабораторная работа № 6	
Изучение технологических основ ультразвуковой размерной обработки хрупких материалов.	117
Лабораторная работа № 7	
Электроэрозионная обработка металлов.	142
Лабораторная работа № 8	
Размерная электрохимическая обработка металлов.	167

Введение

Современный уровень развития приборостроения характеризуется как возрастающими требованиями к точности и качеству изготовления деталей и изделий, так и широким применением материалов с особыми физико-механическими свойствами, при этом обработка резанием значительно повышает трудоемкость и себестоимость их изготовления. Это способствовало бурному развитию методов, основанных на ряде явлений и законов электрофизики и электрохимии, а также их широкому распространению в производстве и создало отдельную область современных электрохимических и электрофизических технологий.

Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов в настоящее время применяют на всех этапах изготовления деталей, начиная от получения заготовок и кончая их отделочной обработкой. Правильное использование этих методов позволяет решать сложные технологические задачи, связанные с получением поверхностей сложной, криволинейной формы, создания материалов, обладающих особыми свойствами, относящимися к прочности поверхностного слоя, соблюдению заданной его топографии и особого химического состава.

Вместе с тем применение электрофизических и электрохимических методов ограничено вследствие особенностей процессов, протекающих при их реализации. Кроме того, использование этих методов приводит к необходимости создания, настройки и эксплуатации сложного технологического оборудования. Электрохимическое и физическое оборудование специфично и сложно в наладке и эксплуатации, а в ряде случаев нет четко установленных структуры технологического процесса, содержания отдельных операций, режимов обработки, обеспечивающих требуемое качество поверхности и точность обработки.

Поэтому, несмотря на наличие учебной литературы, освещающей теоретические вопросы электрофизической и электрохимической обработки, при изучении дисциплины «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов» студентами специальностей 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты» и 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства» возникает необходимость закрепить полученные

знания путем проведения лабораторных опытов. Исходя из вышеизложенного целью лабораторного практикума по электрофизическим и электрохимическим методам обработки является улучшение условий для подготовки студентов вышеуказанных специальностей к лабораторным занятиям, а также повышение вероятности успешного усвоения ими знаний, полученных в теоретическом курсе.

Лабораторный практикум содержит материалы, необходимые студентам для выполнения лабораторных работ по изучению акустических колебательных систем технологического назначения; методов и средств измерения параметров акустических колебательных систем; технологии и оборудования ультразвуковой очистки и звукокапиллярного эффекта; по ознакомлению с основами технологии и особенностями оборудования для ультразвуковой размерной обработки, ультразвуковой сварки пластмасс и сварки пластмасс трением, по проведению электрохимической и электроэрозионной обработки металлов. В издании приводятся сведения о процессах, лежащих в основе электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. Описание каждой лабораторной работы включает в себя формулировку цели работы, перечень инструментов и принадлежностей, используемых при ее выполнении, краткое изложение теории, порядок выполнения работы, вопросы для самопроверки и список литературы.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Цель работы

1. Изучить конструкции и принцип действия акустических колебательных систем технологического назначения.
2. Изучить принцип действия и конструкции электроакустических преобразователей: магнитострикционных и пьезокерамических.
3. На основе измерений геометрических параметров представленных электроакустических преобразователей вычертить сборочные чертежи их конструкций, определить резонансные частоты преобразователей и построить эпюры колебательных смещений и напряжений по их длине.

Инструменты и принадлежности

1. Магнитострикционный преобразователь из никеля в сборе с коническим концентратором.
2. Пьезокерамический преобразователь типа Ланжевена.
3. Штангенциркуль ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу, равной 0,05 мм.

Основные сведения об акустических колебательных системах технологического назначения

Для достижения высоких технологических показателей ультразвуковой обработки необходимо обеспечить, во-первых, заданное направление введения колебаний в зону обработки или обрабатываемую среду, а во-вторых, амплитуду колебаний, достаточную для эффективного протекания процесса и незначительно изменяющуюся в процессе работы.

В общем случае ультразвуковая колебательная система (рис. 1.1) состоит из преобразователя, согласующего элемента (концентратора) и рабочего инструмента.

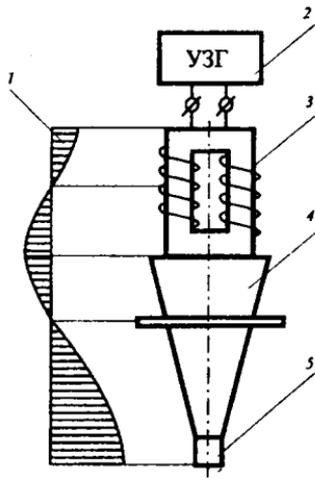


Рис. 1.1. Основные элементы акустической колебательной системы технологического назначения:

1 – эпюра колебательных смещений; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – электроакустический преобразователь; 4 – концентратор; 5 – инструмент

Электроакустический преобразователь 3 передает колебания концентратору или трансформатору упругих колебаний 4, к которому крепится рабочий инструмент 5. Питание электроакустического преобразователя осуществляется от ультразвукового генератора 2.

Важнейшей частью ультразвуковой колебательной системы являются электроакустические преобразователи (излучатели). Они предназначены для преобразования электрической энергии в энергию ультразвуковых волн. В настоящее время для получения высокоэнергетических колебаний в ультразвуковых системах технологического назначения повсеместно применяются магнестрикционные и пьезоэлектрические преобразователи.

Магнестрикционные преобразователи

В основу действия этих преобразователей положен магнестрикционный эффект, сущность которого заключается в изменении размеров ферромагнитных материалов под действием магнитного поля. В магнестрикционных преобразователях используется главным образом линейная магнестрикция ферромагнитных материалов.

Для количественной оценки магнитострикционных свойств материалов используется магнитострикционное удлинение $\Delta L/L$, представляющее собой относительное изменение длины стержня при наложении магнитного поля. Величина магнитострикционной деформации зависит от напряженности магнитного поля H , материала, способа обработки и температуры. Наиболее сильно эффект магнитострикции выражен в ферромагнетиках ($\Delta L/L = 10^{-6} \dots 10^{-5}$) и некоторых ферритах ($\Delta L/L = 10^{-4} \dots 10^{-3}$). Магнитострикционные материалы, помещенные в магнитное поле, ведут себя по-разному. Например, образец из сплава платины с железом с увеличением напряженности магнитного поля удлиняется, а никель, наоборот, укорачивается. На рис. 1.2 приведены кривые магнитострикционной деформации различных ферромагнетиков в зависимости от напряженности магнитного поля H . Значительной магнитострикционной деформацией обладают никель, сплавы алюминия с железом (альфер), железокобальтовые сплавы (пермендюр) и сплав платины с железом. Последний имеет наибольшую магнитострикционную деформацию, однако для промышленных целей он из-за высокой стоимости не применяется.

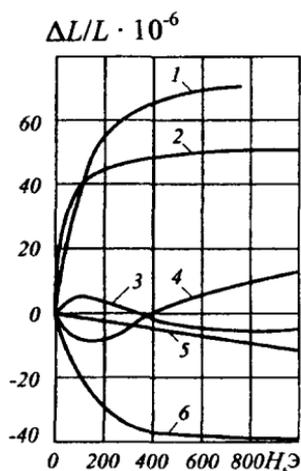


Рис. 1.2. Кривые магнитострикционной деформации (H — напряженность магнитного поля):

1 — сплав платины с железом (54 % Pt и 46 % Fe); 2 — пермендюр; 3 — железо; 4 — литой кобальт; 5 — отожженный кобальт; 6 — никель

В настоящее время наибольшее применение находят никель и пермендюр. Никель обладает сравнительно небольшой, но достаточно интенсивной магнитострикцией, хорошими антикоррозионными свойствами, пластичностью и прочностью. Кроме того очень важно, что никель хорошо паяется со сталями с помощью оловянно-серебряных припоев при соединении преобразователя с концентратором.

Наиболее рациональным материалом для изготовления преобразователя является пермендюр (К49Ф2). Он обладает сильно выраженным магнитострикционным эффектом, т.е. позволяет получать значительные мощности при относительно небольших размерах преобразователя. Однако по сравнению с никелем он обладает меньшей механической прочностью и антикоррозионной стойкостью, а, кроме того, при использовании железоалюминиевых сплавов возникают серьезные трудности их соединения со сталями.

Кривые на рис. 1.2 получены в статических условиях, т.е. при воздействии магнитного поля, созданного постоянным током. Преобразователь можно рассматривать как двустороннюю систему, к входу которой подводится электрическая энергия, а с выхода снимается механическая. Поэтому процесс преобразования можно охарактеризовать двумя последовательными ступенями – электромагнитной и магнитомеханической. Переменное напряжение создает в обмотке намагничивающий ток, который вызывает изменение магнитного состояния материала сердечника и возбуждает переменную индукцию (первая ступень). Сердечник в переменном магнитном поле под действием периодического намагничивания изменяет свои размеры (вторая ступень).

Следует подчеркнуть, что этот эффект «квадратичен», т.е. частота колебаний сердечника в 2 раза выше частоты колебаний электромагнитного поля, так как за каждый полупериод сердечник испытывает весь цикл «удлинение – укорочение». Если подмагничивание отсутствует (рис. 1.3, а), то преобразователь изменяет свою длину с удвоенной частотой $2f$ и магнитострикционная деформация невелика.

Для предотвращения удвоения частоты колебаний сердечника и получения больших деформаций магнитострикционные преобразователи работают при наличии постоянной составляющей магнитного поля H_0 (подмагничивании) (рис. 1.3, б).

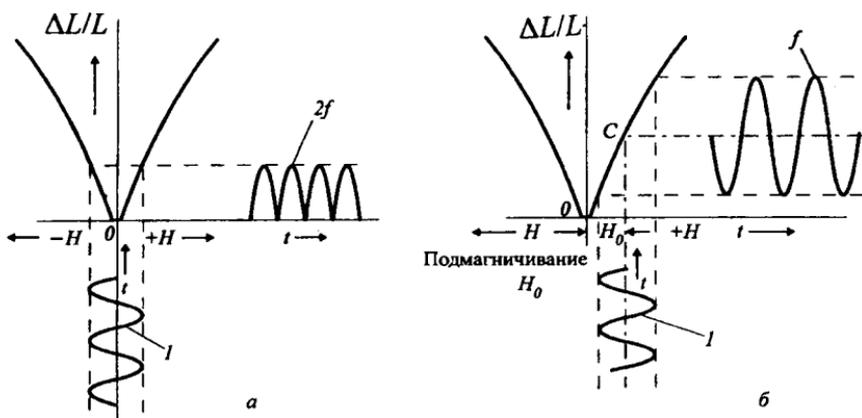


Рис. 1.3. Магнитострикционная деформация при возбуждении переменным магнитным полем (H – напряженность магнитного поля; t – время): a – без подмагничивания; b – с подмагничиванием; l – возбуждающее поле частоты f

При постоянном подмагничивании имеет место линеаризация эффекта магнитострикции, т.е. он становится зависимым от знака поля, и сердечник преобразователя колеблется с частотой возбуждения. Подмагничивание создается или постоянным током, протекающим по обмотке, или с помощью постоянных магнитов, установленных в магнитопроводе сердечника, или за счет остаточной намагниченности. При наложении постоянного поля H_0 рабочая точка смещается по кривой магнитострикционной деформации (точка C на рис. 1.3, b), в результате чего частота колебаний преобразователя становится равной частоте колебаний поля f и происходит увеличение амплитуды колебаний смещений. При этом рекомендуется выбирать $H_0 > 0,5H_{\max}$.

Амплитуда поляризованного преобразователя A_0 максимальна на резонансном режиме при совпадении частот колебаний возбуждающего электромагнитного поля с собственной частотой его механических колебаний. Величина H_0 ограничивается механической прочностью и магнитным насыщением материала преобразователя ($f = 18 \dots 22$ кГц, $A_0 < 10$ мкм).

Основная собственная частота f_0 продольных колебаний в стержнях и трубках постоянного поперечного сечения определяется по формуле

$$f_0 = C_m / 2L,$$

где C_m – скорость распространения звука в магнитоотрицательном материале, м/с;

L – длина стержня, м ($L = \lambda/2$).

В ультразвуковых установках технологического назначения чаще всего применяют магнитоотрицательные преобразователи стержневого типа и реже – кольцевого. Сердечники стержневых магнитоотрицательных преобразователей представляют собой два или несколько стержней, совершающих продольные колебания вдоль оси. Концы стержней соединяются между собой накладкой таким образом, что образуется замкнутый магнитопровод.

В ультразвуковой технологической аппаратуре наибольшее распространение получили полуволновые двухстержневые продольно-колеблющиеся магнитоотрицательные преобразователи (рис. 1.4).

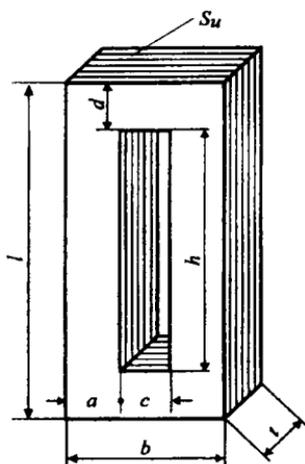


Рис. 1.4. Двухстержневой полуволновой магнитоотрицательный преобразователь

Для уменьшения потерь на токи Фуко сердечники из металлических материалов набирают из штампованных тонких пластин или навивают из тонкой ленты. Толщина пластин (ленты) обычно составляет 0,1...0,2 мм. Для изоляции используется оксидная пленка (на никеле) или пленка из какой-либо полимеризующейся смолы. Перед сборкой сердечника материал подвергают отжигу, режим которого

может влиять на свойства магнитострикционного преобразователя. Как правило, в ультразвуковых установках технологического назначения магнитострикционные преобразователи выполняются с водяным охлаждением. Максимальный электроакустический КПД ультразвуковых магнитострикционных преобразователей в диапазоне частот 20...30 кГц составляет 50...70 %, причем с повышением частоты колебаний его значение уменьшается.

Магнитострикционные преобразователи изготавливают также из ферритов. Они экономичны, для их изготовления не требуются дефицитные материалы. Для ультразвуковых излучателей используются материалы на основе феррита никеля, иногда с добавлением феррита кобальта, феррита меди, избытка железа. Ферриты обладают высоким удельным электрическим сопротивлением, которое в $10^8 \dots 10^{10}$ раз больше, чем в металлах, поэтому потери на вихревые токи у них практически отсутствуют. Благодаря этому сердечники из ферритов изготавливаются монолитными, необходимой формы по технологии порошковой металлургии. Для их подмагничивания удобно использовать пластины ферритовых постоянных магнитов, которые вставляют или вклеивают в магнитопровод преобразователя, как показано на рис. 1.5 (постоянные магниты зачернены).

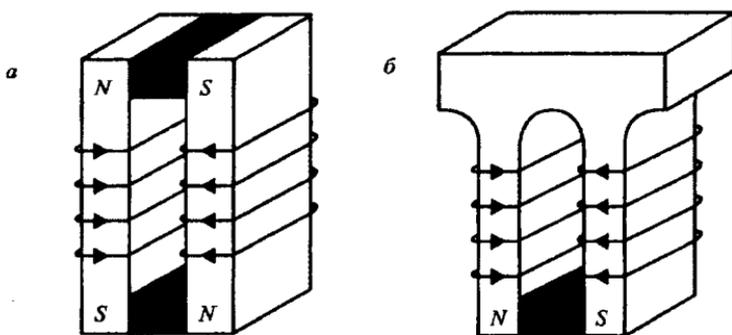


Рис. 1.5. Подмагничивание ферритовых преобразователей с помощью постоянных магнитов:
a – с установкой двух магнитов; *б* – с установкой одного магнита

Такой способ подмагничивания значительно упрощает питание преобразователей, что в сочетании с отсутствием потерь на вихревые токи позволяет получать у ферритовых преобразователей высокий

электроакустический КПД, достигающий 80...85 %, который сохраняется в широком диапазоне частот. Кроме того, они не требуют высокого напряжения питания, нечувствительны к воздействию внешней среды, могут работать даже в агрессивных средах, не требуют принудительного водяного охлаждения. Соединение ферритового преобразователя с металлическим концентратором осуществляется сравнительно просто: путем склеивания их поверхностей с помощью композиций на основе эпоксидных смол.

Однако ферритам свойственны и существенные недостатки. Амплитуда колебаний и интенсивность излучения у преобразователей, изготовленных из ферритов, ограничиваются их нелинейными свойствами и низкой механической прочностью. Установлено, что в диапазоне частот 23...27 кГц ферритовые сердечники могут работать при $A_0 = 3$ мкм, а при $A_0 = 4$ мкм наступает их разрушение. Предельная интенсивность составляет 5...7 Вт/см². Поэтому применение ферритовых преобразователей оправдано в маломощных установках (5...50 Вт).

Пьезоэлектрические преобразователи

За последние годы значительно расширилось применение пьезоэлектрических преобразователей в качестве высокоэнергетических источников ультразвука. Их действие основано на способности некоторых кристаллов деформироваться в электрическом поле в направлении его приложения. Такое явление превращения электрической энергии в механическую называется ***обратным пьезоэлектрическим эффектом***.

Все пьезоэлектрические материалы подразделяются на две группы: *естественные и искусственные*. К первой относятся кристаллы, которые по своей природе являются пьезоэлектрическими, например, кварц, турмалин, сегнетова соль, а ко второй – материалы, у которых пьезоэлектрический эффект появляется только после их специальной обработки (поляризации). Выполняется она путем нагревания керамики до температуры выше точки Кюри и последующего медленного охлаждения в электрическом поле напряженностью до 5 кВ/мм.

Преобразователи из кварца дороги, и размеры их ограничены. Кроме того, на кварцевые пластины для их возбуждения необходимо подавать высокое электрическое напряжение (до нескольких киловольт).

Пьезокерамика значительно дешевле. Преобразователи из пьезо-керамики обладают невысоким сопротивлением, поэтому для их возбуждения требуются небольшие электрические напряжения. Помимо этого из пьезокерамики можно изготовить излучатели различной формы: круглые диски; прямоугольные и кольцевые пластины, части сфер, цилиндров и т.д.

К этой группе пьезоэлектрических материалов относятся керамика титаната бария и керамика цирконата титаната свинца. Материалы группы титаната бария имеют точку Кюри 118...120 °С, а рабочая температура не превышает 60 °С, что при длительной их работе требует принудительного охлаждения. Преобразователи из этой керамики могут излучать колебания интенсивностью не более 2 Вт/см².

Керамика группы цирконата титаната свинца (ЦТС-19, ЦТС-23) имеет более высокую точку Кюри (300 °С), соответственно ее рабочая температура превышает 200 °С, при этом интенсивность колебаний достигает 15 Вт/см². Керамические пьезоэлементы диаметром или длиной более 100 мм и толщиной более 50 мм нетехнологичны и не применяются. Резонансная частота пьезокерамического преобразователя зависит от свойств материала и его толщины h . Для титаната бария и цирконата титаната свинца ее значение равно соответственно $2,25/h$ и $2,1/h$ МГц.

В ультразвуковых колебательных системах технологического назначения широко применяют преобразователи типа «сэндвич», предложенные Ланжевром. Возбуждение преобразователя в них осуществляется таким образом, чтобы вся система работала как полуволновой излучатель. Металлические пластины действуют как добавочные массы и значительно снижают резонансную частоту излучателя. Благодаря этому устраняется необходимость применения толстых пьезоэлементов и улучшаются условия их охлаждения.

На рис. 1.6 приведена конструкция пьезокерамического преобразователя типа Ланжевена. Он состоит из двух пьезокерамических пластин, излучающей и отражающей накладок, контактных пластин из мягкой фольги и стягивающего центрального болта или шпильки.

Параллельное соединение двух пьезокерамических пластин толщиной h удобно потому, что обе металлические накладки могут быть заземлены. При этом сопротивление преобразователя на резонансной частоте составляет четвертую часть сопротивления преобразователя с одной пластиной толщиной h , а напряжение возбуждения

снижается в два раза. Для эффективной работы преобразователя важно обеспечить плотное и прочное соединение поверхностей пьезоэлементов и накладок. Поэтому в процессе сборки преобразователей сопрягаемые поверхности тщательно обрабатываются и притираются для обеспечения в местах сопряжений надежного акустического контакта.

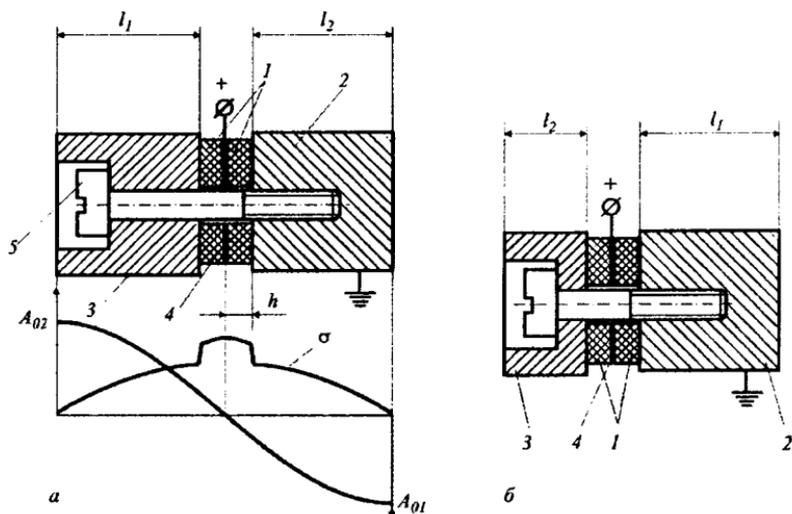


Рис. 1.6. Конструкция пьезокерамического преобразователя типа Ланжевена с частотопонижающими накладками из одного (а) и из разных металлов (б): 1 – пьезокерамические пластины; 2 – излучающая накладка; 3 – отражающая накладка; 4 – контактные пластины; 5 – стягивающий винт

Преобразователи могут изготавливаться с частотопонижающими накладками из одного металла, имеющими одинаковую длину ($l_1 = l_2$) (см. рис. 1.6, а). Для повышения стабильности работы преобразователя как на резонансной частоте, так и при настройке рабочую (излучающую) накладку изготавливают из материала с малым волновым сопротивлением (алюминиевые или титановые сплавы), а пассивную – из стали. При этом длина таких накладок неодинакова ($l_1 \neq l_2$) (см. рис. 1.6, б).

В пьезокерамике типа ЦТС потери, преобразующиеся в теплоту, невелики, поэтому для преобразователей даже при длительной их

работе достаточно воздушного охлаждения. КПД пьезоэлектрических преобразователей составляет 40...70 %.

Ультразвуковые концентраторы

Концентратор ультразвука представляет собой устройство для увеличения амплитуды колебательного смещения частиц среды, т.е. интенсивности ультразвука. Применяются два типа концентраторов: фокусирующие, или высокочастотные, и стержневые, или низкочастотные.

Фокусирующие концентраторы применяются главным образом для создания ультразвуковых колебаний высокой интенсивности с целью активного воздействия на различные вещества и объекты: в ультразвуковой технологии – для эмульгирования, диспергирования, гомогенизации, распыления, очистки, сушки и других процессов; в биологии – для уничтожения микроорганизмов, исследования влияния ультразвука на клетки и ткани организма, синтеза органических соединений и т.п.; в медицине – преимущественно в ультразвуковой хирургии.

Стержневые концентраторы (или трансформаторы скорости) служат для увеличения амплитуды колебаний преобразователя и согласования параметров преобразования и нагрузки в низкочастотном ультразвуковом диапазоне.

Стержневой концентратор представляет собой твердый стержень переменного сечения или плотности, присоединяемый к излучателю более широким концом или частью с большей плотностью материала. Принцип действия стержневых концентраторов основан на увеличении амплитуды колебательного смещения частиц стержня в результате уменьшения его поперечного сечения или плотности в соответствии с законом сохранения количества движения. При этом увеличение амплитуды смещения будет тем больше, чем больше различие диаметров или плотностей противоположных торцов стержня. Стержневые концентраторы применяются в ультразвуковой технологии в качестве составных частей акустических колебательных систем, работающих в диапазоне частот от 18 до 100 кГц.

Работают концентраторы, как правило, на резонансной частоте, т.е. их длина L должна быть кратна целому числу полувольт: $L = n\lambda/2$, где $n = 1, 2, 3...$

При заданной частоте длина волн зависит от формы концентратора вследствие дисперсии скорости распространения ультразвуковых волн в волноводах с переменным сечением. Концентраторы с переменной плотностью обычно изготавливают в виде соединенных между собой стержней из разных материалов длиной $\lambda/4$ с одинаковым поперечным сечением.

Максимальный линейный размер широкого конца концентратора должен быть меньше $\lambda/2$.

Коэффициентом усиления или трансформации концентратора называется соотношение амплитуды смещений (или скоростей) на его узком $A_0 (V_0)$ и широком $A_n (V_n)$ концах:

$$K = A_0 / A_n = V_0 / V_n .$$

Значение коэффициента усиления выбирают в зависимости от требуемых значений амплитуды смещений на рабочем торце инструмента. К примеру, если амплитуда смещений должна составлять 30...40 мкм, то, учитывая, что амплитуда колебаний магнитострикционного преобразователя в оптимальном режиме работы под нагрузкой составляет 5–6 мкм, общий коэффициент усиления должен составлять 6–7. Общее увеличение амплитуды в колебательной системе необходимо распределить между ступенями концентратора, т.е. между первой ступенью, соединяемой с преобразователем, и ступенью с инструментом. На практике, как правило, на первой ступени действует усиление в 2–2,5 раза, а в инструментах – в 2,5–3 раза.

Стержневые концентраторы классифицируют по следующим признакам:

- **по форме продольного сечения**: ступенчатые, конические, экспоненциальные, катеноидальные и ампульные;
- **по форме поперечного сечения**: круглые, клинообразные и др.;
- **по количеству последовательно соединенных резонансных концентраторов полуволновой длины**: одно-, двухступенчатые и т.д.

На рис. 1.7 показаны различные типы полуволновых концентраторов, а также распределение амплитуд смещений A_0 и напряжений σ для конического, экспоненциального, катеноидального и ступенчатого профилей (см. соответственно рис. 1.7, а–г).

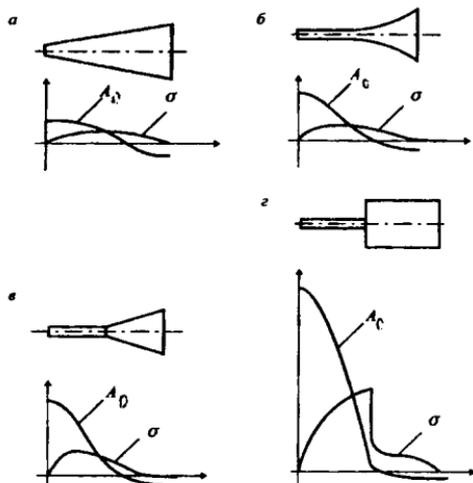


Рис. 1.7. Типы полуволновых концентраторов:
a – конический; *б* – экспоненциальный; *в* – катеноидальный; *z* – ступенчатый;
 A_0 – распределение амплитуд колебательных смещений по длине концентратора;
 σ – распределение напряжений

Переменную площадь по сечениям концентраторов можно обеспечить изменяя их внутренний профиль. Так, на рис. 1.8, *a*, *в* наружный профиль инструмента цилиндрический, а внутренний соответственно экспоненциальный и ступенчатый. В конструкции, представленной на рис. 1.8, *б*, как наружный, так и внутренний профили инструмента выполнены ступенчатыми.

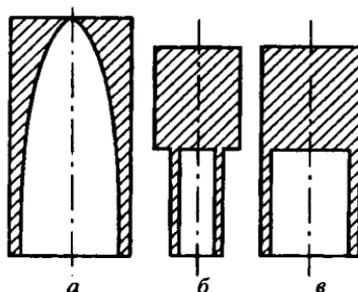


Рис. 1.8. Концентраторы с переменной площадью внутреннего сечения:
a, *в* – наружный профиль цилиндрический, внутренний соответственно экспоненциальный и ступенчатый;
б – наружный и внутренний профили ступенчатые

Для эффективной работы концентраторов важен не только правильный расчет их размеров, но и выбор материала с оптимальными акустическими и механическими свойствами. При передаче энергии ультразвука концентраторы находятся в сложном термомеханическом состоянии, которое характеризуется значительными знакопеременными нагрузками в сочетании с высокими температурами.

Поэтому материал для концентратора должен обладать высокой усталостной прочностью, малыми потерями, хорошо обрабатываться и паяться твердыми припоями, при необходимости и свариваться, а также быть сравнительно недорогим.

Минимальными потерями обладают титановые сплавы, которые обеспечивают наиболее высокую амплитуду колебаний инструмента. Так, экспериментально установлено, что амплитуда на торце концентраторов из титанового сплава, например BT5, в два раза больше амплитуды на торце концентраторов из стали 45.

Кроме того, концентраторы из титановых сплавов обладают довольно высокой усталостной прочностью. Таким образом, при сравнении сталей и титановых сплавов для изготовления концентраторов преимущество последних очевидно. Однако соединение титана непосредственно с никелем и другими магнитоотрицательными материалами крайне затруднено. Поэтому для таких преобразователей они, как правило, используются в качестве вторых ступеней.

У алюминиевых сплавов коэффициент потерь имеет ту же величину, что и у сталей, но их прочностные показатели уступают всем вышеперечисленным материалам.

Как показал опыт эксплуатации ультразвукового технологического оборудования, концентраторы можно изготовить и из углеродистых сталей 40 или 45. Эти стали недефицитны, хорошо обрабатываются, обладают достаточной усталостной прочностью и легко паяются твердыми припоями.

На эффективность работы ультразвуковой колебательной системы существенное влияние оказывает качество соединения преобразователя с концентратором и инструментом. При недостаточно плотном акустическом контакте в этих сопряжениях резко возрастают потери акустической энергии и происходит интенсивный нагрев в зонах сопряжений.

Соединение звеньев колебательной системы выполняют в узлах деформации или пучностях смещений, где механические напряжения

минимальны. Наиболее надежным способом соединения является пайка твердыми (ПСр-40, ПСр-50) и мягкими припоями (типа ПОС). Серебряные припои применяют для неразъемных соединений и при высоких требованиях к их прочности.

При изготовлении акустических колебательных систем с применением ферритовых преобразователей их соединение с концентратором выполняется на клею. У пьезокерамических преобразователей присоединение концентратора осуществляется посредством накладок и стяжных болтов.

При изготовлении колебательных систем со сменными инструментами (концентраторами) применяются резьбовые соединения, которые, во избежание самоотвинчивания, выполняются с мелким шагом.

Во всех случаях сопрягаемые поверхности колебательной системы должны быть тщательно обработаны, притерты и доведены. При использовании резьбовых соединений для обеспечения надежного акустического контакта между сопрягаемыми поверхностями помещается слой смазки.

Порядок выполнения работы

1. Получить у инженера ультразвуковые преобразователи и штангенциркуль. Фотографии общего вида магнитострикционного и пьезоэлектрического преобразователей соответственно приведены на рис. 1.9 и 1.10.

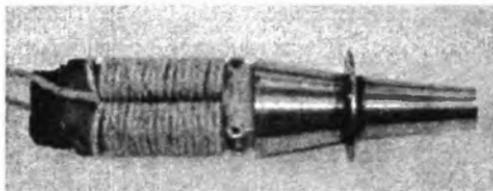


Рис. 1.9. Общий вид магнитострикционного преобразователя в сборе с коническим концентратором

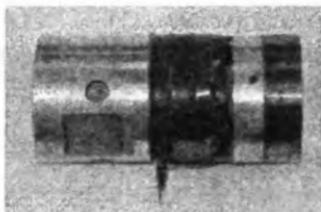


Рис. 1.10. Общий вид пьезокерамического преобразователя типа Ланжевена

2. Приступая к изучению конструкции магнитострикционного преобразователя, который выполнен в сборе с коническим концентратором, вначале необходимо определить расположение этих элементов на

реальной конструкции, для чего можно обратиться к рис. 1.1, где показаны основные элементы акустической колебательной системы технологического назначения.

3. Вычертить эскиз магнитострикционного преобразователя в сборе с коническим преобразователем, обратив внимание на то, что эти элементы соединены между собой посредством пайки серебряным припоем.

4. С помощью штангенциркуля измерить все геометрические размеры преобразователя и нанести их значения на эскиз.

5. Зная длину магнитострикционного пакета, которая равна половине длины продольной ультразвуковой волны (полуволновой преобразователь), определить ее численное значение для данного преобразователя.

6. Располагая значением длины волны λ и скоростью распространения звука в никеле ($C_{зв} = 4780$ м/с) по известной зависимости $f = C_{зв} / \lambda$ определить резонансную частоту магнитострикционного преобразователя.

7. Построить эпюру колебательных смещений и напряжений по длине магнитострикционного преобразователя, обратив внимание на то, что, во-первых, место расположения фланца на концентраторе должно совпадать с узловым сечением ультразвуковой волны, а, во-вторых, амплитуда колебательных смещений от широкого к узкому сечению концентратора должна возрастать.

8. Приступая к изучению пьезоэлектрического преобразователя типа Ланжевена, следует иметь в виду, что он имеет сборную конструкцию (рис. 1.10). Поэтому его необходимо предварительно разобрать. С этой целью следует:

- открутить стальную шайбу со стороны отражающей накладки;
- снять шайбу из сплава Д16Т;
- аккуратно снять с центральной (стягивающей) шпильки пьезоэлектрические пластины (4 штуки) с токоподводящими пластинами.

Элементы разобранного пьезокерамического преобразователя приведены на рис. 1.11.

9. Вычертить эскизы деталей, входящих в конструкцию преобразователя, не извлекая шпильку из излучающей (из сплава Д16Т) накладки.

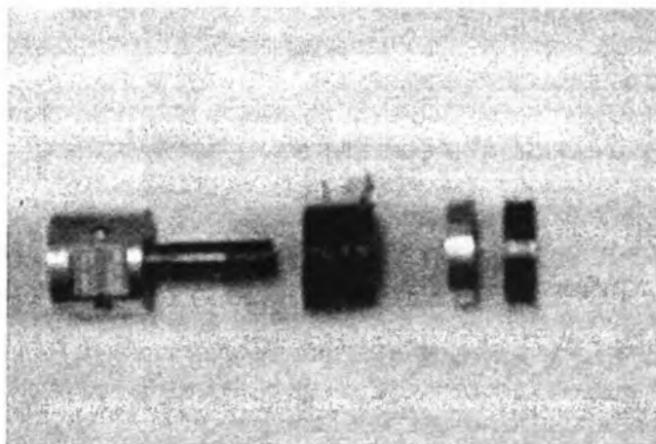


Рис. 1.11. Элементы разобранного пьезокерамического преобразователя

10. С помощью штангенциркуля измерить все линейные и диаметральные размеры деталей преобразователя и нанести их значения на соответствующие эскизы.

11. Оформить эскиз сборочного чертежа пьезоэлектрического преобразователя и определить линейный размер от середины пьезопластин до выходного торца изучающей накладки. Это расстояние равно четверти длины волны в ее материале, т.е. $\lambda/4$.

12. Располагая значением длины волны λ и скоростью распространения звука в сплаве Д16Т ($C_{зв} = 6400$ м/с), определить, как и в пункте 6, резонансную частоту пьезоэлектрического преобразователя.

13. Построить эпюру колебательных смещений и напряжений по длине полуволнового пьезоэлектрического преобразователя, исходя из того, что пучности колебаний располагаются на торцах отражающих и излучающих накладок, а узловое сечение находится посередине пьезопластин.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Схема акустической колебательной системы технологического назначения с указанием ее основных элементов.

4. Краткие сведения о принципе работы магнитострикционных и пьезокерамических ультразвуковых преобразователей.

5. Краткие сведения о концентраторах, применяемых в акустических колебательных системах.

6. Эскизы сборочных чертежей магнитострикционного и пьезокерамического ультразвуковых преобразователей с эпюрами распределения колебательных смещений и напряжений по их длине.

7. Результаты расчета резонансной частоты колебаний магнитострикционного и пьезокерамического ультразвуковых преобразователей.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных элементов состоит акустическая колебательная система технологического назначения?

2. Что положено в основу действия магнитострикционных ультразвуковых преобразователей?

3. В чем заключается квадратичность магнитострикционного эффекта и какие меры принимаются для его предотвращения?

4. Каким образом выполняется обмотка возбуждения на стержневых магнитострикционных преобразователях?

5. По какой причине металлические сердечники магнитострикционных преобразователей набирают из штампованных тонких листов или навивают из тонкой ленты?

6. В чем преимущества и недостатки ферритовых магнитострикционных преобразователей по сравнению с металлическими?

7. Что положено в основу действия пьезоэлектрических преобразователей?

8. Как разделяются все пьезоэлектрические материалы?

9. Из каких основных элементов состоит пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь типа Ланжевена?

10. Каково назначение и принцип работы концентраторов ультразвуковых колебаний?

11. Какие основные требования предъявляются к материалам концентраторов?

12. Каким образом соединяется концентратор с ультразвуковым преобразователем в магнитострикционных (металлических и ферритовых) и в пьезоэлектрических преобразователях?

Литература

1. Киселев, М.Г. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения: учебное. пособие / М.Г. Киселёв, В.Т. Минченя, Г.А.Есьман. – Минск: Тесей, 2003. – 424 с.
2. Ультразвук / под ред. И.П. Голяминой. – М.: Сов. энцикл., 1979. – 400 с.

Лабораторная работа №2

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Цель работы

1. Изучить методы и средства измерения электрических и механических параметров акустических колебательных систем, а также методы визуализации характера распределения акустического поля на поверхности колеблющейся механической системы.

2. С помощью фигур Хладни получить на поверхности колеблющегося образца картину распределения узловых линий и по ним определить форму колебаний, их резонансную частоту и построить эпюры колебательных смещений на его поверхности.

3. Оптическим методом определить амплитуду колебания свободного конца гибкой планки приспособления при различных значениях напряжения питания и вылета свободной планки.

Инструменты и принадлежности

1. Экспериментальная установка.
2. Ультразвуковой генератор.
3. Испытуемые образцы.
4. Мелкодисперсный абразивный порошок.
5. Консистентная смазка.
6. Гаечный ключ.
7. Приспособление для создания вынужденных колебаний.
8. Источник питания постоянного тока.
9. Штангенциркуль ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу, равной 0,05 мм.
10. Линейка с ценой деления 1 мм и пределом измерения не менее 200 мм.
11. Микроскоп МИМ-5.

Основные сведения о методах и средствах измерения параметров акустических колебательных систем

В процессе изготовления, отладки и эксплуатации акустических колебательных систем возникает необходимость измерения электрических, механических и энергетических параметров, в частности, силы тока, напряжения, соответствующих фазовых соотношений, мощности, частоты колебаний электрического тока, питающего преобразователь, а также амплитуды и частоты колебаний инструмента и энергии, поглощаемой в зоне обработки.

Измерение электрических параметров

Напряжение на выходе генератора измеряется обычными методами с помощью широко распространенных электростатических и электронных вольтметров и осциллографов.

Для измерения силы тока высокой частоты применяются амперметры с термопреобразователями, например, типов Т-14 и Т-18. Для измерения электрической мощности применяются схемы ваттметров, работа которых основана на использовании нелинейных характеристик некоторых преобразователей. В качестве последних используются диоды, вакуумные термопреобразователи и т.п.

В случае синусоидальной формы напряжения и тока на преобразователе и небольшой мощности акустической колебательной системы (до 100 Вт) возможно измерение потребляемой мощности методом трех вольтметров. При этом активное сопротивление R , включенное последовательно с нагрузкой, должно быть того же порядка, что и сопротивления преобразователя. Для этих условий мощность вычисляется по формуле

$$W = \frac{(U_H^2 + U_R^2 + U_{II}^2)}{2R},$$

где U_H, U_R, U_{II} — напряжения на выходе генератора, на сопротивлении R , и преобразователе.

Значение мощности, потребляемой преобразователем, приближенно может быть определено с помощью калориметрирования. В этом случае преобразователь погружают в ограниченный объем воды

и измеряют изменение температуры за фиксированное время его работы. Значение мощности вычисляют по формуле

$$W = \frac{0,24(c_1 m_1 + c_2 m_2) \Delta T}{\Delta t},$$

где c_1 и c_2 — теплоемкость воды и материала ванны;

m_1, m_2 — масса воды и материала ванны;

ΔT — температура нагрева воды;

Δt — время работы преобразователя.

Возможно применение метода калориметрирования, основанного на сравнении выделяющейся теплоты, создаваемой преобразователем и эквивалентным нагревательным элементом.

Значение резонансной частоты преобразователя определяется по максимальной потребляемой мощности при работе под нагрузкой. Для определения частоты используются цифровые частотомеры типов ЧЗ-35, ЧЗ-28, ЧЗ-4.

Определение активного, реактивного и полного сопротивления преобразователя на его резонансной частоте производится по формуле

$$Z = \frac{U_{\Pi}}{I_{\Pi}},$$

где Z — полное электрическое сопротивление;

I_{Π} и U_{Π} — напряжение и сила тока на преобразователе.

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{W_{\text{эл}}}{I_{\Pi} U_{\Pi}},$$

где $W_{\text{эл}}$ — активная электрическая мощность, потребляемая преобразователем.

Активное сопротивление

$$R = |Z| \cdot \cos \varphi.$$

Реактивное сопротивление

$$x = |Z| \cdot \sin \varphi;$$

$$Z = \sqrt{R^2 + x^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{|Z|}$$

Возможно определение полного сопротивления преобразователя методом трех вольтметров. Тогда величина $|Z|$ вычисляется по формуле

$$|z| = \frac{U_{\Pi} \cdot R}{U_R},$$

а коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{(U_{\text{H}}^2 - U_{\Pi}^2 - U_R^2)}{2U_{\Pi}U_R}.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением можно определять прямым методом, используя электронные фазометры.

Измерение механических параметров

Со значительными трудностями приходится сталкиваться при измерении механических параметров колебательной системы и, в частности, амплитуды колебательных смещений инструмента. Малые значения измеряемой величины в сочетании с высокой частотой регистрируемого процесса усложняют задачу и обуславливают значительную погрешность. В настоящее время для измерения амплитуды ультразвуковых колебаний используют различные методы, основанные на применении механических, оптических и электрических преобразователей.

В ряде случаев используется способ измерения с помощью механических индикаторных головок с ценой деления 0,001 мм. Методика измерения очень проста и заключается в следующем. Измерительный наконечник головки контактирует с исследуемой поверхностью акустической системы по нормали к направлению ее колебательных смещений. Затем последовательно фиксируются два положения стрелки прибора, соответствующие статическому положению поверхности, т.е. в отсутствие колебаний, и при ее возбуждении, при этом разность показаний определяет размах колебаний $2A_0$. Однако точность этого метода невелика и в зависимости от измеряемой величины оценивается в пределах 10...25 %.

Известен **электроконтактный метод измерения амплитуды колебаний**, схема которого приведена на рис. 2.1.

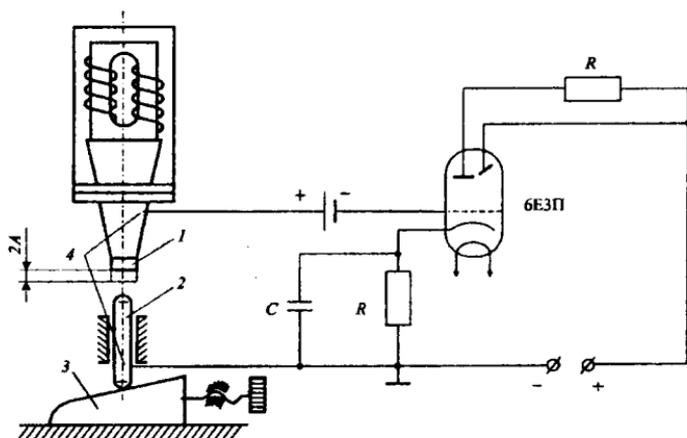


Рис. 2.1. Схема электроконтактного метода измерения амплитуды колебаний

К колеблющемуся с ультразвуковой частотой инструменту 1 при помощи устройства тонкой подачи (микрометрический винт) и клиновой передачи 3 (1:100) плавно подводится измерительный наконечник 2. Инструмент и измерительный наконечник электрически изолированы друг от друга и через контакты 4 включены в цепь управляющего электрода индикаторной лампы 6ЕЗП или 6Е5П. Как только измерительный наконечник коснется колеблющейся поверхности инструмента, цепь замыкается и потенциал управляющего электрода становится близким к потенциалу экрана, который будет све-

таться более ярко, что позволяет фиксировать момент контакта. В этом положении измерительного наконечника снимается отсчет на устройстве тонкой подачи. Затем колебания инструмента прекращаются, в результате чего контакт измерительного наконечника с инструментом размыкается. После этого измерительный наконечник вновь подводится до контакта с поверхностью инструмента и снимается второй отсчет. Разность отчетов позволяет определить величину размаха колебаний, т.е. удвоенное значение их амплитуды.

С целью устранения механического контакта измерительного наконечника с контролируемым образцом можно использовать электрическую схему, представленную на рис. 2.2.

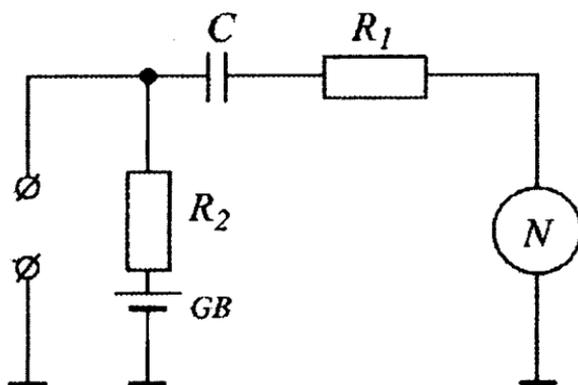


Рис. 2.2. Электрическая схема для электроконтактного измерения амплитуды колебаний

Методика измерения в этом случае аналогична вышерассмотренному варианту. Отличие состоит в том, что момент электрического контакта определяется по разряду конденсатора C через малый воздушный зазор между колеблющейся поверхностью инструмента и измерительным наконечником при плавном подведении последнего с помощью устройства тонкой подачи. Величина воздушного промежутка, соответствующая его пробое, может быть задана параметрами электрической схемы и составляет порядка $0,3 \dots 0,5$ мкм. Таким образом, разряд конденсатора происходит до наступления механического контакта, что при достаточно стабильной амплитуде колебаний превращает этот метод измерения в бесконтактный. Момент

разряда конденсатора фиксируется с помощью электронно-лучевого осциллографа. Погрешность данного метода не превышает ± 1 мкм и определяется главным образом нестабильностью замыкания контакта и плавностью подведения измерительного наконечника.

Из серийно выпускаемых наиболее распространенным прибором для измерения колебаний является бесконтактный виброметр типа УБВ-2 с пределами намерений от 0,5 до 100 мкм в диапазоне частот 8...40 кГц. Виброметр обеспечивает измерения с точностью ± 5 %. Некоторым ограничением применения этих приборов является требование относительно большого диаметра вибрирующей площади ($\varnothing 6$ мм).

Основным и наиболее надежным методом определения амплитуды ультразвуковых колебаний инструмента является оптический метод, где измерения производятся с помощью микроскопа. Этот метод позволяет достаточно просто определить амплитуду колебаний в любой точке системы, в которой распространяются продольные волны. Микроскоп должен быть оснащен комплектом сменной оптики с увеличением в пределах 100...500^x, осветителем, окуляром с сеткой и эталоном, по которому определяется цена деления сетки.

Измерение амплитуд колебаний осуществляется следующим образом. При отсутствии колебаний в поле микроскопа замечается характерная риска или точка. После включения ультразвука эта риска вытягивается в линию. Длина этой линии соответствует размаху колебаний, т.е. удвоенной амплитуде колебательного смещения рассматриваемой точки. Этот метод является единственным, который позволяет произвести градуирование любых других известных средств измерения. Однако он имеет свои недостатки. Во-первых, на практике сложно с достаточной точностью оценить амплитуду колебательных смещений на уровне 1–2 мкм. Во-вторых, он не позволяет осуществлять измерение амплитуды колебаний в зоне обработки.

В последнее время для измерения малых перемещений и вибраций широко применяются **бесконтактные фотоэлектрические преобразователи**. Принцип их действия основан на зависимости между расстоянием от измеряемой поверхности до источника света и количеством света, отраженным этой поверхностью, что поясняется схемой, представленной на рис. 2.3.

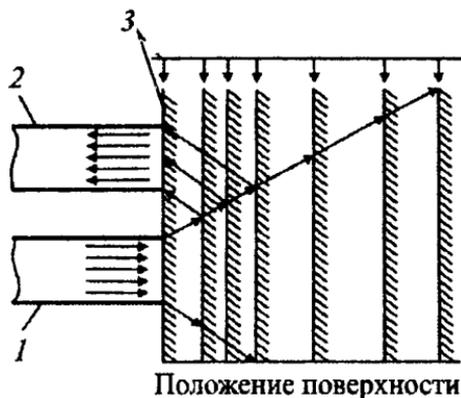


Рис. 2.3. Принципиальная схема измерения амплитуды колебания

Когда световод 1, передающий свет от источника на измеряемую поверхность, и световод 2, воспринимающий отраженный от нее свет и передающий его на фотозлемент, находятся в контакте с поверхностью 3, то свет не попадает на последний из них. По мере увеличения расстояния между световодами и поверхностью одновременно возрастает площадь последней, освещаемая источником света, а следовательно, увеличивается количество света, попадающего на воспринимающий элемент. Зависимость между расстоянием от световодов до поверхности и количеством отраженного света остается практически линейной (рис. 2.4) до тех пор, пока вся поверхность воспринимающего световода освещается отраженным светом, что на зависимости соответствует максимуму.



Рис. 2.4. Зависимость между измеряемым расстоянием и количеством отраженного света

При дальнейшем увеличении расстояния количество отраженного света, попадающего на воспринимающий световод, уменьшается.

Основной частью оптической системы преобразователя является измерительный зонд, представляющий собой световоды, собранные в цилиндрической оболочке. Чувствительность прибора зависит от характеристик зонда, которые, в свою очередь, определяются характеристиками световодов (их количеством, размерами, распределением по сечению зонда и аппертурным углом). Вблизи одного конца измерительного зонда световоды разделяются на две группы: одна служит для передачи падающего света, вторая – для передачи отраженного света к фотоэлементу. При этом существенным фактором, влияющим на чувствительность преобразователя, является распределение световодов по сечению зонда (рис. 2.5).

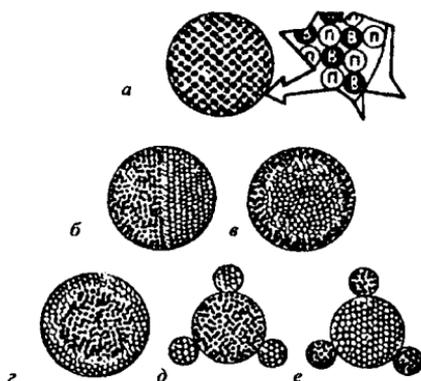


Рис. 2.5. Варианты распределения воспринимающих и передающих световодов по сечению зонда:
a – оптимальное; *b* – симметричное; *г, z* – круговое; *д, e* – случайное

С целью получения пологой характеристики оптимальным является распределение, при котором воспринимающий элемент окружен четырьмя передающими световодами. Для такого распределения (рис. 2.6) по мере увеличения расстояния между зондом и измеряемой поверхностью все большее число воспринимающих световодов будет освещаться от одного передающего световода.

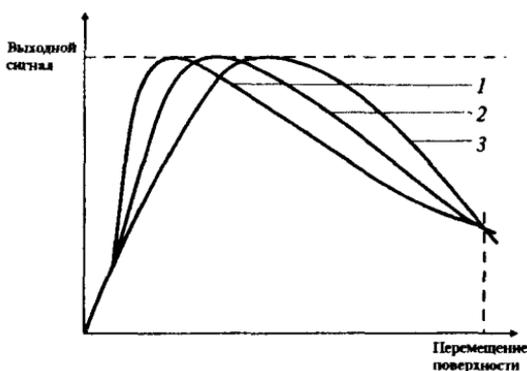


Рис. 2.6. Характеристики зондов одинакового размера и с равным числом световодов, но с различным распределением по сечению зонда: 1 — оптимальным; 2 — круговым; 3 — симметричным

Более дешевыми с точки зрения сборки являются зонды, у которых распределение световодов по сечению случайное, а их характеристика близка к оптимальной.

В зависимости от геометрии измеряемой поверхности сечение зонда также может иметь различную форму (прямоугольник, квадрат, полукруг, овал, шестиугольник). Правильный выбор формы особенно важен, когда один или два размера измеряемой поверхности меньше сечения зонда. В этом случае часть света будет уходить за его границу, сокращая тем самым эффективную поверхность зонда. Чтобы исключить данное положение при измерении цилиндрической поверхности, сечение зонда должно быть минимальным (в виде прямоугольника), причем большая его ось должна располагаться параллельно оси цилиндра. В этом случае цилиндрическая поверхность с наибольшим приближением будет измеряться как плоскость. Одновременно следует учитывать, что с уменьшением диаметра зонда, т.е. диаметра световодов, возрастают потери, что обуславливает необходимость сокращения его длины.

В зависимости от частоты измеряемого сигнала для регистрации светового потока могут применяться различные фотоэлементы. Так, при использовании фотодиода верхний частотный предел составляет 2 МГц. Для регистрации перемещений с малой частотой используется фотосопротивление.

Характеристика преобразователя имеет три участка (см. рис. 2.6). На первом с увеличением измеряемого расстояния выходной сигнал возрастает. Он является практически линейным и принимается рабочим. В т о р о й участок (падающая часть) также может быть использован для измерений. Он более пологий по сравнению с первым, и, следовательно, диапазон измеряемых перемещений здесь будет большим. Т р е т и й участок близок к точке максимума, в которой выходной сигнал является функцией только отражающей способности измеряемой поверхности. Таким образом, выходной сигнал, за исключением точки максимума, является, с одной стороны, функцией отражающей способности поверхности, а с другой — расстоянием между нею и зондом. Необходимо добиться того, чтобы выходной сигнал был функцией только измеряемого расстояния.

На рис. 2.7 приведена схема, поясняющая метод автоматической компенсации влияния отражающей способности поверхности.

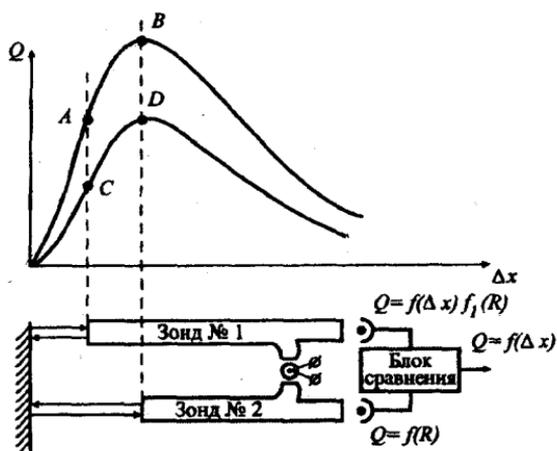


Рис. 2.7. Схема автоматической компенсации влияния отражающей способности поверхности

Несмотря на то, что при изменении отражающей способности поверхности точка максимума смещается, отношение двух точек остается постоянным. Так, расстояние между точками A и B на верхней кривой равно расстоянию между точками C и D на нижней. Следовательно, можно использовать два зонда, освещаемые одним

источником, но имеющие для фиксирования отраженного света отдельные фотоэлементы, закрепленные на различном расстоянии от измеряемой поверхности.

Предположим, что один зонд работает на линейном участке характеристики, а второй достиг точки максимума. Тогда выходной сигнал первого зонда является функцией перемещения поверхности Δx и отражающей способности R , т.е. $Q = f(\Delta x)g(R)$. Для второго зонда выходной сигнал является функцией только R . Две эти зависимости могут быть сравнены в блоке сравнения, а выходной сигнал будет однозначно зависеть только от измеряемого расстояния Δx .

Подобного типа приборы имеют следующие технические характеристики:

- способ измерения – бесконтактный;
- диапазон измерения – 0,15 мм;
- точность измерения – ± 1 мкм;
- частотный диапазон – до 100 кГц.

Эти приборы могут быть использованы для измерения любой поверхности, имеющей отражающую способность. К области их применения могут быть отнесены измерения вибраций и колебаний, включая ультразвуковые; измерения перемещений, отражающей способности поверхности, а также измерения различных физических величин, которые могут быть преобразованы в перемещение.

Методы визуализации акустических полей на колеблющейся поверхности

В ряде случаев при разработке сложных акустических колебательных систем, генерирующих, например, изгибные, продольно-изгибные, продольно-радиальные, крутильные и другие типы волн, важно иметь информацию о характере распределения акустического поля по поверхности колеблющейся механической системы.

Характер распределения узловых линий (сечений) на поверхности колеблющегося тела можно определить (визуализировать) с помощью так называемых фигур Хладни. Они образуются в результате накапливания вблизи узловых линий мелких сухих частиц абразива или песка, насыпанного на колеблющуюся поверхность пластинки, диска или другой механической системы. Каждому собственному колебанию пластинки соответствует свое расположение

узловых линий. Например, при возбуждении свободной круглой пластины в ее центре в зависимости от моды колебаний узловые линии могут быть в виде концентрических окружностей или в виде радиально расходящихся лучей. Меняя места закрепления и возбуждения, а также форму колеблющейся поверхности, можно получить разнообразные фигуры Хладни. Их удобно использовать для исследования характера распределения акустического поля на поверхности колеблющихся механических систем.

Кроме фигур Хладни для визуализации характера распределения интенсивности акустического поля на колеблющейся поверхности могут применяться методы, основанные на тепловом воздействии ультразвука или на его способности ускорять процессы диффузии. Для реализации тепловых эффектов могут быть использованы термочувствительные краски или жидкие кристаллы, нанесенные тонким слоем на исследуемую поверхность. На способности ультразвука ускорять процессы диффузии основаны фотодиффузионные методы визуализации акустических полей. В этом случае фотобумагу накладывают на исследуемую поверхность и смачивают проявителем, и в местах, где интенсивность ультразвуковых колебаний выше, диффузия проявителя в желатине больше, и фотобумага в этих местах чернеет быстрее. В результате на фотобумаге образуется картина, представляющая собой сочетание черных и более светлых зон, соответствующих характеру распределения интенсивности ультразвука на исследуемой поверхности.

Описание экспериментальной установки

Для выполнения практической части лабораторной работы по визуализации акустических полей с помощью фигур Хладни применяется экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 2.8, а ее общий вид показан на рис. 2.9.

Экспериментальная установка состоит из массивного основания 1, на котором вертикально установлена стойка 2. На ней смонтирован кронштейн 3, который имеет возможность перемещаться по стойке 2. На конце кронштейна в вертикальном положении закреплен пьезо-керамический ультразвуковой преобразователь 6. При этом он установлен таким образом, что излучающий торец конического концентратора находится вверх.

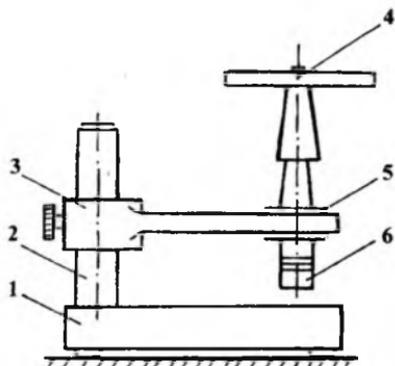


Рис. 2.8. Принципиальная схема экспериментальной установки

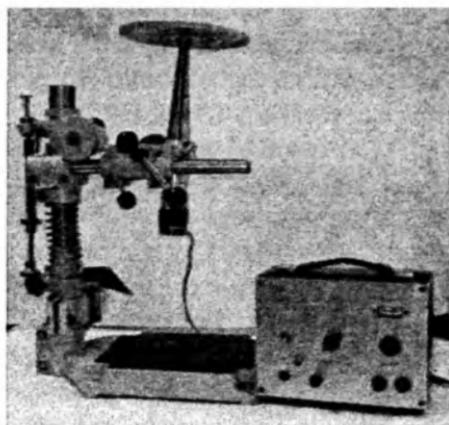


Рис. 2.9. Общий вид экспериментальной установки

На выходном торце концентратора предусмотрено резьбовое отверстие М6 для закрепления исследуемых образцов 4. На кронштейне 3 ультразвуковой преобразователь 6 крепится с помощью фланца 5, который посредством трех равнорасположенных винтов закрепляется в узлом сечении концентратора.

Общий вид ультразвукового преобразователя приведен на рис. 2.10. Этот прибор состоит из пьезокерамического преобразователя типа Ланжевена и трансформатора колебательной скорости, состоящего из двух конических концентраторов полуволновой длины.

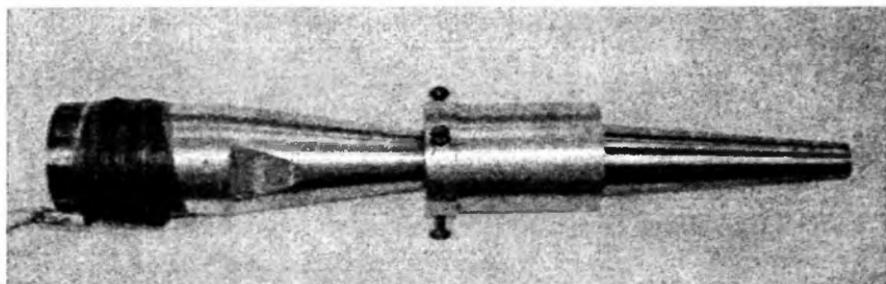


Рис. 2.10. Общий вид пьезокерамического ультразвукового преобразователя

Питание преобразователя осуществляется от малогабаритного ультразвукового генератора, изображение панели управления которого приведено на рис. 2.11.

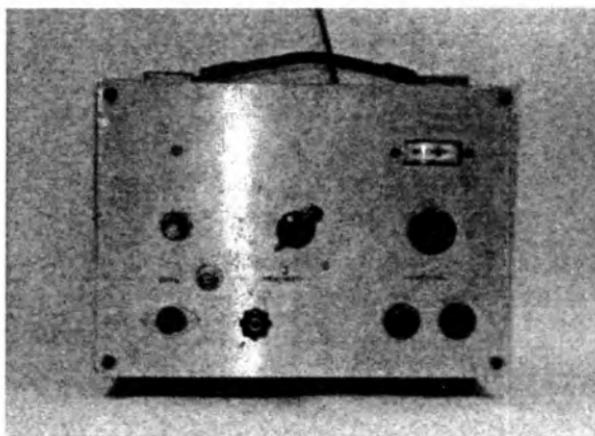


Рис. 2.11. Панель управления ультразвукового генератора

На панели расположен тумблер «Сеть» для включения генератора. При его верхнем положении осуществляется питание ультразвукового преобразователя. Ниже тумблера расположены разъемы для подключения ультразвукового преобразователя. В верхней правой части панели расположены индикатор резонансного возбуждения преобразователя; под ним ручка «Частота» для плавного изменения частоты питания ультразвукового преобразователя, внизу – гнезда для плавких предохранителей. В центральной части панели расположена ручка «Мощность» для изменения выходной мощности генератора.

Для получения и исследования фигур Хладни в работе используются образцы различной формы и размеров (рис. 2.12). В частности, диски из различного металла, имеющие различный диаметр и толщину, а также образцы в виде пластин.

Для выполнения практической части лабораторной работы по освоению оптического метода измерения амплитуды колебаний используется приспособление для создания колебаний, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.13.

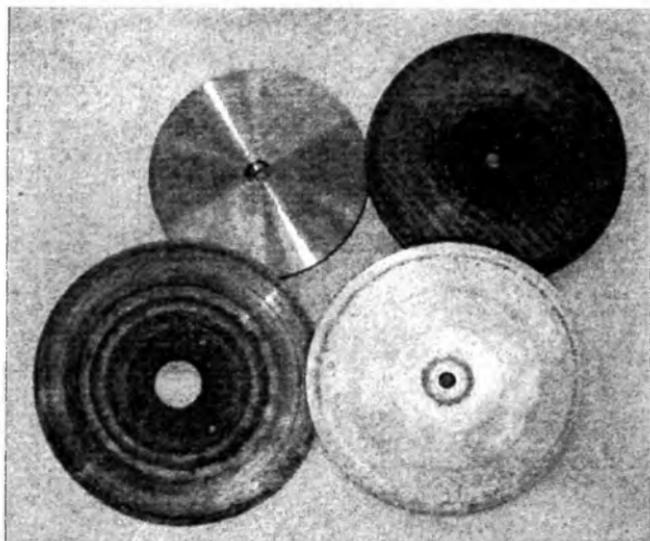
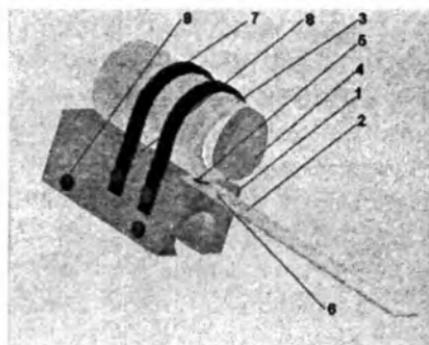


Рис. 2.12. Образцы, используемые для получения фигур Хладни



а



б

Рис. 2.13. Приспособление для создания колебаний:
а – принципиальная схема; б – общий вид

Приспособление состоит из основания 1, на котором одним концом закрепляется гибкая планка 2. Над планкой находится микроэлектродвигатель 3 постоянного тока мод. ДПМ-25-Н1-03. На валу электродвигателя закреплен кулачок 4, выполненный из пластмассы

или резины. Вылет гибкой планки регулируется с помощью зажимного винта 5, устанавливаемого в ряд отверстий 6, выполненных на гибкой планке. Крепление электродвигателя 3 к основанию 1 осуществляется двумя хомутами 7 с помощью винтов 8. Зажимные винты 9 (по два с каждой стороны) используются для установки основания на штативе. Приспособление работает следующим образом. Электродвигатель подключается к источнику питания и приводится во вращение. За один оборот вала электродвигателя кулачок 4 соприкасается с гибкой планкой у основания приспособления ближе ее закрепленного конца и смещает планку на определенное расстояние. В результате такого периодического воздействия свободный конец планки совершает вынужденные колебания, амплитуда которых может регулироваться как вылетом гибкой планки 2, так и частотой вращения электродвигателя 3.

Порядок выполнения работы

1. Визуализация акустических полей с помощью фигур Хладни:

1.1. Получить у преподавателя образцы, подлежащие исследованию.

1.2. С помощью штангенциркуля и линейки измерить геометрические размеры выбранных образцов и оформить на них рабочие чертежи.

1.3. С помощью винта М6 и предусмотренного в образце отверстия закрепить образец на выходном торце концентратора ультразвукового преобразователя. При этом для обеспечения надежного акустического контакта на торцевую поверхность концентратора предварительно нанести тонкий слой консистентной смазки. Затем произвести окончательную затяжку болта с помощью гаечного ключа, придерживая при этом образец рукой от поворота.

1.4. Для удаления возможных загрязнений верхнюю (рабочую) поверхность установленного образца тщательно протереть с помощью чистой ветоши.

1.5. Взять щепотку мелкодисперсного абразива и с высоты 150...200 мм над поверхностью образца, как показано на рис. 2.14, равномерно нанести его на исследуемую поверхность.

1.6. Включить тумблер «Сеть» на панели ультразвукового генератора.

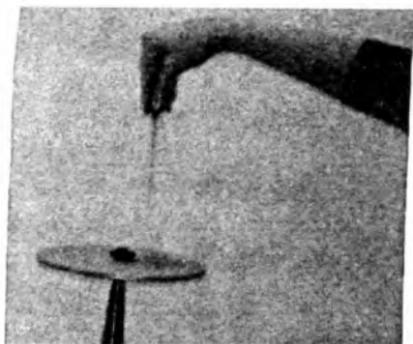


Рис. 2.14. Нанесение порошка на контролируемую поверхность образца

1.7. Плавно изменяя частоту генератора путем поворота ручки «Частота», внимательно наблюдать за поведением абразивных частиц на поверхности образца.

1.8. На определенной частоте генератора происходит резонансное возбуждение акустической системы «ультразвуковой преобразователь – испытуемый образец» и последний начинает совершать колебания определенной формы, а абразивные частицы располагаются по соответствующим узловым линиям, образуя фигуры Хладни. Примеры таких фигур, полученных на диске, показаны на рис. 2.15.

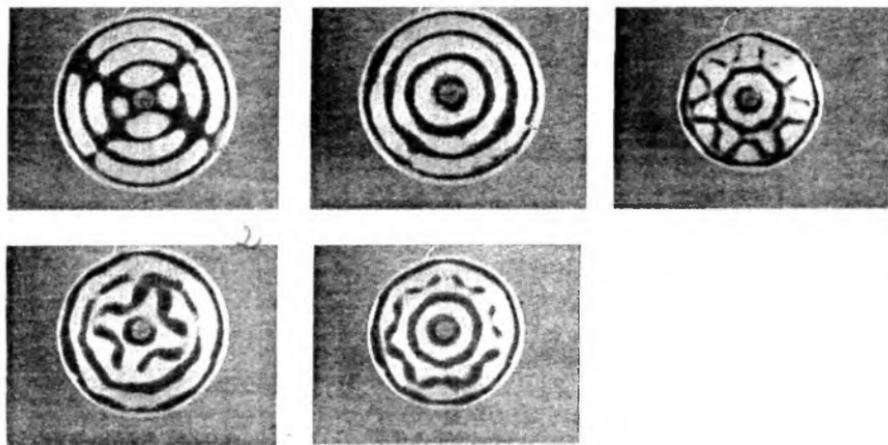


Рис. 2.15. Фигуры Хладни, полученные на поверхности колеблющегося диска

1.9. После получения фигур Хладни на данной частоте возбуждения преобразователя отключить на генераторе тумблер «Сеть».

1.10. Измерить геометрические параметры полученной фигуры Хладни и нанести их на чертеж образца.

1.11. Включить тумблер «Сеть» на панели ультразвукового генератора и, продолжая изменять его частоту путем дальнейшего поворота ручки «Частота», добиться установления новой формы колебаний образца с формированием на его поверхности соответствующей фигуры Хладни.

1.12. После получения заданной фигуры отключить тумблер «Сеть» на генераторе, измерить параметры полученных фигур Хладни и нанести их на чертеж образца.

1.13. По завершении изменения частоты генератора во всем диапазоне раскрепить испытуемый образец и заменить его другим в соответствии с полученным заданием.

1.14. На новом образце повторить все действия согласно пунктам 1.3–1.12. По результатам проведенных исследований определить форму колебаний образцов и построить эпюры колебательных смещений на их поверхностях.

2. Освоение оптического метода измерения амплитуды колебаний:

2.1. С помощью зажимного винта закрепить гибкую планку на основании таким образом, чтобы обеспечивался наибольший вылет планки.

2.2. При помощи стопорных винтов закрепить приспособление на штативе и установить последний на лабораторном столе около микроскопа МИМ-5.

2.3. Установить штатив 1 с приспособлением 2 для создания колебаний относительно микроскопа МИМ-5 таким образом, чтобы свободный край гибкой планки 3 был расположен перпендикулярно предметному столу 4 микроскопа МИМ-5 на расстоянии 0,5...1 см от его поверхности, как показано на рис. 2.16. При этом торец свободного края гибкой планки должен быть расположен на оптической оси тубуса 5 микроскопа.

2.4. Наблюдая в окулярную головку, добиться резкого изображения торца свободного края гибкой планки, перемещая окулярную головку по колонке.

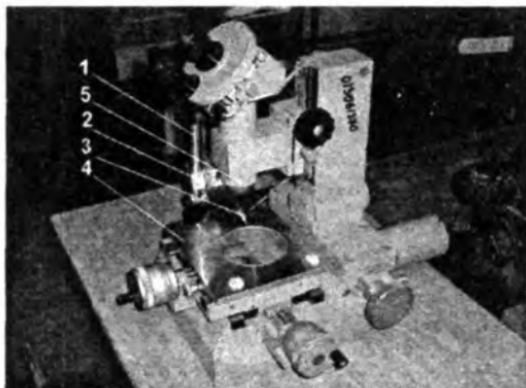


Рис. 2.16. Характер установки приспособления на штативе и его ориентации относительно микроскопа с целью определения амплитуды колебаний оптическим методом

2.5. Перемещая штатив с приспособлением, центр торца свободного края гибкой планки совместить с центром перекрестия штриховой сетки окуляра микроскопа.

2.6. Подключить микроэлектродвигатель приспособления к источнику питания постоянного тока. Вращением против часовой стрелки рукоятки регулирования напряжения питания установить его значение на ноль.

2.7. Включить источник питания и вращением по часовой стрелке рукоятки регулирования напряжения питания установить его значение 1 В. При этом электродвигатель приспособления начнет вращаться и кулачком начнет периодически отгибать планку. В результате этого свободный конец гибкой планки начнет колебаться.

2.8. Наблюдая в окуляре микроскопа размытое вытянутое изображение края торца свободного конца гибкой планки, с помощью штриховой сетки окуляра микроскопа оценить длину размытого изображения.

2.9. Произведя измерение длины изображения, установить размах колебаний свободного конца гибкой планки, разделив полученное значение на увеличение визирного микроскопа. При этом необходимо учесть, что общее увеличение микроскопа равно произведению увеличения окуляра микроскопа ($10\times$) на увеличение сменного объектива, кратность увеличения которого может равняться 1, 1,5, 3 или $5\times$ и которое записывается на корпусе объектива. Вычислить амплитуду ко-

лебаний свободного конца гибкой планки, разделив измеренное значение размаха колебаний на два. Результат расчета занести в таблицу.

**Результаты измерений и вычислений
при оптическом методе определения амплитуды колебаний**

№ опыта	Напряжение питания электродвигателя приспособления, В	Вылет свободного конца гибкой планки, мм	Измеренная амплитуда колебаний, мм

2.10. Вращением по часовой стрелке рукоятки регулирования увеличить напряжение питания на 1 В.

2.11. Повторить все действия согласно пунктам 2.8–2.10, постепенно увеличивая напряжение питания электродвигателя приспособления до максимально возможного, равного 15 В.

2.12. Снять приспособление со штатива, отвернуть зажимной винт и переместить гибкую планку до совпадения отверстия на основании приспособления с соседним отверстием на гибкой планке, уменьшив таким образом вылет свободного конца гибкой планки.

2.13. Повторить все действия согласно пунктам 2.2–2.12, последовательно уменьшая вылет свободного конца гибкой планки до минимально возможного.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Основные сведения о методах и средствах измерения электрических и механических параметров акустических колебательных систем с приведением схем измерения амплитуды колебаний.
4. Схема экспериментальной установки.
5. Результаты исследований, представленные в виде рабочих чертежей (эскизов) испытанных образцов с нанесенными на их поверхностях фигурами Хладни, а также построенные с их помощью эпюры колебательных смещений на поверхностях испытанных образцов.
6. Схема приспособления для создания колебаний.
7. Результаты измерений амплитуды колебаний оптическим методом.

Контрольные вопросы

1. Какие методы и средства применяются для измерения электрических параметров акустических колебательных систем?
2. В чем заключается сущность определения мощности, потребляемой преобразователем, методом калориметрирования?
3. В чем заключается методика измерения амплитуды колебаний электроконтактным методом?
4. Назовите достоинства и недостатки оптического метода измерения амплитуды ультразвуковых колебаний.
5. Какая зависимость положена в основу измерения амплитуды колебаний с помощью фотоэлектрических преобразователей и какие характерные участки она имеет?
6. Из каких основных элементов состоит прибор для измерения амплитуды колебаний фотоэлектрическим методом?
7. Какая схема измерения амплитуды колебаний фотоэлектрическим методом применяется для компенсации влияния отражающей способности контролируемой поверхности?
8. Какие методы применяются для визуализации акустических полей на колеблющейся поверхности?
9. В чем заключается механизм образования на колеблющейся поверхности фигур Хладни?

Литература

1. Киселев, М.Г. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения: учебное пособие / М.Г. Киселёв, В.Т. Минченя, Г.А. Есьман. – Минск: Тесей, 2003. – 424 с.
2. Киселев, М.Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М.Г. Киселёв, В.Т. Минченя, В.А. Ибрагимов. – Минск: Тесей, 2001. – 344 с.
3. Ультразвук: маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голяниной. – М., 1979. – 400 с.

Лабораторная работа №3

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

Цель работы

1. Изучить основные закономерности процесса ультразвуковой очистки, а также технологию и оборудование для ее осуществления.
2. Экспериментально определить интенсивность ультразвука в установке УЗУ-0,25 и ее электроакустический КПД.
3. Оценить кавитационную стойкость загрязнения, нанесенного на алюминиевую фольгу.

Инструменты и принадлежности

1. Ультразвуковая установка УЗУ-0,25.
2. Мерная емкость для воды.
3. Жидкостный термометр с ценой деления 1°C .
4. Секундомер.
5. Алюминиевая фольга.
6. Перманентный маркер.

Основные сведения о механизме ультразвуковой очистки

Ультразвуковая очистка представляет собой способ очистки поверхностей твердых тел от жировых и механических загрязнений, при котором в моющий раствор вводятся ультразвуковые колебания. Применение ультразвука позволяет интенсифицировать процесс очистки, заменить ручной труд, при этом получить высокую степень чистоты поверхности, а также исключить использование огнеопасных, токсичных и дорогостоящих растворителей. Ультразвуковая очистка нашла широкое применение в машиностроении, металлургической, электронной промышленности, в полупроводниковой технике, в приборостроении для очистки прецизионных деталей точных приборов, часов и ювелирных изделий, интегральных схем и деталей радиоаппаратуры, хирургических инструментов, металлокерамических фильтров, металлургического проката и др.

В основе механизма ультразвуковой очистки поверхностей лежит ряд явлений, возникающих в жидкости при возбуждении в ней ультразвуковых волн значительной интенсивности. Это, в частности, кавитация, акустические течения, звуковое давление и звукокапиллярный эффект. Эффективность протекания процесса очистки зависит от акустических параметров накладываемого ультразвукового поля – частоты колебаний и их интенсивности, а также от физико-химических свойств моющей жидкости. Это ее вязкость, упругость насыщенного пара, поверхностное натяжение, степень газосодержания. За счет выбора параметров ультразвукового поля и жидкостей с определенными физико-химическими свойствами можно целенаправленно управлять интенсивностью протекания явлений, обуславливающих ультразвуковую очистку. Помимо этого на эффективность очистки оказывают влияние и внешние факторы, такие как температура и гидростатическое давление в жидкости. В процессе ультразвуковой очистки происходит разрушение поверхностных пленок загрязнений, отслаивание и удаление загрязнений, их эмульгирование и растворение. На рис. 3.1 приведена схема, отражающая взаимосвязь различных факторов, влияющих на механизм ультразвуковой очистки.



Рис. 3.1. Схема влияния различных факторов на механизм ультразвуковой очистки

Акустическая кавитация

Существенную роль в механизме ультразвуковой очистки играет **явление кавитации**, которое заключается в образовании в жидкости пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром, газом или их смесью. Различают **акустическую кавитацию**, возникающую при прохождении звуковой волны большой интенсивности, и **гидродинамическую**, обусловленную сильным локальным понижением давления в жидкости вследствие больших скоростей течения.

В интенсивной звуковой волне во время полупериодов растяжения возникают кавитационные пузырьки, которые резко захлопываются после перехода в область повышенного давления. Это сопровождается появлением в жидкости сильных гидродинамических возмущений, вызывающих разрушение поверхностей твердых тел, граничащих с кавитирующей областью жидкости. Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление P в жидкости становится ниже некоторого критического значения $P_{кр}$, соответствующего порогу кавитации. Для идеальной однородной чистой жидкости вероятность спонтанного образования пузырьков становится заметной лишь при достаточно больших растягивающих напряжениях, например, для воды теоретическая величина $P_{кр}$ близка к $1,5 \cdot 10^5$ Па. У реальных жидкостей в обычных условиях разрывы ее сплошности возникают при данной температуре. Это связано с тем, что в реальных жидкостях всегда содержится множество парогазовых нерастворенных пузырьков и мельчайших частиц различных размеров, представляющих собой так называемые зародыши кавитации.

Количественно момент возникновения кавитации характеризуют **числом кавитации**

$$\chi = \frac{P_0 - P_n}{P_a},$$

где P_0 – гидростатическое давление жидкости;

P_n – давление насыщенного пара;

P_a – амплитуда звукового давления.

Момент возникновения кавитации характеризуют **критическим числом** кавитации $\chi_{кр}$, которому соответствует критическое значение звукового давления $P_{кр}$. Следует подчеркнуть, что обе эти величины зависят от многих параметров, характеризующих как состояние жидкости – газосодержание, температура, наличие примесей, так и звуковое поле – частота, длительность излучаемого импульса и т.д. С увеличением температуры жидкости интенсивность кавитации растет до определенного максимума, пройдя который она начинает падать. Эффективность кавитации повышается при увеличении мощности, но понижается с ростом частоты ультразвуковых колебаний, а при очень высоких частотах получить кавитацию вообще невозможно.

Кавитация возникает при колебаниях пузырьков, радиусы которых находятся в широком интервале значений от $R_{кр}$ до $R_{рез}$. Пузырьки, размеры которых меньше $R_{кр}$, в ультразвуковой кавитации при заданном гидростатическом давлении P_0 участвовать не будут. Часть пузырьков, собственная резонансная частота которых соизмерима с частотой приложенного ультразвукового поля, сокращается (захлопывается) с большой скоростью, вызывая возникновение сферических ударных волн с высокими интенсивностями импульсов давления. Другая часть пузырьков, собственные частоты которых далеки от частоты ультразвукового поля, совершает сложные негармонические колебания, а сам этот процесс принято называть **псевдокавитацией**. Таким образом, при распространении в жидкости ультразвуковых колебаний на конечной стадии захлопывания и в начале вторичного расширения кавитационной полости возникают мощные кратковременные импульсы давления, величина которых может достигать нескольких тысяч атмосфер. Кроме того, в кавитационной области действуют интенсивные микропотоки, порождаемые пульсирующими пузырьками. В результате вещество в кавитационной области подвергается интенсивным воздействиям, что сопровождается разрушением поверхности твердых тел, находящихся в этой области, а само явление называется **кавитационной эрозией**. Ни одно из известных твердых веществ не оказывается стойким против кавитационного разрушения, а это означает, что силы, вызывающие разрушения, гораздо больше сил сцепления самих твердых тел. Пузырьки, совершающие колебательное движение,

так же, как и захлопывающиеся, оказывают разрушающее действие на поверхности раздела жидкости и твердого тела.

Звукокапиллярный эффект

Звукокапиллярный эффект заключается в аномально глубоком проникновении жидкости в капилляры и узкие щели под воздействием ультразвука. Если в наполненную жидкостью ультразвуковую ванну погрузить капилляр, то при определенной интенсивности ультразвука, соответствующей развитой кавитации, подъем жидкости в капилляре резко возрастает. При этом жидкость поднимается по капилляру под воздействием ультразвука только в том случае, когда кавитационная область, состоящая из пульсирующих и захлопывающихся кавитационных пузырьков, находится непосредственно под капилляром.

Звукокапиллярный эффект обуславливается суммарным воздействием единичных импульсов со значительным давлением, которые возникают при захлопывании кавитационных пузырьков. Поэтому скорость и высота подъема жидкости в капилляре зависят от числа захлопывающихся пузырьков и величины возникающих при этом импульсов давления, а также вязкости жидкости и величины ее сил трения о стенки капилляра. Из-за интенсивности акустических течений положение захлопывающихся пузырьков в основании капилляра неустойчиво. Поэтому нарушение локации в окрестностях основания капилляра кавитационных пузырьков и уход из сечения капилляра приводит к мгновенному опусканию жидкости до уровня определенного действия сил поверхностного натяжения.

Акустические течения

Акустические течения представляют собой регулярные течения среды, возникающие в интенсивном звуковом поле. Они появляются как в свободном неоднородном звуковом поле, так и вблизи различного рода препятствий, причем всегда имеют вихревой характер. С увеличением интенсивности звука скорость акустических течений возрастает, но она обычно не превышает значения колебательной скорости частиц в звуковой волне.

Возникновение акустических течений обусловлено законом сохранения количества движения и заключается в том, что переносимое звуковой волной количество движения, связанное с колебаниями частиц среды, при поглощении волны передается среде, вызывая тем самым ее регулярное движение. Поэтому скорость акустического течения пропорциональна коэффициенту поглощения звука и его интенсивности.

В зависимости от соотношения характерного масштаба течения и длины звуковой волны $\lambda = \frac{2\pi}{k}$, где k – волновое число, различают акустические течения трех типов:

1) течения в свободном неоднородном поле, когда характерный масштаб течения определяется размером неоднородности, например радиусом звукового пучка r (рис. 3.2, а);

2) течения в стоячих волнах, масштаб которых определяется длиной волны (рис. 3.2, б);

3) течения в пограничном слое вблизи препятствий, расположенных в акустическом поле (рис. 3.2, б).

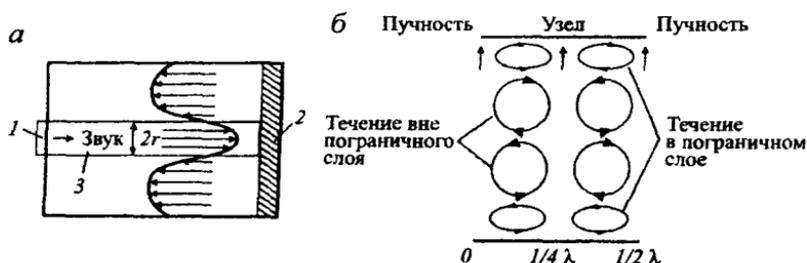


Рис. 3.2. Схемы акустических течений:

а – схема течения жидкости под действием ограниченного пучка звука:

1 – излучатель звука; 2 – поглотитель звука; 3 – звуковой пучок;

б – схема течений жидкости в стоячих волнах и пограничном слое

На явлении акустических течений основано действие некоторых типов насосов, удобных для работы в агрессивных средах. Возникновение акустических течений у поверхности препятствий, помещенных в звуковое поле, существенно увеличивает процессы массо- и теплопередачи через их поверхность, что является одним из факторов, обуславливающих ультразвуковую очистку.

Виды загрязнений

Исследования механизма ультразвуковой очистки с помощью скоростной киносъемки показали, что в зависимости от того, насколько прочно загрязнение связано с очищаемой поверхностью, ведущую роль играют те или иные процессы. При этом разрушение слабо связанных загрязнений происходит главным образом под действием пульсирующих (незахлопывающихся) кавитационных пузырьков.

В этом случае (рис. 3.3) на краях пленки загрязнений пульсирующие пузырьки, совершая интенсивные колебания, преодолевают силы сцепления пленки с поверхностью, проникая под нее, а затем разрывают и отслаивают пленку загрязнений. Звукокапиллярный эффект способствует проникновению моющего раствора в микropоры, неровности и глухие каналы. Благодаря действию акустических течений осуществляется ускоренное удаление загрязнений с поверхности.

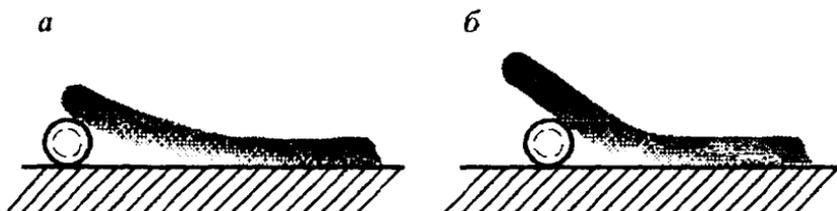


Рис. 3.3. Процесс разрушения пленки загрязнения пульсирующими кавитационными пузырьками:

a – начальная стадия; *б* – стадия разрушения пленки: 1 – пульсирующий пузырек; 2 – пленка загрязнения; 3 – очищаемая поверхность

В том случае, когда загрязнения прочно связаны с поверхностью, для их разрушения и удаления с поверхности необходимо наличие захлопывающихся кавитационных пузырьков, создающих микроударное воздействие на очищаемую поверхность.

Исходя из этого, с точки зрения ультразвуковой очистки поверхностные загрязнения можно классифицировать по следующим основным признакам:

– по способности противостоять микроударному действию кавитации, т.е. по тому, является ли поверхностная пленка загрязнений

кавитационно стойкой или кавитационно нестойкой. В тех случаях, когда кавитационная стойкость загрязнений выше кавитационной стойкости материала, во избежание повреждений очищаемых деталей ультразвуковую очистку применять не рекомендуется;

- прочности связи пленки загрязнения с очищаемой поверхностью. Исходя из этого признака, подбирают необходимую интенсивность ультразвука и продолжительность его воздействия;

- химическому взаимодействию загрязнения с моющей жидкостью. Это позволяет определить возможность растворения или эмульгирования загрязнений в моющих растворах.

На практике наиболее часто встречающимися видами поверхностных загрязнений являются следующие:

- жировые пленки, которые слабо связаны с очищаемой поверхностью и химически взаимодействуют с водными растворами, но устойчивы по отношению к кавитации;

- лаковые пленки и краски, которые также кавитационно стойки, но отличаются прочной связью с поверхностью;

- окалина и окисные пленки, обладающие кавитационной стойкостью и прочной связью с поверхностью и взаимодействуют лишь с агрессивными средами;

- продукты коррозии, которые также прочно связаны с поверхностью и взаимодействуют с агрессивными средами, но являются кавитационно нестойкими;

- металлическая пыль и шлам после травления, которые слабо связаны с очищаемой поверхностью, являются кавитационно нестойкими и сравнительно легко удаляются.

Влияние физико-химических свойств моющей жидкости

При выборе состава моющей жидкости в первую очередь необходимо, чтобы она химически взаимодействовала только с поверхностными загрязнениями, но не вступала в химические реакции с материалом деталей во избежание их повреждения. В тех случаях, когда кавитационная стойкость загрязнений, например пригаров формовочной земли на поверхности алюминиевых деталей, выше кавитационной стойкости материала самой детали, применять ультразвуковую очистку не следует, так как это приводит к разрушению поверхности детали.

Следует подчеркнуть, что на протекание процессов, обеспечивающих ультразвуковую очистку, существенное влияние оказывают физико-химические свойства моющего раствора. Так, повышение упругости пара внутри пузырьков резко снижает интенсивность кавитации. С этих позиций применение для ультразвуковой очистки водных растворов более эффективно, чем использование органических растворителей, упругость пара в которых значительно выше. Вместе с тем при ультразвуковой очистке прецизионных деталей полупроводниковой и электронной техники, изделий радиоэлектронной аппаратуры, когда важно снизить микроударные нагрузки во избежание повреждений миниатюрных, ажурных конструкций, используют органические растворители с достаточно высокой упругостью пара.

На эффективность процесса оказывает влияние **поверхностное натяжение жидкости**. Так, в конечной стадии сжатия пузырьков под действием возрастающей силы поверхностного натяжения увеличивается скорость их захлопывания, а соответственно повышается микроударное действие кавитации. Но, с другой стороны, с возрастанием поверхностного натяжения повышается порог кавитации и уменьшается количество кавитационных пузырьков. Помимо этого с увеличением поверхностного натяжения жидкости ухудшаются процессы смачивания поверхности очищаемых деталей за счет снижения проникающей способности моющего раствора в узкие щели, зазоры и отверстия. На практике, как правило, стремятся уменьшить величину поверхностного натяжения моющих растворов, для чего пользуются добавками поверхностно-активных веществ. Они улучшают смачиваемость и создают на поверхности загрязнений тончайшие адсорбционные слои, которые способствуют более легкому их отрыву при ультразвуковом воздействии.

Вязкость жидкости в зависимости от интенсивности ультразвукового поля оказывает противоположное влияние на эффективность очистки. Так, в ультразвуковых полях малой интенсивности с ростом вязкости увеличиваются потери акустической энергии, в то время как при большой интенсивности ультразвука в сильновязких жидкостях создаются благоприятные условия для интенсификации кавитационного воздействия. Дело в том, что силы вязкого трения аналогично избыточному статическому давлению препятствуют расширению кавитационного пузырька после того, как в звуковой волне

наступила стадия сжатия. В результате начальная стадия сжатия кавитационного пузырька наступает несколько раньше, совпадая с началом сжатия волны, за счет чего возрастает скорость и сокращается время его захлопывания, а, соответственно, повышается микроударное воздействие.

Газосодержание жидкости также сложным образом влияет на эффективность ультразвуковой очистки. С одной стороны, увеличение содержания газа в пузырьке вызывает снижение эрозионной активности жидкости, а, с другой, усиленная дегазация жидкости за счет действия акустических течений и радиационного давления обуславливает сокращение числа центров кавитации, что также снижает эффективность ультразвуковой очистки. Для того чтобы достигнуть оптимального газосодержания, регулируют процесс дегазации или специально в моющий раствор вводят газ.

Важным технологическим параметром процесса ультразвуковой очистки является **температура применяемой жидкости**, причем для каждой из них существует определенный температурный интервал, в котором обеспечивается наивысшая эффективность очистки. Так, для водных растворов оптимальная температура жидкости находится в пределах 40...50 °С, при более низкой температуре снижается химическая активность раствора. С ростом температуры растворимость газов в жидкости падает, что увеличивает число зародышей кавитации, но одновременно растет упругость пара в образовавшейся полости, что снижает кинетическую энергию кавитационных и пульсирующих пузырьков. Поэтому при использовании органических растворителей для того, чтобы снизить упругость пара, ультразвуковую очистку производят при температуре жидкости 15...20 °С.

В качестве органических растворителей применяют бензин, четыреххлористый углерод, ацетон, трихлорэтилен, фреон и др. Наиболее приемлемыми для ультразвуковой очистки являются фреоновые композиции, которые обладают высокой растворяющей способностью, малой токсичностью, взрывобезопасностью и возможностью регенерации.

Водные щелочные растворы, которые по сравнению с органическими растворителями обладают рядом преимуществ: дешевизной, нетоксичностью, пожаробезопасностью, применяются для ультразвуковой очистки деталей от смазок, полировочных паст, металлической пыли, абразивов и т.д.

В тех случаях, когда необходимо снять окалину и нагар, пользуются травильными растворами серной, соляной, азотной и других кислот различной концентрации в зависимости от металла очищаемой заготовки.

Влияние параметров ультразвукового поля

Ультразвуковая очистка зависит от интенсивности кавитации, скорости и характера акустических трений, величины радиационного давления, которые, в свою очередь, при прочих постоянных условиях определяются амплитудой и частотой колебаний излучателя.

Увеличение частоты приводит к сокращению времени роста и уменьшению максимального радиуса кавитационной полости при постоянном значении амплитуды звукового давления. В свою очередь, снижение радиуса кавитационных полостей способствует повышению давления парогазовой смеси в пузырьке к началу захлопывания, что уменьшает интенсивность ударных микроволн. Кроме того, с ростом частоты колебаний возрастает поглощение акустической энергии. С другой стороны, чрезмерное снижение частоты колебаний приводит к резкому возрастанию шума установок и усложняет их звукоизоляцию, а также увеличивает резонансные размеры излучателя. Поэтому большинство промышленных установок для ультразвуковой очистки работает в диапазоне частот от 18 до 44 кГц.

Амплитуда колебаний определяет интенсивность ультразвукового поля в жидкости и поэтому оказывает первостепенное влияние на процесс очистки. При этом существует предельное значение интенсивности колебаний, превышение которого приводит к увеличению амплитудного значения давления, и кавитационный пузырек вырождается в пульсирующий. Помимо этого при большой интенсивности происходит экранирование ультразвукового поля кавитационным облаком вблизи излучателя, что увеличивает расход энергии. При слишком малых интенсивностях эффективность очистки падает, так как и кавитация, и все вторичные эффекты, возникающие в жидкости при введении ультразвуковых колебаний, становятся слабо выраженными. Интервал интенсивностей колебаний при ультразвуковой очистке составляет от 0,5 до 10 Вт/см².

Технология ультразвуковой очистки

Весь технологический процесс ультразвуковой очистки включает в себя операции, предшествующие звуковой очистке, непосредственно ультразвуковую очистку и операции, следующие за очисткой.

Подготовку загрязненной поверхности к ультразвуковой очистке осуществляют путем замачивания деталей в воде, моющем растворе или органических растворителях. Это позволяет снять с деталей основное количество загрязнений и сократить время их последующей ультразвуковой очистки в 2...4 раза. Для замачивания деталей, загрязненных доводочными пастами, рекомендуется применять ацетон, фреон, бензин, керосин. Однако при наличии в составе загрязнений жирных кислот и парафинов замачивание деталей в легколетучих растворителях нецелесообразно. Эти растворители, вымывая легкорастворимые жидкие компоненты пасты, засушивают и уплотняют загрязнения, что значительно затрудняет процесс их последующей ультразвуковой очистки. Для мелких деталей со слабо связанными загрязнениями замачивание перед их ультразвуковой очисткой вообще не рекомендуется проводить.

Оптимальный режим очистки зависит от характера загрязнений, состава и температуры моющего раствора, материала и состояния поверхности деталей, метода очистки и интенсивности ультразвука. Выбор метода очистки определяется конструкцией детали или сборочной единицы, а также требованиями к состоянию их поверхностей. К числу наиболее распространенных методов ультразвуковой очистки относится метод погружения, метод очистки введением излучателя в полость очистки, контактный и непрерывно-последовательный. Очистка может выполняться как при нормальном, так и повышенном статическом давлении. Для очистки прецизионных деталей, имеющих высокоточные поверхности с малой шероховатостью, применение повышенного статического давления не рекомендуется, так как может происходить кавитационная эрозия доведенных поверхностей.

При очистке **методом погружения** мелкие детали помещают в сетчатые корзины или барабаны и погружают в ультразвуковую ванну, располагая их как можно ближе к поверхности излучателей, т.е. в зоне наибольшей активности ультразвука. С целью обеспечения высококачественной очистки всей поверхности деталей бараба-

ны непрерывно вращаются либо совершают качательные движения в ванне относительно излучателей. В результате детали в процессе очистки непрерывно поворачиваются, и таким образом все их участки оказываются в зоне ультразвукового воздействия.

На рис. 3.4 приведена схема механизированной ультразвуковой ванны для очистки мелких деталей с их принудительным перемещением в ультразвуковом поле. В дно ультразвуковой ванны встроены преобразователи. Очищаемые детали помещаются в загрузочные сетчатые барабаны, которым от привода сообщается равномерное вращательное движение. Кроме того, в конструкции ванны предусмотрены системы циркуляции и фильтрации моющего раствора, а также пульт управления.

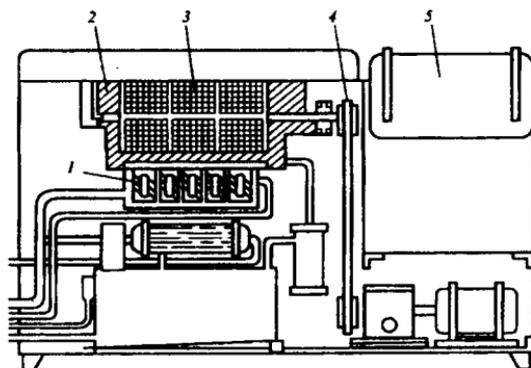


Рис. 3.4. Схема механизированной ультразвуковой ванны:
1 – преобразователи; 2 – корпус ванны; 3 – загрузочные сетчатые барабаны;
4 – привод; 5 – пульт управления

При выборе условий ультразвуковой очистки необходимо иметь в виду, что при кавитационном воздействии на деталь может возникнуть нежелательное явление – эрозия прецизионных поверхностей. Следует подчеркнуть, что процесс эрозии деталей в ультразвуковом поле наступает через определенный промежуток времени. Дело в том, что в начальный период при захлопывании кавитационных пузырьков происходит пластическое деформирование поверхности детали, что даже улучшает ее эксплуатационные показатели. Однако в дальнейшем при многократном воздействии кавитационных пузырьков появляются усталостные микротрещины, приводящие

к отрыву части металла. Отсюда следует, что при ультразвуковой очистке прецизионных деталей сложной конфигурации необходимо реализовать условия, при которых время очистки всех поверхностей детали было бы значительно меньше времени начала кавитационной эрозии поверхностей деталей, расположенных у излучателя.

Метод очистки детали введением излучателей в зону обработки применяется для деталей, имеющих глубокие отверстия, канавки, карманы и другие полости. В этом случае очистка производится специальными волноводами, работающими как с продольными, так и с изгибными колебаниями. Колебательные системы с продольными колебаниями целесообразно применять в тех случаях, когда глубина отверстия или полости не превышает четверти длины волны в излучателе. В случаях очистки более глубоких отверстий применяются излучатели с изгибно-колеблющейся трубкой, длина которой может достигать 10...20 длин волн изгибных колебаний. Для очистки внутренних поверхностей цилиндров большого диаметра могут применяться погружные устройства, в которых используются радиальные колебания полых излучателей. Применение излучателей указанных типов позволяет значительно ускорить процесс очистки деталей сложной конфигурации, а в ряде случаев является единственным методом высококачественной очистки.

Например для очистки глубоких отверстий малого диаметра (от 4 до 8 мм), а также локальной очистки отдельных деталей применяются специальные ручные ультразвуковые головки (рис. 3.5). В очищаемое отверстие вводится трубчатый волновод, в котором от магнито-стрикционного преобразователя возбуждаются изгибные колебания. С помощью диафрагмы акустическая система прикрепляется к корпусу с рукояткой. В этом случае преобразователь охлаждается непосредственно моющим раствором, поступающим через штуцер и через трубчатый волновод выходящим в зону очистки. В рукоятке установлен курок-выключатель.

Контактный метод целесообразно применять для очистки внутренних полостей тонкостенных изделий, доступ к которым ограничен или затруднен. В этом случае ультразвуковые колебания передаются стенкам очищаемых изделий, и уже они работают как излучатель ультразвука. Источником колебаний служит магнито-стрикционный преобразователь большой мощности (4 кВт). Очищаемая труба с помощью пневматического привода зажимается между

цилиндрическим волноводом и полуволновой опорой, образуя резонансную акустическую систему (рис. 3.6). Очищаемая труба постепенно перемещается в осевом направлении, а во внутреннюю ее полость от насоса подается моющий раствор. В тех случаях, когда необходимо одновременно очистить и наружную поверхность, трубу помещают в ванну с моющим раствором. Для очистки длинных труб применяются кольцевые излучатели, в которых заготовки соосно перемещаются.

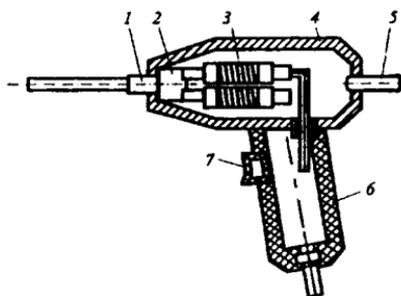


Рис. 3.5. Устройство для очистки глубоких отверстий:
 1 – волновод; 2 – диафрагма; 3 – магнитострикционный преобразователь;
 4 – корпус; 5 – штуцер для подачи моющего раствора;
 6 – рукоятка; 7 – курок-выключатель

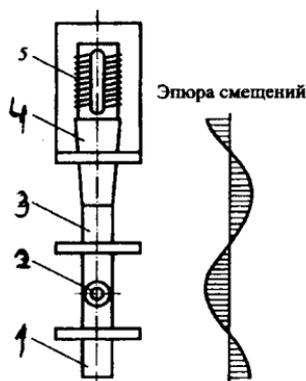


Рис. 3.6. Схема установки для ультразвуковой очистки внутренних полостей труб:
 1 – полуволновая опора; 2 – труба; 3 – инструмент;
 4 – ультразвуковой концентратор; 5 – преобразователь

При использовании этого метода для очистки прецизионных деталей необходимо иметь в виду следующие обстоятельства:

- контакт с излучателем прецизионной поверхности детали может вызвать ее повреждение;
- возбуждение в детали знакопеременных напряжений может вызвать ухудшение ее геометрической формы.

Таким образом, применение контактного метода можно рекомендовать с учетом вышеотмеченных положений.

Для ультразвуковой очистки крупногабаритных деталей, а также движущихся заготовок целесообразно применять **непрерывно-последовательный метод**, при котором очищаемое изделие перемещается над поверхностью излучателя. Следует подчеркнуть, что этот метод отличается высокой производительностью и степенью автоматизации. Именно поэтому он широко применяется на крупных металлургических предприятиях в условиях непрерывной работы производства.

На рис. 3.7 приведена схема ультразвуковой ванны для очистки стальной полосы при поточном производстве. В этом случае полоса стали шириной более 1 м, движущаяся в потоке со скоростью 100...150 м/мин, проходит через ультразвуковую ванну, заполненную моющим щелочным раствором. При вертикальном движении полосы в ванне с двух сторон от нее на расстоянии 10...15 мм установлены блоки с магнестрикционными преобразователями общей мощностью 300 кВт.

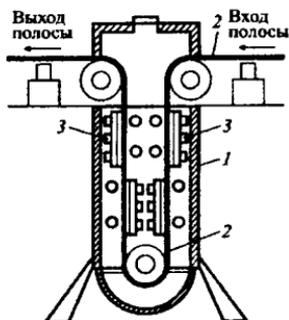


Рис. 3.7. Схема ультразвуковой ванны для очистки стальной полосы при поточном производстве:

- 1 – ванна со щелочным раствором; 2 – движущаяся полоса стали;
3 – блоки с преобразователями

После выполнения операции ультразвуковой очистки деталей необходимо удалить остатки моющего раствора и затем подготовить их к межоперационному или складскому хранению. Требования к состоянию поверхности детали определяются особенностями операций, следующих за очисткой, а также условиями и длительностью хранения. Как правило, заключительные операции включают удаление остатков моющего раствора, пассивацию и сушку деталей.

Ультразвуковая установка УЗУ-0,25

Ультразвуковая установка УЗУ-0,25 предназначена для очистки мелких деталей и может быть использована для мойки медицинского инструмента, ювелирных изделий, а также различных прецизионных деталей. Она состоит из ультразвукового генератора и ультразвуковой ванны. Общий вид ультразвуковой установки УЗУ-0,25 приведен на рис. 3.8.

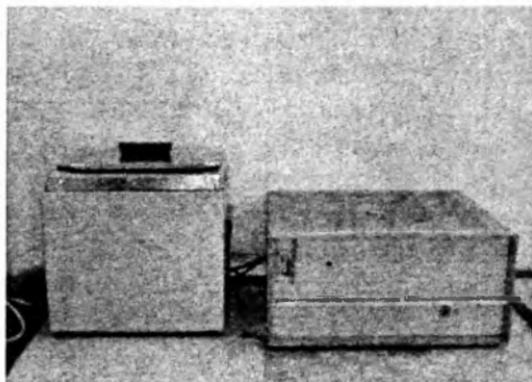


Рис. 3.8. Общий вид ультразвуковой установки УЗУ-0,25

Технические характеристики ультразвуковой установки УЗУ-0,25.

Мощность генератора, кВт:	
выходная	0,25
потребляемая	0,45
Напряжение питающее сетевое, В	220
Преобразователь	пьезокерамический

Число преобразователей	3
Частота, Гц:	
питающей сети генератора	50
Габариты генератора, мм:	
в плане, не более	380 × 360
высота, не более	210
Габариты ванны, мм:	
в плане, не более	320 × 270
Высота, не более	300
Внутренние габариты рабочей ванны, мм	200 × 168
Глубина рабочей ванны, мм	158
Масса установки, кг	30

Конструктивно генератор выполнен в виде шасси с присоединенной к нему передней панелью и закрывается легкоъемным кожухом.

На передней панели расположены тумблер включения генератора и лампочка, сигнализирующая о наличии напряжения питания.

На задней стенке шасси генератора находятся патрон для предохранителя и два штепсельных разъема, посредством которых генератор соединяется с ультразвуковой ванной и питающей сетью, и клемма для заземления генератора.

Все элементы задающего генератора, предварительного усилителя и усилителя мощности размещены на двух съемных панелях, закрепленных на шасси. Общее охлаждение генератора – естественное, через перфорацию в дне и кожухе генератора.

Ультразвуковая ванна состоит из отсека ультразвуковой очистки. В дно этого отсека вмонтированы три пакетных преобразователя, как показано на рис. 3.9. Пакет преобразователя состоит из двух пьезоэлектрических пластин из материала ЦТС-19, двух частотопонижающих накладок (рабочей накладки из дюралюминия Д16, отражающей накладки из стали 45) и центрального болта из нержавеющей стали 12Х18Н9Т, головка которого является излучающим элементом преобразователя.

Присоединение элементов преобразователя к ванне осуществляется с помощью центрального болта, проходящего через соответствующее отверстие в дне ванны, пьезоэлектрических пластин, верхней накладки и навинчивающейся нижней (отражающей) накладки.

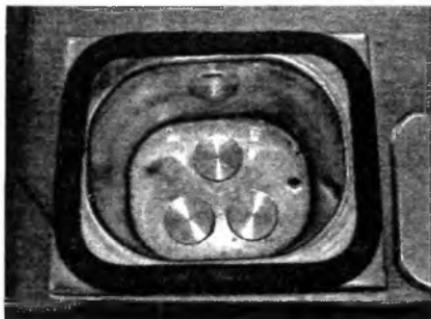


Рис. 3.9. Отсек ультразвуковой очистки с тремя ультразвуковыми преобразователями

Ультразвуковая ванна изготовлена из нержавеющей стали 12Х18Н9Т толщиной 1 мм. На кожухе ванны расположены штуцер, ручка крана с надписью «Слив», клемма для заземления ванны и штепсельный разъем для соединения с генератором.

Порядок выполнения работы

1. С ультразвуковой ванны снять звукозащитную крышку.
2. С помощью ручки с надписью «Слив» закрыть кран на сливном штуцере ванны, для чего перевести его в положение закрыто («З»).
3. С помощью штангенциркуля измерить диаметр излучающей накладке преобразователя в ванне. Полученное значение занести в табл. 3.1 в графу « $d_{пр}$ ».
4. С помощью мерной емкости залить в ванну 2 л водопроводной воды.
5. Произвести опробование установки путем включения тумблера на генераторе в верхнее положение. При этом должна загореться сигнальная лампочка и появиться рабочий звук кавитирующей жидкости. О появлении кавитации можно судить по образованию на преобразователях ванны мельчайших подвижных пузырьков. Продолжительность опробования не должна превышать 10 с.
6. На верхнюю часть ванны установить пластину из органического стекла.
7. В предусмотренное в пластине отверстие установить жидкостный термометр таким образом, чтобы его резервуар погрузился в воду на глубину 5...10 мм.

8. По истечении 1,5-2 мин после установления теплового равновесия снять показание на шкале термометра и зафиксированное значение температуры воды занести в табл. 3.1 в графу « t_1 , °С».

9. Перевести тумблер на генераторе в верхнее положение и одновременно запустить секундомер.

10. Произвести озвучивание воды в ванне в течение 2 мин, после чего отключить генератор, переведя тумблер в нижнее положение.

11. Снять показание по шкале термометра и зафиксированное значение температуры воды занести в табл. 3.1 в графу « t_2 , °С».

12. Рассчитать значение акустической мощности, излучаемой преобразователем в воду, по следующей зависимости:

$$P_{\text{ак}} = \frac{cm(t_2 - t_1)}{\tau},$$

где: c – теплоемкость воды ($c = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$);

m – масса воды, находящейся в ванне;

t_1 и t_2 – соответственно начальная температура воды и температура после ее озвучивания;

τ – продолжительность озвучивания воды.

13. Определить значение интенсивности ультразвука в воде, принимая площадь излучающей поверхности источника равной суммарной площади S_{Σ} трех излучающих накладок пьезоэлектрических преобразователей, по формуле

$$I = \frac{P_{\text{ак}}}{S_{\Sigma}}.$$

14. Определить электроакустический КПД преобразователя $\eta_{\text{эа}}$, характеризующий потери в процессе преобразования электрической энергии в акустическую, по зависимости

$$\eta_{\text{эа}} = \frac{P_{\text{ак}}}{P_{\text{э}}},$$

где $P_{\text{ак}}$ – акустическая мощность;

P_3 – электрическая мощность, подводимая от генератора к преобразователям (см. технические характеристики ультразвуковой установки УЗУ-0,25).

15. Дать оценку кавитационной стойкости загрязнения и кавитационной стойкости материала, а также заключение о целесообразности применения ультразвукового метода очистки загрязнений для алюминиевой фольги. Для этого на проволочной петле необходимо закрепить кусочек фольги и на неё нанести загрязнение с помощью перманентного маркера (рис. 3.10). Погрузить проволочную петлю с кусочком закрепленной фольги в ванну и сориентировать ее так, чтобы поверхность фольги находилась напротив одной из излучающих накладок преобразователя на расстоянии 4...5 см.



Рис. 3.10. Проволочная петля с закрепленной на ней фольгой с загрязнением

16. Перевести тумблер на генераторе в верхнее положение и одновременно запустить секундомер.

17. Произвести озвучивание воды в ванне в течение 2 мин. Во время озвучивания воды в ванне наблюдать за характером воздействия кавитирующей жидкости на поверхность фольги (на ее поверхности возникают кратковременные деформации в виде углублений сферической формы).

18. Отключить генератор, переведя тумблер на нем в нижнее положение, и извлечь из ванной проволочную петлю с фольгой.

19. Дать заключение о кавитационной стойкости загрязнения на алюминиевой фольге, оценив с помощью микроскопа состояние поверхности фольги на ее чистом и загрязненном участках. Изучить на микроскопе характер разрушения фольги, сравнив поверхности

фольги до (для этого взять у преподавателя образец, не подвергавшийся обработке) и после ультразвуковой очистки.

Измеренные данные и полученные результаты свести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений и вычислений энергетических показателей ультразвуковой установки УЗУ–0,25

№ п/п	Измерено						Вычислено		
	$d_{пр}$, м	m , кг	S_{Σ} , м ²	τ , с	t_1 , °С	t_2 , °С	$P_{ак}$, Вт	I , Вт/м ²	$\eta_{эв}$, %

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Краткие сведения о явлениях, положенных в основу ультразвуковой очистки.
4. Основные сведения о технологии ультразвуковой очистки.
5. Устройство ультразвуковой установки УЗУ-0,25.
6. Результаты измерений и расчетов.
7. Оценка кавитационной стойкости загрязнения и кавитационной стойкости материала, а также заключение о целесообразности применения ультразвукового метода очистки загрязнений для алюминиевой фольги.

Контрольные вопросы

1. Какие основные явления лежат в основе механизма ультразвуковой очистки?
2. В чем заключается сущность возникновения акустической кавитации?
3. Как классифицируются загрязнения с точки зрения ультразвуковой очистки?
4. Как на эффективность процесса ультразвуковой очистки влияют поверхностное натяжение жидкости, ее вязкость, газосодержание и температура?

5. Как на эффективность процесса ультразвуковой очистки влияют амплитуда и частота колебаний?
6. Из каких основных операций состоит технологический процесс ультразвуковой очистки?
7. Назовите основные методы ультразвуковой очистки и области их применения.
8. Из каких основных узлов состоит ультразвуковая установка УЗУ-0,25?
9. Преобразователи какого типа применены в ультразвуковой установке УЗУ-0,25?
10. В чем заключается методика определения электроакустического КПД ультразвукового преобразователя?

Литература

1. Киселев, М.Г. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения: учебное пособие / М.Г. Киселёв, В.Т. Минченя, Г.А. Есьман. – Минск: Тесей, 2003. – 424 с.
2. Ультразвук / под ред. И.П. Голяминой. – М.: Сов. энцикл., 1979. – 400 с.

Лабораторная работа № 4

ЗВУКОКАПИЛЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ В ЖИДКОСТЯХ

Цель работы

1. Изучить механизм и закономерности проявления звукокапиллярного эффекта в жидкости, а также основные сведения о явлении ультразвуковой кавитации.

2. Получить экспериментальные зависимости высоты подъема воды в капилляре от положения его торца относительно излучающей поверхности ультразвукового преобразователя и диаметра капиллярного отверстия.

Инструменты и принадлежности

1. Ультразвуковая установка УЗУ-0,25.
2. Стекланные капиллярные трубки с различным диаметром отверстий.
3. Короткие образцы стекланных капиллярных трубок, закрепленные на пластине.
4. Емкость для воды.
5. Приспособление для закрепления капиллярной трубки и регулирования положения ее торца относительно излучающей поверхности ультразвукового преобразователя.
6. Микроскоп МИМ-5.
7. Пластмассовая линейка с пределом измерения 200 мм и ценой деления 1 мм.

Основные сведения о звукокапиллярном эффекте

Эффект аномального подъема жидкости в капиллярах и глубокого проникновения в узкие щели при воздействии ультразвука носит название **звукокапиллярного эффекта**. При этом высота подъема и глубина проникновения значительно превышают соответствующую величину, обусловленную силами поверхностного натяжения жидкости.

Проникновение жидкости в пористые тела происходит под действием разности капиллярного и гидростатического давлений. Капиллярное давление заставляет жидкость подниматься по капилляру:

$$P_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{R_k},$$

где σ – поверхностное натяжение на поверхности раздела жидкость – твердое тело, Н/м;

θ – краевой угол, характеризующий способность жидкости смачивать поверхность, радиан (если $\theta < \pi/2$, то жидкость смачивает твердое тело);

R_k – радиус кривизны поверхности капилляра, м.

Гидростатическое давление столба жидкости P_r стремится выдавить жидкость из капилляра и вычисляется по формуле

$$P_r = \rho gh,$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение силы тяжести м/с²;

h – высота столба жидкости, м.

В результате разности давлений $\Delta P = P_k - P_r$ жидкость приходит в движение.

По вертикальному капилляру жидкость поднимается на высоту

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g R}. \quad (4.1)$$

В капиллярах с сечением неправильной формы образуется несколько языков жидкости, поднимающихся по желобкам стенок капилляра с малым радиусом кривизны на большую высоту, чем в капиллярах круглого сечения.

Скорость подъема U жидкости в цилиндрическом капилляре составляет

$$U = \frac{P}{4\eta h} (R_x^2 - r^2), \quad (4.2)$$

где P – давление, Н/м²;

r – расстояние от центра капилляра, м;

η – коэффициент динамической вязкости, сП.

Таким образом, из приведенных соотношений (4.1) и (4.2) видно, что высота подъема жидкости по капилляру возрастает с уменьшением его радиуса и при прочих равных условиях выше поднимаются жидкости с большим поверхностным натяжением, хорошо смачивающие стенки капилляра. Менее вязкие жидкости имеют большую скорость подъема, причем она максимальна по центру капилляра.

Основные сведения о явлении ультразвуковой кавитации

Ультразвуковой капиллярный эффект наблюдается только в кавитирующей жидкости, поэтому рассмотрим явление кавитации подробнее. Ультразвуковая кавитация относится к числу важнейших эффектов, возникающих в жидких средах при воздействии ультразвуковых полей достаточной интенсивности.

Установлено, что в жидкостях стабильно существует множество мельчайших пузырьков размером от десятых долей до нескольких микрометров, которые являются зародышами кавитации. Пузырьки заполнены растворенным газом и паром данной жидкости. Они сосредоточиваются на стенках сосудов, на взвешенных в жидкости твердых частицах, неровностях поверхности и др.

Возникновение парогазовых пузырьков обусловлено тепловыми флуктуациями в жидкостях, связанными с внешними воздействиями. К числу таких воздействий можно отнести достаточно высокую температуру нашей планеты, распад радиоактивных элементов в земной коре, космическую радиацию и др.

В обычных условиях парогазовые пузырьки находятся в жидкости в устойчивом состоянии, так как поверхностное натяжение и гидростатическое давление, действующее на пузырек радиусом R , уравновешиваются внутренним давлением парогазовой смеси, что определяется выражением

$$P_n + P_r = P_0 + \frac{2\sigma}{R_0},$$

где P_n – давление насыщенного пара;

P_r – давление газа;

P_0 – статическое давление;

$\frac{2\sigma}{R_0}$ – поверхностное натяжение.

При наложении на жидкость ультразвукового поля зародыши кавитации теряют устойчивость. В жидкости нарушается сплошность, появляются разрывы в виде каверн или полостей. Образовавшиеся полости начинают активно пульсировать в ультразвуковом поле, растягиваясь в фазе разрежения волны и сжимаясь в фазе сжатия. Предполагалось, что пульсирующие полости являются пустыми и были названы кавитационными от латинского слова *cavitas*, означающего «пустота», а процесс развития кавитационной полости во времени носит название «ультразвуковая кавитация».

Процесс кавитации возникает при введении в жидкую среду колебаний ультразвуковой частоты определенной мощности. Величина минимального значения амплитуды звукового давления или интенсивности ультразвуковых колебаний, при которых в жидкости возникает процесс кавитации, называется **порогом кавитации**.

Порог кавитации зависит от физико-химических свойств и частоты ультразвуковых колебаний. Для возникновения кавитации в воде при 20 кГц величина интенсивности ультразвука должна составлять десятые доли ватт на квадратный сантиметр, увеличение частоты до 200 кГц требует создания ультразвукового поля с интенсивностью порядка 10 Вт/см², а при 0,5 кГц – порядка 200 Вт/см².

Критический и резонансный размер зародышей кавитации

Кавитационные процессы наступают лишь для тех кавитационных пузырьков, начальный радиус которых R_0 больше некоторого критического радиуса $R_{кр}$ и меньше $R_{рез}$:

$$R_{кр} < R_0 < R_{рез}.$$

Кавитационные пузырьки, размер которых меньше $R_{кр}$, вследствие большого значения поверхностного натяжения не участвуют в кавитации при данном значении звукового давления. При $R_{кр} < R_0$ пузырек теряет устойчивость, выходит из состояния равновесия и начинает участвовать в процессе кавитации.

Величину $R_{кр}$ можно определить по выражению

$$R_{кр} = \frac{4\sigma}{3(0,7P_a + P_n - P_0)}$$

Анализ этого выражения показывает, что для жидкостей с большим коэффициентом поверхностного натяжения, а также с повышением в объеме жидкости статического давления P_0 величина $R_{кр}$ увеличивается. С другой стороны, с повышением звукового давления P_a и упругости пара P_n внутри кавитационной полости кавитировать будут пузырьки с меньшими значениями $R_{кр}$. В воде при нормальных условиях величина $R_{кр}$ составляет десятые доли микрометра.

Крупные парогазовые пузыри образуются за счет диффузии газа в пузырек из жидкости, коагуляции зародышей, испарения жидкости и увеличения массы пара. Такие пузырьки могут достигать резонансных размеров $R_{рез}$, когда их собственные частоты колебаний совпадают с частотой налагаемого поля. Совершая сложные негармонические колебания, они не вовлекаются в процесс кавитации и, увеличиваясь в размерах, вытесняются на поверхность жидкости.

Величина $R_{рез}$ находится по формуле Миннерта:

$$R_{рез} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}}$$

где $\gamma = C_p / C_v$;

C_p – теплоёмкость газа при постоянном давлении;

C_v – теплоёмкость при постоянном объёме.

Из приведенной формулы следует, что величина $R_{рез}$ обратно пропорциональна частоте колебаний. Так, для воды при атмосферном давлении и комнатной температуре величина $R_{рез}$ для частоты 20 кГц

составляет порядка сотни микрометров, а частоты в 1 МГц всего несколько микрометров.

Таким образом, с повышением частоты процесс кавитации будет осуществляться кавитационными пузырьками все меньших размеров, обладающих меньшей энергией.

Динамика единичной кавитационной полости в звуковом поле

Под действием переменных давлений в жидкости при распространении звуковой волны радиус парогазовой полости (форму которой можно считать близкой к сферической) в полупериод растяжения увеличивается до максимального значения R_{\max} примерно на два порядка (от нескольких микрометров до сотен микрометров). В следующий полупериод сжатия пузырек резко захлопывается до значения R_{\min} . Продолжительность одного периода для частоты $f = 20$ кГц составляет $T = 50$ мкс.

Качественная картина процесса роста и захлопывания кавитационной полости в воде представлена на рис. 4.1 ($f = 20$ кГц, $P_a = 10$ атм, $P_0 = 1$ атм).

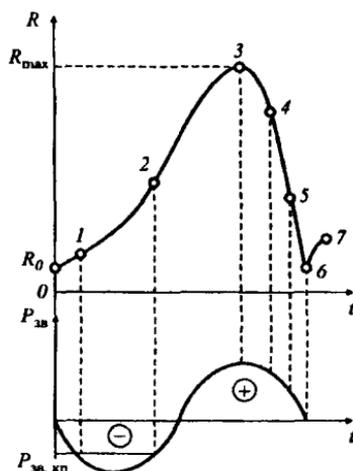


Рис. 4.1. Изменение радиуса кавитационной полости за один период колебаний:

- 1 – медленный рост полости; 2 – ускоренный рост; 3 – рост по инерции;
- 4 – начало фазы сжатия; 5 – стремительное сжатие; 6 – последняя стадия сжатия;
- 7 – мгновенное вторичное расширение с образованием ударной волны

На рис. 4.1 показаны характерные стадии развития кавитационной полости. На начальном участке 1 при малых размерах наблюдается медленный рост полости, так как сила поверхностного натяжения препятствует ее росту.

Следующий участок 2 совпадает с наибольшим значением отрицательного звукового давления при одновременном снижении силы поверхностного натяжения, что способствует ускоренному росту кавитационной полости.

На участке 3 полость увлекается присоединенной массой жидкости и продолжает расти по инерции. Однако по мере приближения к R_{\max} начинает сильнее сказываться тормозящее действие силы статистического давления на поверхность кавитационной полости в связи с тем, что поверхность увеличивается пропорционально квадрату радиуса. Скорость движения стенок полости снижается и в наивысшей точке становится равной нулю.

Затем на участке 4 под действием положительного давления звуковой волны начинается фаза сжатия полости и на участке 5 скорость движения стенок полости (пузырька) стремительно растет. Звуковое давление, статическое давление и поверхностное натяжение действуют в одном направлении – к центру кавитационного пузырька, и величина радиальной скорости достигает наибольшего значения.

В последней стадии сжатия (участок 6) скорость движения стенок пузырька уменьшается вследствие повышения до больших значений давления парогазовой смеси. Кинетическая энергия присоединенной массы жидкости переходит в потенциальную энергию сжатого газа.

При вторичном расширении (участок 7) сжатый газ стремительно расширяется и в микрообъеме жидкости формируется ударная волна.

Таким образом, энергия, накопленная кавитационным пузырьком в течение почти всего периода колебаний, выделяется за малую его долю в конечной стадии захлопывания. Следует отметить, что на рис. 4.1 показан процесс захлопывания кавитационного пузырька за один период колебаний. Однако, до наступления момента захлопывания, пузырек в течение нескольких циклов совершает пульсирующие колебания не захлопываясь.

Исходя из этого одной из причин увеличения подъема жидкости в капилляре являются импульсы давления, возникающие при захлопывании кавитационных полостей, локализованных в сечении капилляра, как показано на рис. 4.2, *a*. За время захлопывания единичной кавитационной полости жидкость в капилляре приобретает скорость и продолжает двигаться по инерции до момента следующего захлопывания кавитационной полости.

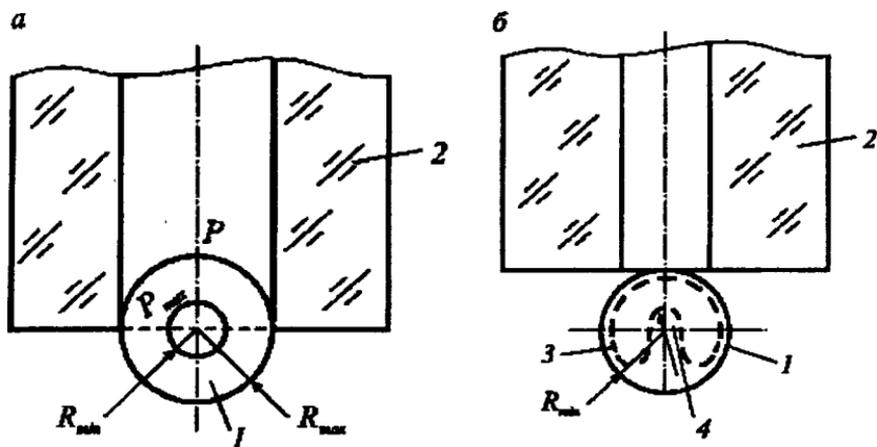


Рис. 4.2. Схема захлопывания пузырька у входа в капилляр:
a – симметричное захлопывание; *b* – несимметричное захлопывание пузырька у торца капилляра: 1 – пузырек в начальный момент захлопывания; 2 – капилляр; 3 – пузырек в конце фазы захлопывания; 4 – кумулятивная струя

- В результате суммирования этих импульсов скорость может достигать весьма значительных величин. Поэтому скорость и высота подъема жидкости в капилляре зависят от числа захлопывающихся пузырьков и величины возникающих при этом импульсов давления, а также вязкости жидкости и величины ее сил трения о стенки капилляра. Из-за интенсивных акустических течений положение захлопывающихся пузырьков в основании капилляра неустойчиво. Поэтому нарушение локации в окрестностях основания капилляра кавитационных пузырьков и уход их из сечения капилляра приводит к мгновенному опусканию жидкости до уровня, определенного действием сил поверхностного натяжения. Поддержание уровня жидкости в капилляре требует меньших (в 5...10 раз) затрат акусти-

ческой энергии, так как при этом уже не нужно преодолевать силы вязкого трения жидкости о стенки капилляра.

Второй возможной причиной подъема жидкости в капилляре рассматривается попадание кумулятивных струй жидкости в канал капилляра из-за несимметричного захлопывания кавитационных пузырьков (рис. 4.2, б). Факторами, способствующими образованию струи, направленной в канал капилляра, являются ухудшение условия поступления жидкости к пузырьку со стороны, обращенной к капилляру, и неоднородность поля давления с разных сторон пузырька.

Со стороны более высокого давления происходит сплющивание исходного сферического пузырька, образуется углубление и возникает микроструя. Попадание струи в канал капилляра вызывает увеличение в нем подъема жидкости на величину Δh_n . Повторяясь с частотой, определяемой вероятностью возникновения пузырька у входа в канал капилляра, захлопывание приводит к суммированию величин Δh_n и вызывает результирующее увеличение высоты подъема жидкости.

В промежутке времени между последовательными попаданиями струи жидкость может вытекать из капилляра. При этом скорость вытекания возрастает по мере увеличения столба жидкости. С достижением максимальной высоты h_{\max} увеличение подъема Δh_n , вызванное попаданием струи в канал капилляра, очевидно, равно его уменьшению Δh_v вследствие вытекания под действием силы тяжести столбика жидкости, т.е. установится равенство $\Delta h_n = \Delta h_v$.

Процесс подъема жидкости по капилляру в ультразвуковом поле начинается только при звуковых давлениях, превышающих порог кавитации. При более низких звуковых давлениях жидкость остается на уровне, достигнутом в результате подъема. Значения амплитуды колебательных смещений для дистиллированной воды, соответствующие порогу кавитации на частоте 20 кГц, составляют 0,5...1,5 мкм.

На рис. 4.3 приведены зависимости высоты (кривая 1) и скорости (кривая 2) подъема воды в стеклянном капилляре сечением $0,35 \times 0,35$ мм² от времени воздействия ультразвука. Из этих данных видно, что уровень воды в капилляре за счет звукокапиллярного эффекта превышает уровень, обусловленный силами поверхностного натяжения (при отсутствии), более чем в 10 раз.

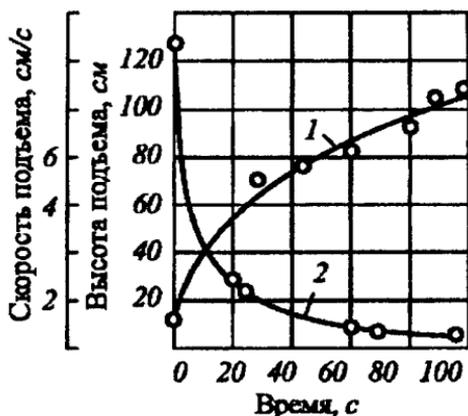


Рис. 4.3. Высота (1) и скорость подъема (2) воды в стеклянном капилляре в зависимости от времени воздействия ультразвука

Максимальная высота подъема жидкости в капилляре h достигается при определенной амплитуде колебательных смещений A_0 рабочей поверхности излучателя, а ее дальнейшее увеличение приводит к снижению h . Такой характер зависимости $h(A_0)$ объясняется закономерностями излучения звука в режиме кавитации. С ростом амплитуды колебательных смещений излучаемая мощность сначала увеличивается, а затем по мере развития кавитации и снижения в результате этого волнового сопротивления жидкости начинает уменьшаться. В результате этого, начиная с некоторых значений A_0 , уменьшается и интенсивность звука у торца капилляра, определяющая активность кавитационных процессов. С ростом частоты колебаний высота и скорость подъема воды по капилляру при одинаковой интенсивности ультразвука снижаются.

Практическое применение звукокапиллярного эффекта

Звукокапиллярный эффект позволяет в десятки раз ускорить пропитку пористо-капиллярных тел и увеличивает заполнение щелей в конструкциях. Он применяется при пропитывании катушек трансформаторов и дублении кож, а также используется при пайке сложных изделий.

Большинство процессов с участием кавитации начинается с проникновения жидкости в щели и их расклинивания. Это относится к процессам кристаллизации и рафинирования при использовании ультразвука в металлургии. Звукокапиллярный эффект позволяет значительно ускорить процесс диспергирования и гидроабразивного разрушения порошкообразных материалов, производимый на ультразвуковых установках, работающих под статическим давлением.

Звукокапиллярный эффект используется в фасонном литье для получения тонких каналов литейной формы при изготовлении точных отливок из алюминиевых сплавов, когда их затверждение проводится в поле акустической кавитации при наложении статического давления.

Лабораторная установка для изучения звукокапиллярного эффекта в жидкости

Установка для изучения звукокапиллярного эффекта создана на базе промышленной ультразвуковой установки УЗУ-0,25, предназначенной для ультразвуковой очистки изделий. Общий вид установки УЗУ-0,25 приведен на рис. 4.4. Она включает ультразвуковой генератор 1 и ультразвуковую ванну 2.

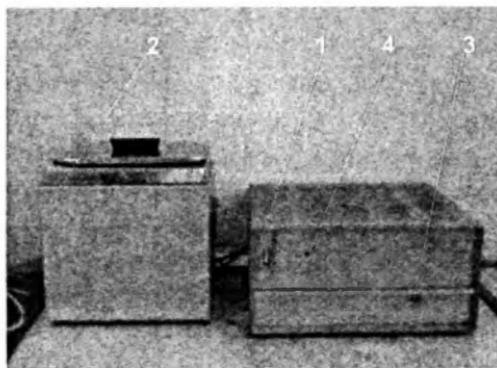


Рис. 4.4. Общий вид ультразвуковой установки УЗУ-0,25

На передней панели генератора находятся тумблер 3 для его включения и сигнальная лампочка 4.

Ультразвуковая ванна состоит из отсека для ультразвуковой очистки *1*. В ее дно вмонтированы три пьезокерамических ультразвуковых преобразователя с излучающими элементами *2* (рис. 4.5).

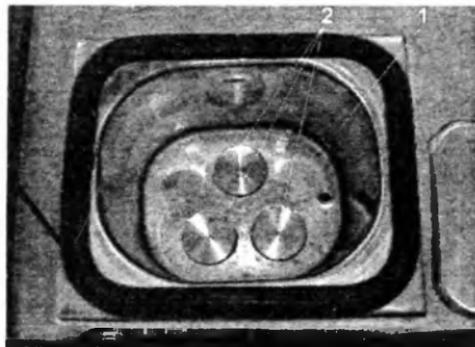


Рис. 4.5. Отсек для ультразвуковой очистки с тремя ультразвуковыми преобразователями

Для проведения экспериментов по изучению закономерностей проявления звукокапиллярного эффекта в жидкостях ванна установки дополнительно оснащена приспособлением для закрепления стеклянной капиллярной трубки и изменения положения ее торца относительно излучающей поверхности ультразвуковых преобразователей. Общий вид ванны с этим приспособлением показан на рис. 4.6.

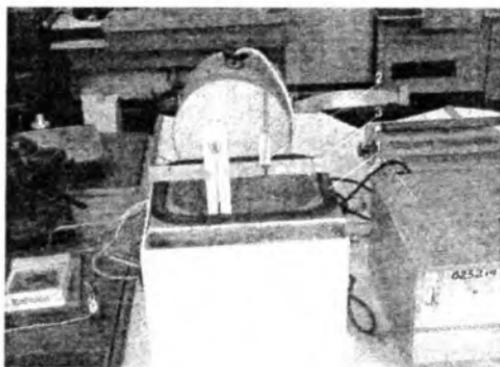


Рис. 4.6. Общий вид лабораторной установки для изучения звукокапиллярного эффекта:

1 – ультразвуковая установка УЗУ-0,25; *2* – капиллярная трубка с нанесенными делениями; *3* – приспособление для закрепления стеклянной капиллярной трубки

Устройство и принцип работы приспособления поясняются схемой, приведенной на рис. 4.7. Лабораторная установка для исследования капиллярного эффекта состоит из основания 1 (рис. 4.7, а), выполненного в виде пластины, которая устанавливается на верхнюю плоскость ванны 2. Капиллярная трубка 3 устанавливается в приспособлении и фиксируется с помощью стопора 4. При ослаблении стопора 4 капиллярная трубка 3 получает возможность вертикального перемещения, что позволяет регулировать расстояние S от торца капилляра до излучающей поверхности 5 преобразователей.

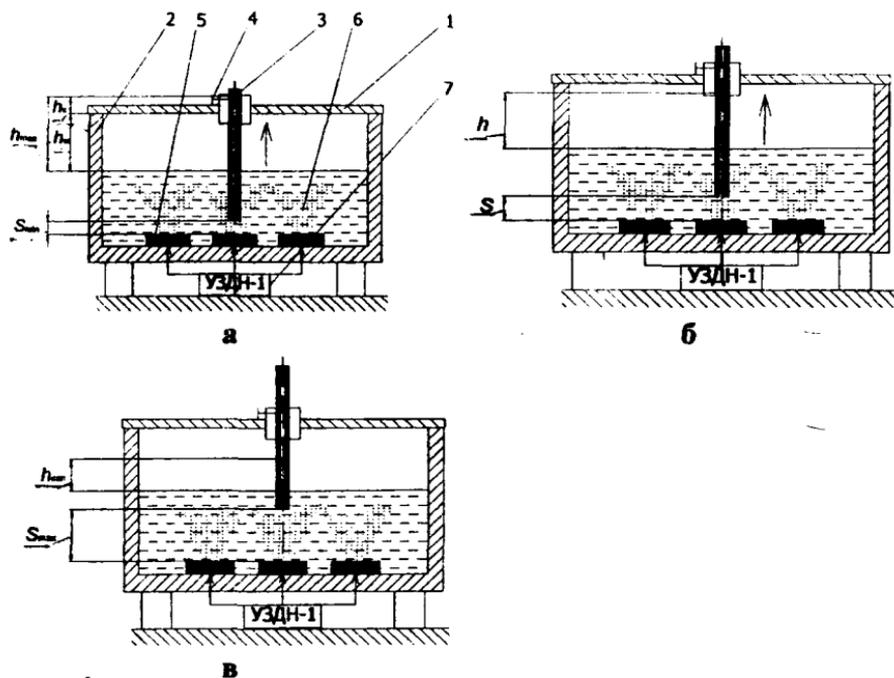


Рис. 4.7. Схема лабораторной установки для исследования звукокапиллярного эффекта:

- а* – максимальный подъем уровня жидкости при минимальном расстоянии торца капилляра от излучающей поверхности преобразователей;
- б* – промежуточное положение торца капилляра относительно излучающей поверхности преобразователей;
- в* – минимальный подъем уровня жидкости при выходе из зоны активных кавитационных процессов

Лабораторная установка работает следующим образом. От генератора ультразвуковых колебаний 7 типа УЗДН-1 электрические импульсы подаются на пьезоэлектрические преобразователи, в результате ультразвуковые колебания с излучающей поверхности 5 подаются в ванну 2 с исследуемой жидкостью, в которой вблизи от излучателей 5 возникают зоны 6 активных кавитационных процессов. При малых значениях расстояния S от торца капилляра до излучающей поверхности 5 торец капилляра находится в данной зоне, в результате чего в капиллярной трубке 3 наблюдается подъем уровня жидкости на значительную высоту h относительно уровня жидкости в ванне. При этом чем меньше расстояние S , тем выше уровень поднятия жидкости в капилляре (рис. 4.7, а). Расстояние от уровня жидкости в ванне до ее верхней плоскости $h_{ж}$ фиксируется с помощью пластмассовой линейки, а высота подъема h_k уровня жидкости в капиллярной трубке 3 относительно основания 1 определяется с помощью делений, нанесенных на поверхность капилляра (рис. 4.7, а). По мере увеличения расстояния S (рис. 4.7, б) интенсивность кавитационных процессов под торцом капилляра уменьшается, что приводит к уменьшению высоты h . При больших значениях расстояния S возникает ситуация, когда торец капилляра выходит из зоны активных кавитационных процессов (рис. 4.7, в), в результате чего высота подъема уровня жидкости в капилляре уменьшается до значения $h_{\text{кап}}$, вызванного действием капиллярного давления.

Порядок выполнения работы

1. Получить у инженера набор стеклянных капиллярных трубок с различным диаметром отверстий, а также закрепленные на пластине соответствующие короткие образцы стеклянных капиллярных трубок.

2. Установить пластину с короткими образцами стеклянных капиллярных трубок на предметном столике микроскопа МИМ-5 и с его помощью определить диаметры капиллярных отверстий в трубках. Результаты измерений занести в табл. 4.1.

Зависимость высоты подъема воды в капилляре от смещения торца капиллярной трубки относительно излучающей поверхности при различных значениях диаметра капиллярной трубки

№ опыта	Диаметр капиллярной трубки, мм	Смещение торца капилляра S , мм	Высота подъема жидкости $h_{\text{взк}}$, мм			
			Излучающий элемент № 1	Излучающий элемент № 2	Излучающий элемент № 3	Среднее значение столбцов 4–6
1	2	3	4	5	6	7

3. Один стеклянный капилляр из полученного у инженера набора установить в приспособление для закрепления капиллярной трубки так, чтобы его торец касался одного из излучающих элементов 2 (см. рис. 4.5) ультразвуковой ванны. При этом должны совпасть метки на капиллярной трубке и отсчетной шкале устройства для регулирования положения капиллярной трубки.

4. С помощью мерной емкости в ультразвуковую ванну залить 2 л водопроводной воды.

5. С помощью пластмассовой линейки определить расстояние от уровня жидкости в ванне до ее верхней плоскости $h_{\text{ж}}$ (см. рис. 4.7, а).

6. При выключенном генераторе определить высоту подъема уровня жидкости в капилляре, уменьшаемого до значения $h_{\text{кап}}$ вызванного действием капиллярного давления.

7. Подать ультразвуковые колебания в жидкость ультразвуковой ванны путем установки тумблера 3 на генераторе 1 в верхнее положение. При этом должна загореться сигнальная лампочка 4 (см. рис. 4.4) и появиться рабочий звук кавитирующей жидкости. О появлении кавитации можно судить по образованию на преобразователях ванны мельчайших подвижных пузырьков.

8. Оценить уровень подъема жидкости $h_{\text{к}}$ (рис. 4.7, а) в капиллярной трубке по нанесенной на ней шкале. Цену деления шкалы определить, оценив расстояние между двумя соседними штрихами на капилляре с помощью отсчетной шкалы приспособления 3 (см. рис. 4.6). Из-за хаотичного характера захлопывания пузырьков в кавитационной области уровень подъема жидкости в капиллярной

трубке будет постоянно изменяться. Поэтому за значение уровня жидкости следует принимать максимально наблюдаемый уровень подъема уровня жидкости в течение 20 с работы ультразвукового генератора.

9. Высоту подъема жидкости в капилляре под действием кавитации определить по формуле

$$h_{\text{узк}} = h_{\text{ж}} + h_{\text{к}} - h_{\text{кап.}}$$

Результаты наблюдений занести в табл. 4.1.

10. Выключить питание ультразвукового генератора 1 с помощью тумблера 3 (см. рис. 4.5). С помощью устройства для регулирования положения капиллярной трубки отвести торец стеклянного капилляра 2 (см. рис. 4.6) на расстояние 2 мм от излучающего элемента 2 (см. рис. 4.5) ультразвуковой ванны. Для этого необходимо переместить положение метки на капиллярной трубке по отсчетной шкале устройства на два деления путем подъема капиллярной трубки в направляющем пазу устройства.

11. Повторить п. 7–10 для нового положения стеклянного капилляра.

12. Пункты 7–10 повторять до момента выхода торца капиллярной трубки из кавитационной зоны, что можно определить по снижению уровня подъема жидкости в капилляре до значения $h_{\text{кап}}$, наблюдаемого при выключенном генераторе ультразвуковых колебаний. По расстоянию S между торцом капиллярной трубки и излучающей поверхностью преобразователей сделать вывод о размерах зоны активных кавитационных процессов.

13. Аналогичным образом, регулируя расположение устройства 3 (см. рис. 4.6) над ультразвуковой ванной 1 (см. рис. 4.5), провести измерения уровня подъема жидкости в капилляре для двух оставшихся излучающих элементов 2 (см. рис. 4.5) ультразвуковой ванны. Полученные данные внести в табл. 4.1.

14. Пункты 3–13 повторить, устанавливая поочередно в приспособление 3 (см. рис. 4.6) оставшиеся капилляры из выданного набора.

15. Построить зависимость высоты подъема уровня жидкости $h_{\text{узк}}$ от значения S расстояния между торцом капиллярной трубки и излучающей поверхностью преобразователей.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Краткие сведения о явлениях, положенных в основу звукокапиллярного эффекта.
4. Практическое применение звукокапиллярного эффекта.
5. Описание устройства и схема экспериментальной установки.
6. Результаты измерений и расчетов.
7. Зависимость высоты подъема уровня жидкости от значения смещения торца капиллярной трубки относительно излучающей поверхности преобразователей при различных значениях диаметра капиллярной трубки.
8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит сущность звукокапиллярного эффекта?
2. В чем заключается явление кавитации жидкости?
3. Перечислите основные силы, действующие на единичный пузырек в жидкости и влияющие на ее радиус.
4. Опишите стадии изменения радиуса единичной кавитационной полости в звуковом поле.
5. Назовите причины увеличения подъема жидкости в капилляре при подаче ультразвуковых колебаний.
6. Почему в отсутствие кавитации подъем жидкости в капилляре не наблюдается?
7. Назовите возможные области применения звукокапиллярного эффекта.

Литература

1. Киселев, М.Г. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения: учебное пособие / М.Г. Киселёв, В.Т. Минченя, Г.А. Есьман. – Минск: Тесей, 2003. – 424 с.
2. Ультразвук / под ред. И.П. Голяминой. – М.: Сов. энцикл., 1979. – 400 с.

Лабораторная работа № 5

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС И СВАРКА ПЛАСТМАСС ТРЕНИЕМ

Цель работы

1. Изучить механизм ультразвуковой сварки пластмасс и влияние режимов ее выполнения на прочность получаемых соединений.
2. Изучить технологические схемы ультразвуковой сварки пластмасс и области ее эффективного использования.
3. Изучить механизм сварки пластмасс трением и применяемые технологические схемы ее выполнения.
4. Произвести соединение образцов из термопластичной пластмассы с помощью ультразвуковой сварки и сварки трением.
5. Оценить характер полученных соединений в отношении их прочности и состояния поверхности образцов в местах сварки.

Оборудование, инструменты и принадлежности

1. Лабораторная установка для ультразвуковой сварки пластмасс.
2. Лабораторная установка для сварки пластмасс трением.
3. Секундомер типа Агат.
4. Микроскоп МИМ-5.
5. Образцы из термопластичной пластмассы.
6. Штангенциркуль ШЦ-1.
7. Ножницы.

Основные сведения об ультразвуковой сварке пластмасс

Одним из наиболее перспективных способов соединения пластмасс, получившим в последние годы большое развитие, является ультразвуковая сварка. Основными отличительными чертами ультразвуковой сварки пластмасс являются: возможность сварки по поверхностям, загрязненным различными продуктами; локальное выделение теплоты в зоне сварки, что исключает перегрев пластмассы, как это имеет место при сварке нагретыми газами, нагретым

инструментом и т. д.; при сварке некоторых пластмасс возможность получения соединений на большом удалении от точки ввода энергии; возможность выполнения соединения в труднодоступных местах.

На рис. 5.1 приведена схема, поясняющая способ ультразвуковой сварки пластмасс. Соединяемые детали 1 устанавливаются между неподвижной опорой 2 и выходным торцом концентратора 3 ультразвукового преобразователя 4 и сжимаются с определенным усилием под действием статической нагрузки $P_{св}$. В процессе сварки концентратору-инструменту сообщаются продольные ультразвуковые колебания частотой 20...50 кГц и амплитудой 40...50 мкм.

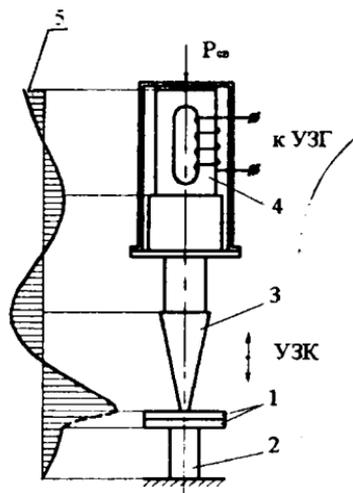


Рис. 5.1. Схема ультразвуковой сварки пластмасс:

1 – свариваемые изделия; 2 – неподвижная опора; 3 – концентратор;
4 – ультразвуковой преобразователь; 5 – эпюра колебательных смещений

При достижении ультразвуковой волной границы раздела между свариваемыми заготовками часть энергии механических колебаний переходит в тепловую, что на эпюре колебательных смещений 5 (см. рис. 5.1) отражается наличием в этом месте характерного скачка. В результате происходит нагрев зон соединяемых деталей до температуры вязкотекучего состояния, и под действием сварочного усилия они сжимаются, образуя сварное соединение. В этом случае ультразвуковые колебания и сварочное усилие действуют по одной линии, перпендикулярной свариваемым поверхностям.

**Современные представления
о механизме образования соединений
при ультразвуковой сварке пластмасс**

Весь процесс образования соединения пластмасс при ультразвуковой сварке условно можно разделить на две стадии. На п е р в о й происходит нагрев соединяемых материалов, при этом температура в месте выполнения сварки должна быть ниже той, при которой происходит разложение (деструкция) пластмассы, и выше минимальной температуры, при которой в данных условиях можно обеспечить надежное сварное соединение. На в т о р о й стадии между нагретыми до температуры вязкотекучего состояния контактирующими поверхностями возникают связи, обуславливающие получение неразъемного соединения.

Одни исследователи считают, что основным источником тепла при ультразвуковой сварке пластмасс является энергия механических колебаний, поглощаемая на границе раздела деталей вследствие различных акустических импедансов свариваемого материала и контакта. Исходя из этого все пластмассы делятся на мягкие с модулем упругости $E < 2 \cdot 10^3$ МПа (полиэтилен и др.) и жесткие с модулем упругости $E > 2 \cdot 10^3$ МПа (оргстекло, полистирол и др.). Трудности, возникающие при сварке мягких пластмасс, объясняются малой механической энергией, подводимой к границе свариваемых поверхностей, так как материал быстро теряет свои упругие свойства.

Местами, в которых происходит интенсивное поглощение энергии ультразвуковых колебаний и превращение ее в теплоту, являются отдельные несплошности в материале пластмассы, что приводит к нагреву всего ее объема, находящегося под концентратором. Преимущественный рост температуры на границе раздела пластмассы объясняется тем, что она является областью максимального скопления пустот и несплошностей, которые захлопываются в периоды положительного давления механических колебаний. Захлопывание пустот приводит к появлению ударов и, как следствие, локализованному нагреву границы раздела свариваемых образцов.

Свариваемость пластмасс ультразвуком определяется его способностью при данной толщине подвести к границе раздела деталей необходимое количество механической энергии. В качестве крите-

рия такой способности используется не модуль упругости E , а коэффициент затухания амплитуды смещения α .

В зависимости от значения этого коэффициента все пластмассы по свариваемости ультразвуком можно разделить на три группы. К первой относятся пластмассы с незначительным коэффициентом затухания ($\alpha < 0,35 \text{ см}^{-1}$), такие как полистирол различных марок, оргстекло и др. Они обладают высоким модулем упругости ($E > 3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$), поэтому могут быть отнесены к классу жестких пластмасс. Благодаря достаточно высоким упругим свойствам и малому коэффициенту затухания пластмассы этой группы хорошо проводят ультразвуковые колебания и свариваются за короткое время.

Вторая группа включает пластмассы, имеющие коэффициент затухания $0,35 < \alpha < 0,55 \text{ см}^{-1}$. К ним относятся полипропилен, винилпласт, лавсан и др. Пластмассы этой группы обладают худшими упругими свойствами по сравнению с жесткими ($2 \cdot 10^3 < E < 3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$) и поэтому могут быть отнесены к классу полужестких. Увеличение коэффициента затухания и понижение упругих свойств обуславливает увеличение времени сварки этих пластмасс и уменьшение толщины свариваемых деталей до 10 мм. На границе раздела «инструмент – свариваемая деталь» выделяется некоторое количество теплоты, приводящее к размягчению пластмассы и облегчению ее деформирования под действием сварочного давления. В результате на поверхности детали в месте контакта с инструментом остается хорошо заметный след.

К третьей группе относятся пластмассы, имеющие значительный коэффициент затухания ($\alpha > 0,55 \text{ см}^{-1}$). Это полиэтилен высокой и низкой плотности, капрон, фторопласт и др. Они характеризуются малым модулем упругости ($E < 1,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$), поэтому могут быть отнесены к классу мягких пластмасс. Благодаря значительному поглощению механической энергии в объеме пластмассы максимальная свариваемая толщина ее не превышает 1–2 мм. Получение соединений на изделиях из этих пластмасс с помощью ультразвука весьма сложно, а прочность таких соединений оказывается незначительной из-за большого вдавливания волновода-инструмента в изделие в процессе сварки.

Сторонники другой точки зрения считают, что тепло при ультразвуковой сварке пластмасс выделяется в результате внутреннего

трения, приводящего к разогреву всего объема материала, внешнего трения в контакте «пластмасса–пластмасса» и внешнего трения в контакте «пластмасса–волновод». При этом доминирующую роль играет внешнее трение в контакте «пластмасса–пластмасса», которое обусловлено поперечными деформациями материала в этой зоне. С точки зрения этих исследователей, угол падения волны на границу раздела пластмассы отличается от прямого, в результате чего в этом месте возникают продольные и поперечные волны, причем как продольные, так и поперечные волны образуются и в первой, и во второй среде, однако находятся в противофазе. Возникающие продольные колебания вызывают интенсивное поверхностное трение на границе раздела свариваемых деталей, что приводит к быстрому разогреву пластмассы в этом месте и переходу ее в размягченное состояние. Образовавшаяся мягкая прослойка снижает коэффициент механического трения, однако сама является средой, интенсивно поглощающей ультразвуковые механические колебания, что приводит к еще большему разогреву границы раздела пластмасс.

Превращение механической энергии колебаний в тепло объясняется трением, возникающим при взаимодействии микронеровностей контактных поверхностей под действием высокочастотных ударов конца концентратора-инструмента о свариваемый материал. Это приводит к выравниванию микронеровностей, оплавлению и проникновению расплавленного материала в полости между впадинами.

Авторы этой гипотезы также разделяют пластмассы на хорошо и плохо сваривающиеся по условному показателю свариваемости, который определяется коэффициентом трения и модулем упругости.

Влияние режимов ультразвуковой сварки пластмасс на прочность соединения

Традиционно в сварочном производстве параметры режима сварки разделяются на основные и дополнительные. При ультразвуковой сварке к *основным* параметрам следует отнести те, которые непосредственно влияют на величину механической энергии, вводимой в свариваемый материал. К таким параметрам относятся амплитуда колебаний торца концентратора A_0 , частота колебаний f , продолжительность ультразвукового воздействия t или скорость сварки V (при шовной сварке) и величина сварочного давления $P_{св}$. В тех случа-

ях, когда дозирование вводимой механической энергии осуществляется по специальным схемам, например при сварке с гарантированным зазором или фиксированной осадкой, величина зазора или осадки может также относиться к основным параметрам.

К числу *дополнительных* параметров режима при ультразвуковой сварке пластмасс необходимо отнести те, посредством которых можно регулировать величину непроизводительно затрачиваемой энергии. В частности, это размеры, форма и материал опоры, материал теплоизоляционных прокладок, температура предварительного подогрева волновода и т. д.

Следует подчеркнуть, что оптимальный режим сварки, зависящий от свариваемого материала, толщины и формы изделия, состояния контактирующих поверхностей и целого ряда других факторов, определяется экспериментально в каждом конкретном случае. В этой связи важно оценить влияние изменения того или иного параметра на прочность получаемого соединения.

Зависимость прочности сварных соединений от амплитуды колебаний торца концентратора выражается кривой с максимумом, соответствующим оптимальному значению амплитуды. Превышение ее значения относительно оптимального приводит к интенсивному разогреву пластмассы непосредственно под концентратором, что может сопровождаться деструкцией, появлением пузырьков, выпучиваний и выплесков размягченного материала. В результате после окончания сварки поверхность шва получается неровной, пористой, имеет наплывы и другие дефекты, приводящие к снижению прочности сварного соединения. Уменьшение амплитуды колебаний относительно ее оптимального значения также приводит к снижению прочности сварного соединения. Данное явление обусловлено тем, что вводимая механическая энергия оказывается недостаточной для образования надежного соединения, а это требует значительного времени сварки, что, как и в первом случае, приводит к дополнительному разогреву пластмассы под концентратором и понижению прочности сварного соединения. Для подавляющего большинства пластмасс оптимальная амплитуда колебаний торца концентратора находится в пределах 30...40 мкм.

Весьма важным параметром при ультразвуковой сварке пластмасс является величина сварочного давления, которое обеспечивает необходимый акустический контакт между свариваемыми деталями

и торцом концентратора. В этом случае также существует оптимальное сварочное давление, которое соответствует максимуму прочности соединения. При сварке с малыми давлениями низкая прочность соединений объясняется тем, что небольшие давления не обеспечивают надежный акустический контакт, а по этой причине в пластмассу вводится сравнительно малая механическая энергия. При сварочных давлениях, превышающих их оптимальное значение, уменьшение прочности соединения обусловлено нарушением резонансного режима работы акустической колебательной системы и соответственно уменьшением амплитуды колебаний выходного торца концентратора.

Увеличение продолжительности ультразвукового воздействия приводит в начальный период к возрастанию прочности соединения, а затем, после достижения определенного максимума, наблюдается уменьшение его прочности. При значительной продолжительности ультразвукового воздействия происходит существенное утонение зоны шва, что сопровождается уменьшением сечения и наличием подрезов в корне шва, приводящих к падению прочности соединения.

Таким образом, изменяя в процессе сварки те или иные основные параметры, можно обеспечивать оптимальные режимы, при которых достигается максимальная прочность сварного соединения. Этим характеризуется рабочий цикл ультразвуковой сварки, который определяется последовательностью приложения сварочного давления, включения, прохождения и выключения ультразвукового воздействия и снятия давления.

На рис. 5.2, *a* представлен наиболее распространенный цикл ультразвуковой сварки (сварочное давление – ультразвуковое воздействие). В этом случае сварочное давление $P_{св}$ прикладывается до включения ультразвуковых колебаний (t_m – время предварительного сжатия), остается постоянным в течение всего сварочного цикла и снимается с запаздыванием на t_n . При этом охлаждение сварочного шва начинается в тот момент, когда детали сжаты между концентратором и опорой, и заканчивается, как правило, на воздухе. Следует подчеркнуть, что охлаждение под давлением существенно повышает прочность сварных соединений. Время t_n определяется при прочих равных условиях толщиной свариваемых материалов и составляет порядка 0,1 – 0,2 с.

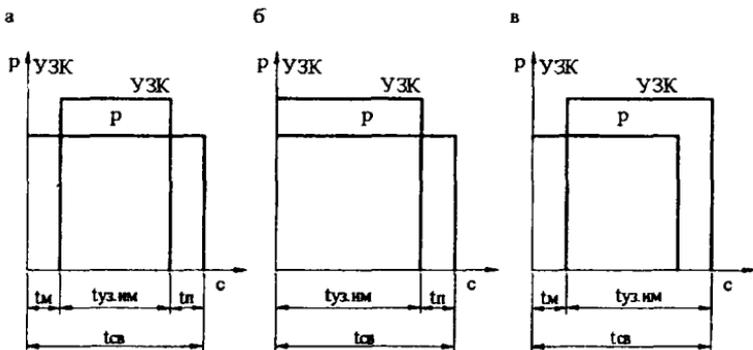


Рис. 5.2. Циклы ультразвуковой сварки

В случае использования рабочего цикла ультразвуковое воздействие – сварочное давление (рис. 5.2, б) ультразвуковые колебания включаются до приложения сварочного давления. Опережающее воздействие ультразвука позволяет очистить свариваемые поверхности от различных загрязнений. В этом случае сварочное давление прикладывается к изделию постепенно. Поэтому при соприкосновении концентратора с изделием механические колебания передаются ему, тем самым очищая контактную поверхность прежде, чем наступает сварка. После окончания ультразвукового воздействия сварочное давление снимается с запаздыванием на $t_{п}$. При реализации такой схемы сварки применяются концентраторы, на рабочей поверхности которых предусмотрен выступ в виде треугольника и насечка. Выступ, внедряясь в расплавленный материал, отделяет наружную часть изделия, а сварка осуществляется наклонной плоскостью рабочей поверхности волновода. Такой рабочий цикл используется для сварки полиэтиленовых коробок и труб, наполненных жидкостями, имеющими большую вязкость. При этом регулировку сварочного давления необходимо обеспечивать с достаточно высокой точностью.

На рисунке 5.2, в изображён нежелательный вариант рассмотренного рабочего цикла сварки, при котором выключение ультразвуковых колебаний осуществляется при снятом сварочном давлении. Однако предварительное снятие сварочного давления при ультразвуковом воздействии и подъем сварочного узла от свариваемой поверхности ведут к ухудшению сварного соединения, в частности, к значительному вспучиванию привариваемой поверхности.

Технология ультразвуковой сварки пластмасс

В настоящее время существует множество схем, по которым осуществляется ультразвуковая сварка пластмасс.

По **характеру распределения** вводимой акустической энергии относительно свариваемых поверхностей ультразвуковую сварку пластмасс можно разделить на контактную и передаточную.

В *первом* случае вводимая волноводом механическая энергия равномерно распределена по всей площади контакта свариваемых деталей, как показано на рис. 5.3, *а*. Это достигается тем, что рабочий торец волновода, контактирующий с верхней деталью, имеет форму и площадь такие же, как и свариваемые детали. Как правило, контактная ультразвуковая сварка применяется для соединения мягких пластмасс, таких как полиэтилен, пластифицированный поливинилхлорид и другие, небольшой толщины (0,05...1,5 мм). При этом наиболее распространены нахлесточные соединения. В этом случае плоскость ввода механических колебаний (плоскость контакта «волновод–пластмасса») располагается на незначительном расстоянии от плоскости раздела свариваемых деталей, которое определяется толщиной верхней детали. По этой причине контактную сварку называют «ближней» или «сваркой в ближнем поле».

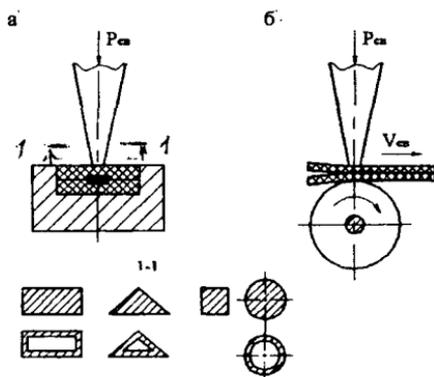


Рис. 5.3. Схемы контактной ультразвуковой сварки:
а – прессовая; *б* – шовная

При реализации *передаточной* сварки механические колебания вводятся в отдельной точке или на небольшом участке поверхности верхней детали (рис. 5.4). Дальнейшая передача и равномерное распределение механической энергии зависят в этом случае от упругих свойств свариваемого материала. Поэтому передаточную сварку рекомендуется применять для соединения объемных деталей из жестких пластмасс, таких как полистирол, полиметилметакрилат и др. При этом наиболее рациональны соединения встык или втавр.

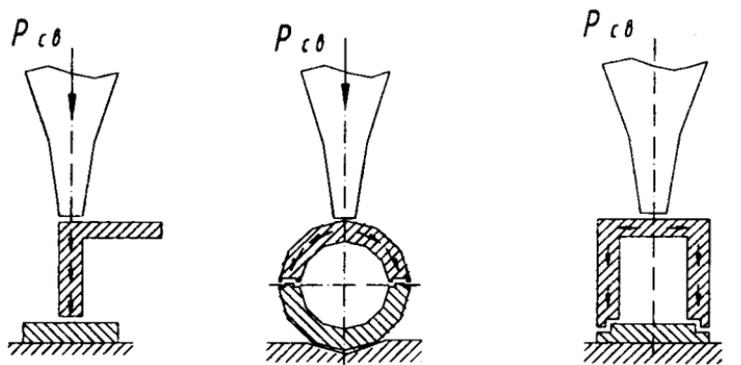


Рис. 5.4. Схемы передаточной ультразвуковой сварки

Концентратор при выполнении передаточной сварки желательно располагать по оси симметрии свариваемого изделия. Удаление зоны ввода ультразвуковых колебаний от плоскости раздела свариваемых деталей может составлять 10..250 мм и зависит от упругих свойств материала. Иногда передаточную сварку называют «дальней» или «сваркой в дальнем поле».

По **степени непрерывности процесса** ультразвуковую сварку пластмасс можно разделить на прессовую и непрерывную.

Прессовая сварка выполняется за одно рабочее движение волновода. По этой схеме может осуществляться как контактная, так и передаточная ультразвуковая сварка пластмасс. Посредством контактной прессовой сварки получают точечные, прямолинейные и замкнутые швы самого различного контура, например, в виде круга, квадрата, прямоугольника, треугольника, эллипса и т. д. (см. рис. 5.3, а), в зависимости от формы рабочего торца волновода. При этом развернутая

длина сварного шва в форме квадрата, прямоугольника и треугольника составляет 200..240 мм, а в случае прямолинейных швов – 240 мм. При использовании круглых волноводов максимальный диаметр контура шва составляет порядка 120 мм; для точечного волновода оптимальный диаметр точки составляет 10 мм.

Контактная прессовая ультразвуковая сварка пластмасс может выполняться с фиксированным временем сварки, фиксированным зазором и фиксированной осадкой. В первом случае время сварки остается постоянным для всех изделий и задается с помощью реле времени. При сварке с фиксированным зазором между торцом волновода и опорой предварительно устанавливают зазор, величину которого в каждом конкретном случае определяют экспериментально. При сварке пленочных материалов наличие фиксированного зазора позволяет достаточно точно дозировать вводимую в материал акустическую энергию.

С помощью непрерывной сварки получают непрерывные протяженные сварные швы за счет относительного перемещения волновода и свариваемого изделия. Она применяется для сварки изделий из пленок и синтетических тканей: мешков, непромокаемой одежды, фильтров и т. п.

По **степени механизации** непрерывная сварка делится на ручную и механизированную.

При *ручной* сварке непрерывные швы любой конфигурации получают за счет перемещения сварочного пистолета при неподвижном изделии. Таким способом можно соединять многослойные пакеты из полиэтилентерефталатной пленки, ориентированных полиамидных пленок, имеющих металлизированное, фотоэмульсионное или ферролаковое покрытие без удаления последнего и т.п. Ручная сварка полиэтиленовых пленок затруднена в силу периодического налипания размягченной пленки на инструмент, что может приводить к прижогам. Ручную сварку можно применять для соединения в труднодоступных местах (рис. 5.5), а также для прихвата деталей перед механизированной сваркой.

В процессе *механизированной* непрерывной сварки перемещается, как правило, свариваемое изделие, а сварочный волновод остается неподвижным. В зависимости от способа перемещения свариваемого материала механизированная сварка делится на шовношаговую и шовную.

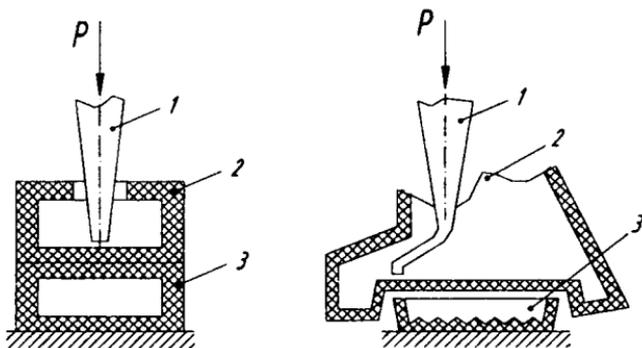


Рис. 5.5. Схемы ультразвуковой сварки в труднодоступных местах:
 1 – концентратор; 2 – деталь, затрудняющая доступ к месту сварки;
 3 – нижняя деталь

Ш о в н о - ш а г о в а я сварка сочетает в себе прессовую сварку с периодическим перемещением свариваемого материала под инструментом на шаг сварки. В момент перемещения изделия давление на инструмент снимается, а величина перемещения на шаг выбирается такой, чтобы обеспечить необходимое перекрытие швов. Такой способ сварки целесообразно применять для соединения пластмасс толщиной 0,5...2 мм.

Ш о в н а я сварка может осуществляться по схеме «напротяг» (рис. 5.6), когда изделие протягивается между неподвижной опорой и колеблющимся торцом волновода или между двумя загнутыми волноводами (рис. 5.6, а), и по схеме *на вращающемся ролике* (рис. 5.3, б). Во всех этих случаях для ограничения вводимой акустической энергии можно применять схему с *фиксированным зазором*.

Сварка «напротяг» между двумя загнутыми волноводами позволяет расширить интервал толщин, при которых еще удастся получить сварное соединение деталей из мягких пластмасс в сторону как уменьшения, так и увеличения их толщины. Возможность получения сварного соединения при протягивании материала через зазор между двумя волноводами обусловлена тем, что в этом случае уменьшается теплоотвод от разогретой зоны, так как вместо массивной опоры используется один из колеблющихся волноводов. Поэтому зона максимального разогрева сдвигается к границе контакта свариваемых поверхностей, что позволяет значительно повысить производительность процесса.

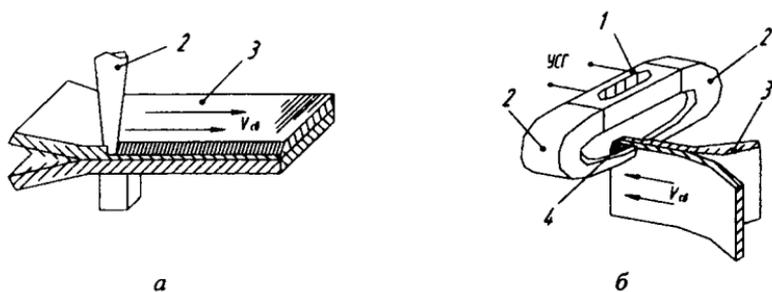


Рис. 5.6. Схемы шовной сварки «напротяг» с подводом ультразвуковых колебаний:

a – односторонним; *б* – двусторонним: 1 – магнитоstrictionный преобразователь; 2 – концентратор; 3 – свариваемый материал; 4 – сварной шов

При ультразвуковой сварке изделий из пластмасс одним из важных факторов, влияющих на процесс формирования сварных швов, является конструкция разделки сопрягаемых поверхностей. Необходимая геометрическая форма и правильная подготовка поверхностей не только облегчают сварку, но и способствуют повышению прочности шва, увеличивают производительность сварки и позволяют в процессе ее выполнения строго фиксировать одну часть свариваемого изделия относительно другой его части.

Разделки кромок по форме могут различаться, но, как правило, одна из стыкуемых деталей должна иметь выступ, входящий по всей длине в соответствующий паз другой детали (рис. 5.7). При этом стыкуемые детали должны первоначально иметь малую контактную поверхность, для чего паз выполняют плоским, а выступ – острым. Это способствует концентрации механической энергии на выступе, ускоряет процесс нагрева и сварки пластмасс.

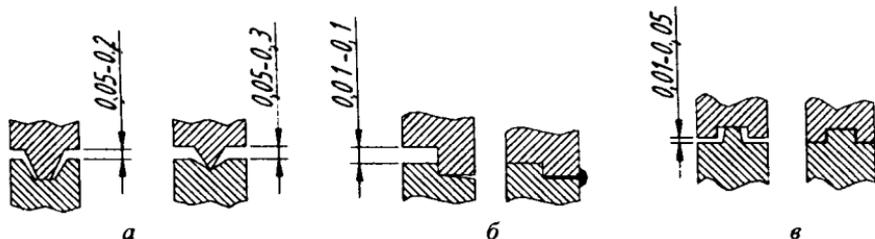


Рис. 5.7. Типы разделки кромок свариваемых поверхностей изделия

Наиболее приемлемой является V-образная разделка свариваемых кромок, которая используется для соединения деталей, показанных на рис. 5.7, а. В этом случае на верхней детали делается V-образный выступ, а на нижней V-образный желобок. Причем высота выступа должна быть больше, чем глубина желобка, на 0,05...0,3 мм. При таком типе соединений достигается лучшая текучесть разогретого материала под действием сварочного давления, а шов при этом имеет хороший внешний вид. Кроме того, для таких типов соединений необходимо предусматривать допуски на текучесть размягченной пластмассы, которая выдавливается из зоны шва, образуя грат (см. рис. 5.7, б). Если по техническим условиям грат недопустим, то используют специальные конструкции шва, предотвращающие выплески пластмассы (см. рис. 5.7, в). Доведенная до вязкотекучего состояния пластмасса должна соединять две стыкуемые поверхности, заполняя зазор в несколько десятых долей миллиметра.

В настоящее время ультразвуковая сварка пластмасс очень широко применяется в самых различных отраслях промышленности. Так, в автотракторной промышленности она используется при изготовлении осветительной арматуры (световозвращатели, велофары, боковые, передние и задние указатели габаритов, эмблемы и т. п.). Материалы – сополимеры стирола. Общий объем выпуска таких изделий составляет несколько миллионов штук в год.

В электротехнической и радиотехнической отраслях промышленности ультразвуковая сварка применяется для герметизации различных типов аккумуляторов из полиамида; микроминиатюрных радиотехнических разъемов из полиамида и полистирола; различных типов переключателей из полиамидов; корпусов электроизмерительных приборов и бытовой радиоаппаратуры из полистирола и т. п.

Ультразвуковая сварка пластмасс широко применяется при изготовлении изделий медицинского назначения, например, для сварки трикотажно-лавсанового полотна для систем переливания крови, при изготовлении катетеров, мочеприемников и т. п.

Разработана технология ультразвуковой сварки различных типов детских игрушек из полистирола взамен склеивания их токсичными клеями (например, дихлорэтаном), а также различных товаров народного потребления (массажных щеток, труб, шариковых ручек и т. д.).

Сварка трением

При сварке трением нагрев свариваемых поверхностей происходит за счет превращения механической энергии трения одной поверхности пластмассы относительно другой в тепловую. Для сварки трением лучше всего подходят такие пластмассы, у которых расплавы имеют среднюю вязкость в довольно широком интервале температур, например, полиэтилен низкой плотности, полистирол, полиамиды, капролон и т.д.

Сварка трением применяется для изготовления рукояток к инструменту, пробок контейнеров, маховичков, для соединения труб и т.д.

Следует подчеркнуть, что кроме соединения одноименных пластмасс сварка трением может быть применена и для соединения пластмасс, имеющих различные физико-механические свойства. Более того, при сварке трением можно соединять термопластичные пластмассы с металлом или термореактивной пластмассой за счет образования механической связи, т.е. при трении термопластичная пластмасса расплавляется и заполняет углубления и поры металлической или термореактивной детали.

Процесс сварки трением сопровождается созданием сварочного давления, величина которого в зависимости от свойств свариваемой пластмассы и скорости относительного движения составляет 0,5...2 МПа.

В результате преобразования механической энергии трения в тепловую в зоне контакта выделяется определенное количество теплоты, достаточное для разогрева контактной поверхности пластмассы до вязкотекучего состояния. Выделение теплоты при сварке трением связано со скоростью относительного перемещения поверхностей и давлением между ними. При этом с увеличением значений этих параметров выделение теплоты возрастает. Однако более высокая температура ведет к уменьшению вязкости расплава, поэтому трение уменьшается и температура понижается.

Как известно, пластмассы обладают низкой теплопроводностью, поэтому выделившееся тепло на трущейся поверхности не распространяется вглубь изделия, и его температура остается практически неизменной. Нагрев поверхностей при сварке трением происходит за несколько секунд. В результате происходящих сдвиговых деформаций с контактирующих поверхностей удаляются окисная пленка

и инородные включения. Сварное соединение получается прочным с высокими механическими свойствами.

Основными достоинствами сварки трением являются высокая скорость процесса и простота выполнения операции.

В зависимости от условий нагрева свариваемых поверхностей сварку трением проводят по трем схемам:

1 – вращением свариваемых деталей или промежуточного элемента – сварка вращением (рис. 5.8);

2 – вибрацией свариваемых деталей или промежуточного элемента – сварка вибротрением;

3 – вращательно-вибрационным движением свариваемых деталей или промежуточного элемента. При сварке *трением вращения* одна деталь закреплена, а вторая вращается (рис. 5.8, а). На сопряженных торцевых поверхностях возникают силы трения, вызывающие их интенсивный нагрев. Схема *сварки трением* может применяться, когда вращение сообщается одновременно двум деталям в противоположном направлении (рис. 5.8, б).

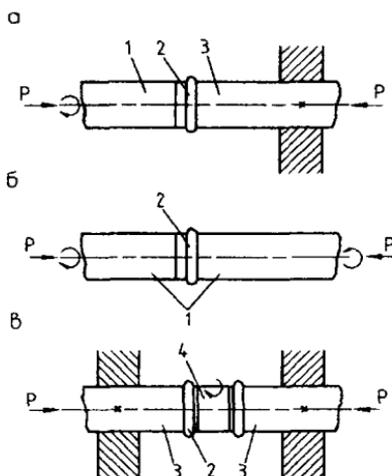


Рис. 5.8. Схемы сварки трением:

а – с использованием вращения одной детали;

б – с использованием вращения обеих деталей; в – с использованием вставки:

1 – вращающаяся деталь; 2 – сварной шов; 3 – неподвижная деталь;

4 – вставка

Для длинных и громоздких деталей, когда вращение и быстрое торможение затруднительно, можно применять сварку с помощью третьей промежуточной детали (вставки) 4. Для этого длинные детали закрепляют неподвижно, а вставку вращают вокруг общей оси свариваемых деталей (рис. 5.8, в).

Этот способ сварки применяют для соединения стержней, труб, а также для присоединения цилиндрических деталей к плоским и фасонным поверхностям. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на качество шва, является форма места соединения. Так, при соединении массивных деталей одна или обе поверхности контакта должны иметь сферическую или коническую форму. В этом случае разогрев поверхностей начинается с вершины конуса, распространяется по всей поверхности изделия и весь стык прогревается равномерно. Тела вращения диаметром менее 35 мм могут свариваться без предварительной подготовки, т.е. плоскими поверхностями. Зона сварки может быть увеличена за счет применения соединений уступом, соединений с шипом и пазом, соединений с разделкой кромок «на ус». Скорость вращения зависит от диаметра свариваемых поверхностей и, как правило, составляет 50...200 м/мин.

Процесс сварки заканчивается, когда в месте контакта образуется наплыв. В этот момент вращающаяся деталь должна быть остановлена. Обычно с момента возникновения трения до прекращения относительного движения проходит 3...25 с. В большинстве случаев для сварки пластмасс трением сварочное давление составляет 0,1...1,5 МПа. После остановки деталей давление на свариваемые поверхности необходимо сохранять еще несколько секунд до отверждения сварочного шва.

Сварку пластмасс вращением осуществляют на различных металлообрабатывающих станках (токарных, сверлильных, фрезерных) и на специальных сварочных машинах. Все установки, применяемые для сварки трением вращения, состоят из привода вращения, механизма для остановки вращения изделия, механизма для создания осевого давления, зажимного механизма, системы, воспринимающей осевое усилие, и аппаратуры управления.

Сущность сварки вибротрением заключается в том, что поверхности свариваемых деталей нагреваются вследствие вибрационных перемещений низкой частоты с определенной амплитудой колебаний. Прижатым свариваемым деталям сообщается относительное

возвратно-поступательное движение, приводящее к разогреву соприкасающихся поверхностей и к их соединению после прекращения вибрации. При сварке вибротрением нет необходимости изготовлять соединяемые поверхности выпуклыми, как в случае сварки вращением.

Продолжительность сварки зависит от свойств свариваемой пластмассы и составляет несколько секунд. Частота колебаний при сварке вибротрением составляет 5...400 Гц, амплитуда колебаний - 1...2 мм, применяемые давления - 1,5...15 МПа.

Способ сварки вибротрением нашел применение для соединения деталей, не имеющих формы тел вращения. Недостатком данного способа является частое смещение одной половины свариваемой детали относительно другой на величину амплитуды колебаний.

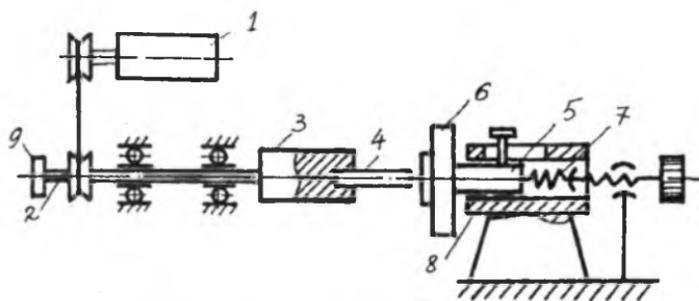
При сварке вибротрением тонких листов полиэтилена один из листов закреплен неподвижно, а второй перемещается с частотой 200 Гц с малой амплитудой колебаний при давлении 1,5 МПа. Установка для сварки состоит из электродвигателя с частотой вращения 2400 об/мин, на конце вала установлен эксцентрик, который приводит в движение с небольшой амплитудой, 1,5...2 мм металлическую пластину, прижатую к листам полиэтилена. Эта пластина снабжена мелкими зубьями, которыми она зацепляет один из листов и приводит его в колебательное движение. Электродвигатель снабжен прерывателем, позволяющим регулировать длительность процесса сварки, и приспособлением, создающим постоянное давление на материал. Продолжительность вибросварки составляет около 1 с.

Для сварки вибротрением нейлоновых ремней и полосок используются автоматические установки, в которых соединяемые детали передвигаются относительно друг друга с частотой 60...100 Гц. Процесс сварки происходит под давлением порядка 0,5...1 МПа за время меньше 1 с, при этом все загрязнения выдавливаются и не мешают образованию качественного прочного соединения.

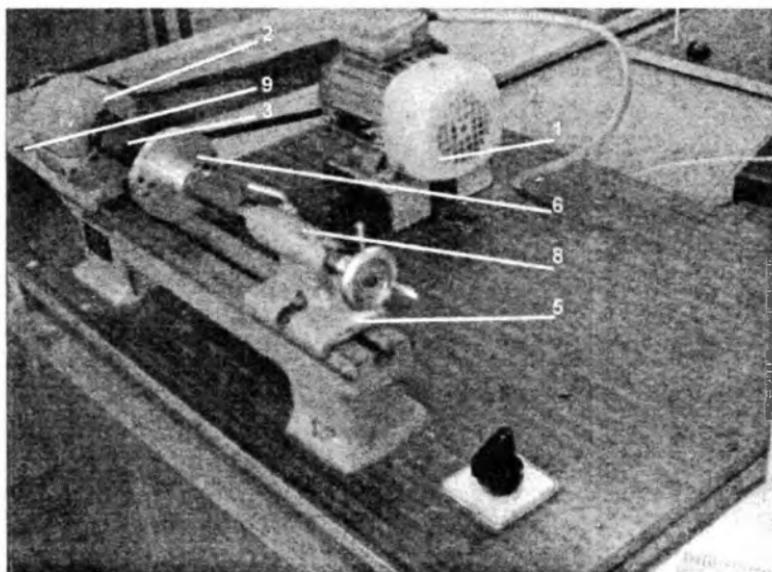
При использовании вибрирующей вставки можно соединять встык детали различного сечения и различной длины со всевозможным расположением осей при любой их кривизне. Этим способом можно сваривать детали, имеющие замкнутый контур.

Лабораторная установка для сварки пластмасс трением

Установка для сварки пластмасс трением создана на базе настольного токарного станка Т-28. Принципиальная схема установки и ее общий вид приведены на рис. 5.9.



а



б

Рис. 5.9. Лабораторная установка для сварки пластмасс трением:
а – схема; б – общий вид

От электродвигателя 1 вращение через ременную передачу сообщается шпинделю станка 2. На последнем с помощью резьбового соединения закреплена втулка 3 с осевым отверстием квадратного сечения. В это отверстие по посадке до упора устанавливается пластмассовая заготовка 4 квадратного сечения. На пиноли задней бабки 5 установлена планшайба 6, которая для создания осевой нагрузки с помощью пружины 7 имеет возможность осевого перемещения во втулке 8. На рабочей поверхности планшайбы с помощью прихватов закрепляется плоский образец. Для быстрой остановки шпинделя в станке предусмотрен ручной тормоз 9.

Лабораторная установка для ультразвуковой сварки пластмасс

Общий вид лабораторной установки для ультразвуковой сварки пластмасс приведен на рис. 5.10.

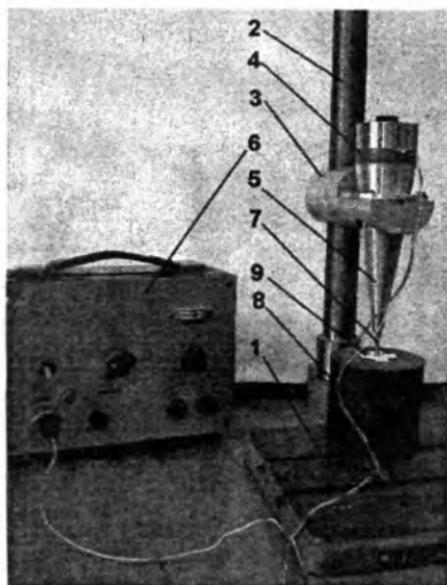


Рис. 5.10. Общий вид лабораторной установки для ультразвуковой сварки пластмасс

Установка состоит из основания 1, на котором крепится стойка 2. На стойку надевается кронштейн 3 с ультразвуковой акустической колебательной системой, состоящей из пьезоэлектрического преобразователя 4 и конического концентратора 5. Пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь 4 соединён с генератором высокой частоты 6. В узком конце конического концентратора 5 предусмотрено резьбовое отверстие для крепления рабочего инструмента 7. На основании установлен рабочий стол 8 с расположенными на нем свариваемыми образцами 9.

Питание преобразователя осуществляется от малогабаритного ультразвукового генератора, внешний вид панели управления которого приведен на рис. 5.11.

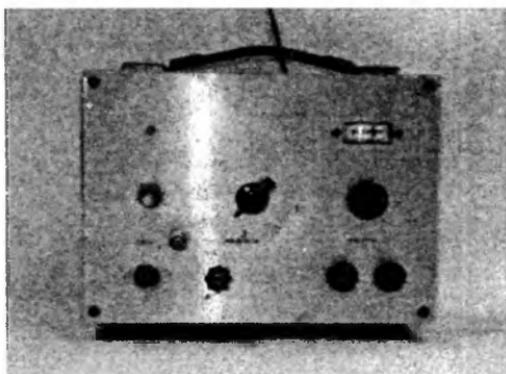


Рис. 5.11. Панель управления ультразвукового генератора

На панели расположен тумблер «Сеть» для включения генератора. При его верхнем положении осуществляется питание ультразвукового преобразователя. Ниже тумблера расположены разъемы для подключения ультразвукового преобразователя. В верхней правой части панели расположен индикатор резонансного возбуждения преобразователя, под ним ручка «Частота» для плавного изменения частоты питания ультразвукового преобразователя, внизу гнезда для плавких предохранителей. В центральной части панели расположена ручка «Мощность» для изменения выходной мощности генератора.

Порядок выполнения работы

1. Сварка пластмасс трением.

1.1. Получить у инженера пластмассовые образцы, предназначенные для сваривания: плоский 1 и стержневой квадратного сечения 2 (рис. 5.12).

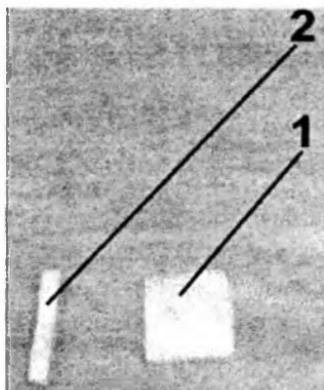


Рис. 5.12. Образцы, используемые для сварки трением

1.2. Убедиться, что станок отключен от сети.

1.3. В квадратное отверстие шпинделя установить до упора стержневой образец квадратного сечения (рис. 5.13).

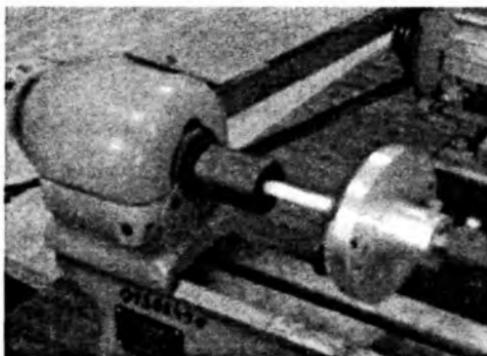


Рис. 5.13. Установленный на лабораторной установке стержневой образец квадратного сечения

1.4. На рабочую поверхность планшайбы 1 установить плоский образец 2, закрепив его двумя прихватами 3 (рис. 5.14).

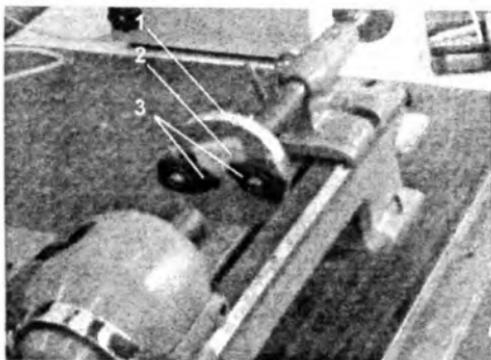


Рис. 5.14. Установленный на лабораторной установке плоский образец

1.5. Передвинуть заднюю бабку 1 влево до касания образцов и закрепить ее в этом положении с помощью фиксатора 2 (рис. 5.15).

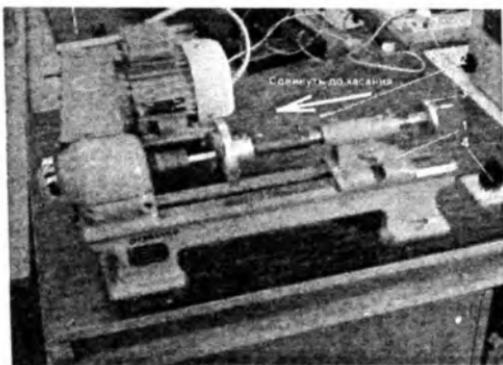


Рис. 5.15. Лабораторная установка с установленными образцами

1.6. С помощью маховичка 3 (см. рис. 5.15) на задней бабке создать необходимую величину осевой нагрузки за счет деформирования пружины.

1.7. Провернуть шпиндель вручную и убедиться в правильности и надежности закрепления образцов.

1.8. Включить станок в сеть напряжением 220 В.

1.9. Включить электродвигатель станка с помощью тумблера 4, смонтированного на панели установки (см. рис. 5.15).

1.10. По истечении 1...2 мин работы станка в результате нагрева взаимодействующих поверхностей образцов пластмасса в зоне их контакта из твердого переходит в вязкотекучее состояние (об этом свидетельствует появление характерного «дымка»). В этот момент одновременно правой рукой выключить станок тумблером 4, а левой – остановить вращение шпинделя с помощью ручного тормоза 9 (см. рис. 5.9, б).

1.11. После выдержки образцов в неподвижном состоянии в течение 0,5...1 мин с помощью маховичка 3 (см. рис. 5.15) на задней бабке отвести планшайбу вправо. При этом если сварное соединение получилось прочным, из отверстия шпинделя вместе с плоским образцом должен переместиться и образец квадратного сечения. Сваренные образцы представлены на рис. 5.16.



Рис. 5.16. Сваренные образцы

1.12. Отключить станок от сети, раскрепить плоский образец и осмотреть полученное сварное соединение, обратив внимание на состояние поверхностей образцов в месте сварки. Для качественной оценки прочности полученного стыкового сварного соединения попытаться вручную, приложив изгибающее усилие к стержневому образцу, разрушить это соединение.

2. Ультразвуковая сварка пластмасс.

2.1. Перед началом работы убедиться, что лабораторная установка для ультразвуковой сварки пластмасс заземлена, для этого визуально проверить наличие заземляющих устройств.

2.2. Получить у инженера пластмассовые образцы 1, предназначенные для ультразвукового сваривания (рис. 5.17).

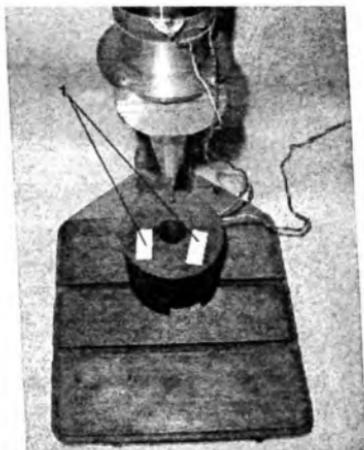


Рис. 5.17. Образцы, предназначенные для ультразвукового сваривания

2.3. Закрепить на акустической колебательной системе рабочий инструмент 1 (рис. 5.18). Для этого его необходимо завернуть в резьбовое отверстие на узком конце конического концентратора, как показано на рис. 5.19.

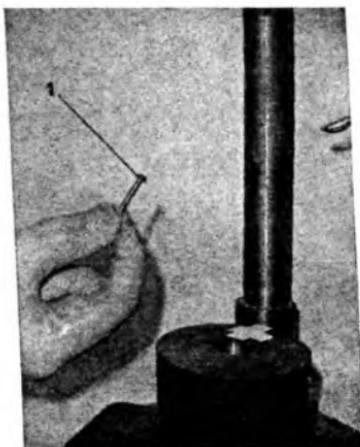


Рис. 5.18. Рабочий инструмент, применяющийся при ультразвуковой сварке пластмасс

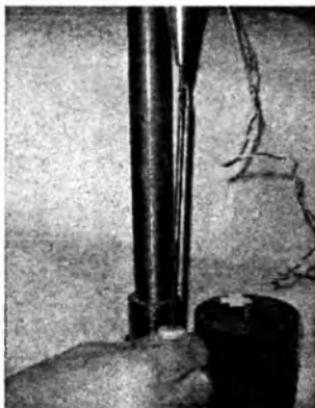


Рис. 5.19. Процесс закрепления рабочего инструмента на акустической колебательной системе

2.4. Произвести опробование работы ультразвуковой установки, для чего необходимо переключить тумблер «Сеть» на панели ультразвукового генератора в верхнее положение. При этом должна загореться сигнальная лампочка.

2.5. Плавно изменяя частоту генератора путем поворота ручки «Частота», добиться появления характерного звука. После опробования ультразвуковой установки выключить питание генератора.

2.6. Установить свариваемые образцы 1 на рабочем столе 2 лабораторной установки, как показано на рис. 5.20.

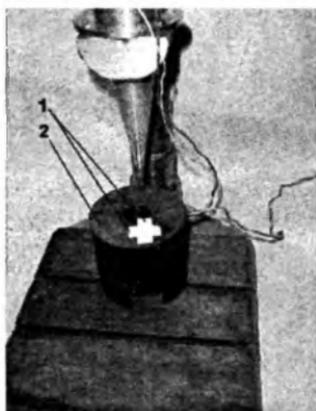


Рис. 5.20. Расположение образцов перед ультразвуковой сваркой

2.7. Ослабить фиксирующий винт на кронштейне 1 (рис. 5.21) и по стойке 2 опустить акустическую колебательную систему 3 до контакта рабочего инструмента 4 со свариваемыми образцами 5. При этом перед сваркой детали должны занимать положение, показанное на рис. 5.22.

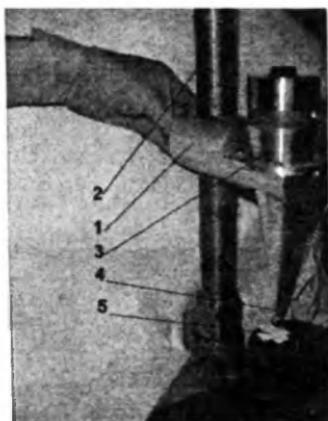


Рис. 5.21. Процесс установки рабочего инструмента на свариваемые образцы

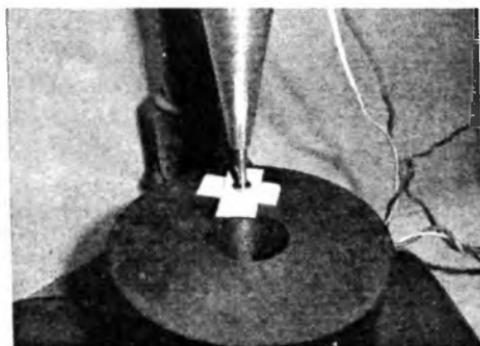


Рис. 5.22. Зона обработки при ультразвуковой сварке

2.8. подготовить к работе секундомер типа Агат.

2.9. Включить питание ультразвукового генератора и произвести ультразвуковое сваривание образцов в течение 1 с, контролируя продолжительность с помощью секундомера.

2.10. Выключить питание ультразвукового генератора. Поднять акустическую колебательную систему на кронштейне и закрепить ее на стойке, зажав фиксирующий винт (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Процесс подъема акустической колебательной системы

2.11. Изучить характер соединения. Разделить сваренные образцы, как показано на рис. 5.24.



Рис.5 .24. Процесс разделения образцов, сваренных ультразвуковым методом

2.12. Поочередно поместить каждый из разделенных образцов на предметный столик микроскопа МИМ-5 и с помощью микроскопа МИМ-5 измерить размеры зоны сварки. Результаты измерений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений размеров зоны сварки
от продолжительности ультразвуковой сварки пластмасс

№ опыта	Продолжительность ультразвуковой сварки	Размеры зоны сварки (Д × Ш), мм

2.13. Повторить все действия согласно пунктам 2.4 – 2.12, последовательно увеличивая продолжительность ультразвукового сваривания до 5 с с интервалом в 1 с.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструмент и принадлежности.
3. Схема акустической колебательной системы для ультразвуковой сварки с указанием ее основных элементов.
4. Краткие сведения о принципах, положенных в основу ультразвуковой сварки пластмасс.
5. Краткие сведения о механизме образования соединений при ультразвуковой сварке пластмасс.
6. Описание технологии ультразвуковой сварки пластмасс.
7. Краткие сведения о принципах, положенных в основу сварки пластмасс трением.
8. Принципиальная схема установки для сварки пластмасс трением.
9. Результаты измерения размеров зоны сварки в зависимости от продолжительности ультразвуковой сварки пластмасс.

Контрольные вопросы

1. Какими достоинствами обладает ультразвуковая сварка пластмасс по сравнению с другими видами сварки?
2. Каковы амплитуда и частота колебаний при ультразвуковой сварке пластмасс?
3. За счет каких явлений в свариваемом шве происходит переход механической энергии колебаний в тепловую?
4. Чем определяется свариваемость пластмасс? Какой коэффициент лежит в основе критерия свариваемости?
5. Как влияют акустические и технологические параметры ультразвуковой сварки пластмасс на прочность соединения?
6. Назовите основные разновидности ультразвуковой сварки пластмасс. В чем заключаются их достоинства и недостатки?
7. Как влияет форма разделки сопрягаемых поверхностей на процесс формирования сварных швов?
8. Назовите основные области применения ультразвуковой сварки пластмасс.
9. Какие виды пластмасс используются при сварке трением? В чем ее основные преимущества перед другими видами сварки?
10. Перечислите основные схемы сварки трением. Для каких деталей они используются?
11. Какие станки используются в технологическом процессе сварки трением?

Литература

1. Киселёв, М.Г. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения: учебное пособие / М.Г. Киселёв, В.Т. Минченя, Г.А. Есьман. – Минск: Тесей, 2003. – 424 с.
2. Ультразвук / под ред. И.П. Голяминой. – М.: Сов. энцикл., 1979. – 400 с.

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы

1. Изучить физическую сущность процесса ультразвуковой размерной обработки хрупких материалов, ее технологические возможности и применяемое оборудование.

2. Провести обработку сквозных отверстий в стеклянной заготовке, по результатам которой определить производительность выполнения операции, а также оценить геометрические параметры полученных отверстий.

Инструменты и принадлежности

1. Ультразвуковая установка для обработки отверстий.
2. Сменный наконечник с инструментом.
3. Стеклянные образцы.
4. Абразивный порошок.
5. Емкость для приготовления абразивной суспензии вместе с мерной ложкой.
6. Секундомер.
7. Штангенциркуль ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу, равной 0,05 мм.
8. Микроскоп МИМ-5.

Основные сведения об ультразвуковой размерной обработке хрупких материалов

Ультразвуковая размерная обработка является эффективным способом формообразования поверхностей, особенно сложной формы, на деталях из твердых хрупких материалов, обработка которых другими методами затруднена. Широкое применение стекла, кварца, керамики, ситаллов, рубина, германия, кремния в электронной и приборостроительной промышленности, а также в различных отраслях машиностроения инициировало быстрое развитие ультразвуковой

размерной обработки, создание и внедрение в производство ультразвуковых станков, разработку физических и технологических основ этого метода.

Физическая сущность процесса

Схема метода ультразвуковой размерной обработки приведена на рис. 6.1. Инструменту, который является частью акустической колебательной системы, сообщаются ультразвуковые колебания с частотой 18...44 кГц и амплитудой 10...60 мкм. Как правило, используются продольные колебания, но можно применять поперечные и крутильные. В состав колебательной системы входят магнестрикционный или пьезокерамический преобразователь и стержневой концентратор с коэффициентом усиления по амплитуде 5...20. Торец инструмента прижимается к поверхности обрабатываемой заготовки с постоянной силой 20...200 Н при давлении прижима $10^5 \dots 10^6$ Па.

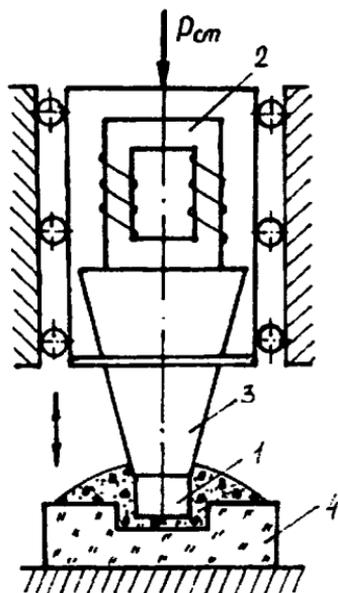


Рис. 6.1. Схема ультразвуковой размерной обработки:
1 – инструмент; 2 – ультразвуковой преобразователь; 3 – концентратор;
4 – обрабатываемая заготовка

В рабочую зону, т.е. в пространство между колеблющимся торцом инструмента и заготовкой, подается суспензия, состоящая из взвешенных в воде зерен абразива. Инструмент ударяет по зернам абразива и выкалывает частички материала обрабатываемой заготовки. Размер этих частиц небольшой, однако количество ударов велико, и при определенных условиях процесс протекает достаточно эффективно.

В основе ультразвуковой размерной обработки лежат два процесса:

- 1) ударное внедрение абразивных зерен, приводящее к выкалыванию частиц обрабатываемого материала;
- 2) циркуляция суспензии в рабочей зоне, за счет которой осуществляется вынос выколотых частиц и доставка свежих абразивных зерен.

Для обеспечения высокой производительности необходимо интенсивное протекание обоих процессов.

При ультразвуковой размерной обработке происходит хрупкое разрушение обрабатываемого материала и одновременно вязкое разрушение инструмента, выполненного из малоуглеродистой стали. В момент удара торца инструмента по наиболее выступающим абразивным зернам их вершины вдавливаются в поверхностные слои как детали, так и инструмента (рис. 6.2).

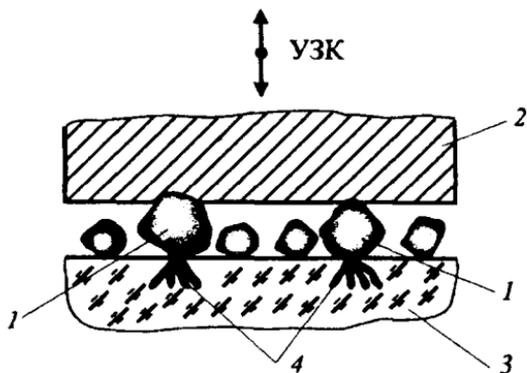


Рис. 6.2. Схема взаимодействия абразивных зерен с поверхностью заготовки и инструмента в процессе ультразвуковой размерной обработки:
 1 – абразивные зерна; 2 – колеблющийся инструмент; 3 – обрабатываемая заготовка;
 4 – зона предразрушения на поверхности заготовки

Внедрение абразивных зерен в поверхность инструмента приводит только к упругопластическим деформациям, в то время как в поверхностном слое обрабатываемого материала возникает сеть микротрещин, зарождающихся в наиболее слабых и перенапряженных местах.

Как известно, основным механизмом разрушения хрупких тел при всех методах абразивной обработки является распространение на некоторую глубину микро- и макротрещин, которые, пересекаясь между собой, формируют механически ослабленный слой (зона предразрушения), сравнительно легко разрушающийся при повторном воздействии абразивных зерен. Отделение частиц происходит в тот момент, когда максимальные касательные напряжения в зоне внедрения превысят сопротивление сдвигу. Вода, несущая абразив, расширяет микротрещины и облегчает образование выколов, а также охлаждает инструмент и деталь.

При ультразвуковой размерной обработке можно говорить о главном и побочном резании. Главное резание осуществляется абразивными зернами, получающими энергию от рабочего торца инструмента. Побочное резание осуществляется зернами, находящимися между боковыми поверхностями заготовки и инструмента. Относительная доля побочного резания возрастает по мере углубления инструмента в деталь. С целью уменьшения побочного резания на инструментах применяют обратную конусность, внутреннюю подачу абразивной суспензии и т.д.

Влияние технологических и акустических параметров на показатели размерной обработки

Процесс ультразвуковой размерной обработки зависит от многих технологических параметров, как правило, взаимно влияющих друг на друга: твердости и концентрации абразива, частоты и амплитуды колебаний инструмента, его износа и статической нагрузки. Каждый из этих факторов влияет на производительность процесса, точность и качество обработанных изделий.

Материал заготовки в значительной мере определяет характер его разрушения. При ультразвуковой обработке все материалы разделены на три группы. В основу этого деления положен критерий хрупкости t_x , представляющий собой отношение сопротивления ма-

териала сдвигу τ к сопротивлению на отрыв σ . В табл. 6.1 приведена классификация обрабатываемости материалов ультразвуковым методом по критерию хрупкости t_x .

Таблица 6.1

Классификация обрабатываемости материалов
ультразвуковым способом

Группа материала	Материал	Крит. хрупкости	Вид деформации	Характер разрушения	Область применения
I	Стекло, кварц, германий, феррит, минералокерамика, агат и др.	$t_x \geq 2$	Упругая	Хрупкий	Изготовление деталей из стекла, кварца, керамики, минералов, ферритов, обработка полупроводниковых материалов
II	Твёрдые сплавы, закалённые и цементированные стали, титановые сплавы, вольфрам	$1 < t_x < 2$	Упруго-пластическая	Хрупкий после упрочнения в результате микропластических деформаций	Изготовление фильера, штампов, высадочных матриц, деталей сложной формы из твёрдых сплавов и вольфрама
III	Свинец, мягкие стали и др.	$t_x < 1$	Пластическая	Разрушение практически не наблюдается	Ультразвуковой метод нецелесообразен

Материалы *первой* группы (стекло, кварц, ситалл, керамика, кремний, германий, феррит и др.) имеют $t_x \geq 2$. В процессе ультразвуковой обработки они практически не подвергаются пластической деформации и основную долю процесса диспергирования занимает работа упругих деформаций.

Вторую группу формируют материалы, у которых $1 < t_x < 2$. Это твердые и титановые сплавы, закаленные, цементированные и азотированные стали, вольфрам. В процессе их обработки под действием абразивных зерен наряду с упругими происходят и микро-

пластические деформации, которые затрудняют диспергирование материала.

К *третьей* группе относятся мягкие стали, свинец и другие материалы, имеющие $t_x < 1$. В данном случае почти вся работа абразивных зерен расходуется на микропластическую деформацию поверхностных слоев и разрушения материала почти не происходит. По этой причине такие материалы нецелесообразно подвергать ультразвуковой обработке.

Абразивная суспензия. Материал абразива, его концентрация в суспензии непосредственно влияют на показатели ультразвуковой размерной обработки. В процессе обработки абразивные зерна выполняют функцию режущего инструмента, поэтому по твердости они не должны уступать обрабатываемому материалу.

Наиболее широко при ультразвуковой обработке применяют карбид бора, который хорошо смачивается водой и удовлетворительно переносится жидкостью. При изготовлении изделий из стекла, германия, кремния используется карбид кремния, электрокорунд. Если производительность обработки стекла карбидом бора принять за 1, то производительность обработки карбидом кремния равна 0,8...0,85, а электрокорундом – 0,7...0,75. В качестве жидкости, несущей абразив, как правило, используют воду, которая обладает малой вязкостью, удовлетворительной смачиваемостью и хорошими охлаждающими свойствами. Применение добавок, оказывающих химическое воздействие на обрабатываемый материал, позволяет существенно повысить производительность. Например, добавление в суспензию 15 %-го водного раствора сернокислрой меди увеличивает производительность ультразвуковой обработки твердых сплавов в 1,7...2,5 раза.

Показатели ультразвуковой обработки существенно зависят от среднего размера зерен абразива. С уменьшением размера абразивных зерен производительность обработки снижается, и особенно значительно, если размер зерна меньше амплитуды колебаний. Вместе с тем чем меньше абразивное зерно, тем выше точность обработки. В процессе работы происходит интенсивное дробление (разрушение) абразивных зерен, поэтому производительность в начале обработки может быть в 3 раза больше, чем в конце.

Концентрация абразива в суспензии также влияет на производительность обработки. Ее оптимальному значению соответствует ситуация, когда на обрабатываемой поверхности укладывается один слой зерен абразива. С превышением этого оптимального значения зерна абразива в зоне обработки будут располагаться в несколько слоев, что влечет увеличение доли работы, расходуемой на диспергирование самих зерен, и соответственно снижение производительности процесса разрушения материала.

Амплитуда и частота колебаний инструмента определяют скорость его продольных колебаний, т.е. главного движения резания. Чем больше амплитуда и частота колебаний, тем выше производительность обработки (Q_s), которую также можно выразить и скоростью подачи инструмента V_n .

Оптимальное значение амплитуды колебаний инструмента A_0 связано со средним размером абразивного зерна основной фракции d_a . При очень малых размерах зерна и больших амплитудах колебаний ($2 A_0 / d_a > 1$) происходит главным образом не внедрение зерен в обрабатываемую поверхность, а их интенсивное дробление. В том случае, когда амплитуда колебаний мала, а зерна абразива крупные ($2 A_0 / d_a < 0,5$), импульс ударной силы, действующей на зерно, оказывается недостаточным для внедрения зерен в обрабатываемый материал и его разрушения.

Максимальная производительность наблюдается при условии

$$2 A_0 / d_a = 0,6 \dots 0,8.$$

Статическая нагрузка. Как уже отмечалось, при ультразвуковой обработке инструмент прижимается к поверхности заготовки с постоянной силой $P_{ст}$, которую еще называют силой подачи. Она оказывает существенное влияние не только на значение ударных импульсов, сообщаемых абразивным зернам, но и на их состояние и концентрацию под торцом инструмента. Оптимальное значение статической нагрузки зависит от площади и конфигурации инструмента, амплитуды колебаний, среднего размера зерен и свойств обрабатываемого материала.

Увеличение силы подачи в определенных пределах, до момента проявления демпфирования колебаний, приводит к увеличению импульса ударных сил и глубины внедрения зерен абразива, в резуль-

тате чего интенсифицируется съем материала. Одновременно с этим увеличение статической нагрузки уменьшает среднее расстояние между торцом инструмента и обрабатываемой поверхностью заготовки, что ухудшает условия поступления в зону обработки свежего абразива и удаления из нее продуктов износа.

Как уже отмечалось, при ультразвуковой обработке инструмент прижимается к поверхности заготовки с постоянной силой $P_{ст}$, которую также называют силой подачи. Она оказывает существенное влияние не только на значение ударных импульсов, сообщаемых абразивным зернам, но и на их состояние и концентрацию под торцом инструмента. Оптимальное значение статической нагрузки зависит от площади и конфигурации инструмента, амплитуды колебаний, среднего размера зерен и свойств обрабатываемого материала.

Технологические возможности ультразвуковой размерной обработки

Ультразвуковая размерная обработка абразивной суспензии имеет следующие преимущества перед обычными процессами резания:

- процесс высокопроизводителен при обработке твердых хрупких материалов, не поддающихся обработке обычными способами;
- появляется возможность копирования сложной формы инструмента и фасонной обработки;
- снижается сила резания, так как ультразвуковая обработка осуществляется при небольших нагрузках на заготовку.

Наиболее широкое применение ультразвуковая размерная обработка получила при изготовлении деталей из стекла, кварца, флюорита, феррита и других металлокерамических материалов (германия и кремния). Она также применяется при изготовлении твердосплавных волоочильных фильер, пуансонов и матриц, обработки искусственных и естественных камней, ювелирных и технических алмазов.

Обработка деталей по наружному контуру

Формообразование деталей и заготовок по наружному контуру чаще всего производят путем вырезания их из плоских заготовок-пластин. В зависимости от формы и размеров вырезаемого контура эта операция выполняется за один или несколько переходов. За одну опе-

рацию получают детали и заготовки, имеющие сравнительно простую форму (круглая, квадратная, шестигранная, эллипсообразная и т.д.).

Применение ультразвуковой размерной обработки особенно эффективно при формообразовании прецизионных деталей сложного профиля из ферритов, кварца и керамики. Примеры таких деталей представлены на рис. 6.3. В этом случае значительное снижение трудоемкости достигается за счет сокращения большого числа операций, обычно выполняемых другими методами, например алмазным шлифованием. Кроме того, ультразвуковая технология позволяет получать большую экономию дорогостоящих материалов, что достигается рациональным раскромом заготовок и уменьшением брака из-за сколов.

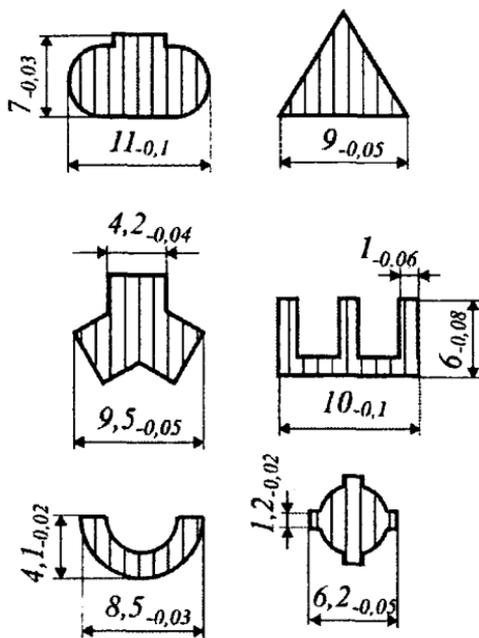


Рис. 6.3. Детали из ферритов и керамики, полученные ультразвуковой размерной обработкой

Инструменты для ультразвукового вырезания сложногопрофильных прецизионных деталей выполняются сборной конструкции.

К оправке с резьбовым хвостовиком припаивают профильную рабочую часть (рис. 6.4).

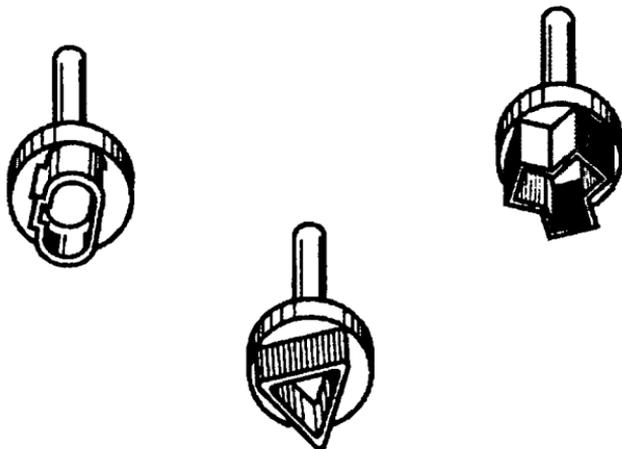


Рис. 6.4. Ультразвуковые инструменты для вырезания деталей сложной формы

Вместе с тем наиболее эффективной является обработка деталей многоместным инструментом, часто называемым групповым. Его применение наиболее целесообразно при вырезании деталей диаметром до 6...8 мм. Конструкции таких многоместных инструментов приведены на рис. 6.5. Инструмент, приведенный на рис. 6.5, а, применяется для вырезания из одной плоской заготовки одновременно нескольких деталей круглой формы. На рабочем торце такого инструмента выполняется несколько рядов отверстий диаметром d , расположенных в шахматном порядке. Основное преимущество такого инструмента – простота изготовления. Однако ввиду необходимости сравнительно больших перемычек между соседними отверстиями и краями обоймы раскрой часто получается неэкономичным, с большим процентом отходов, что особенно сказывается при обработке дорогих и дефицитных материалов.

Инструменты, фрезеруемые из цельной заготовки (рис. 6.5, б), используют при обработке различных пазов и других элементов некруглой формы.

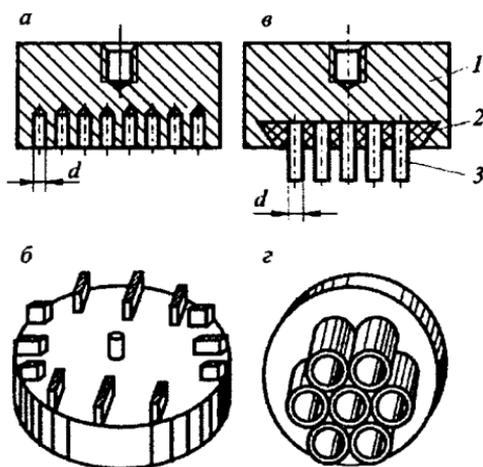


Рис. 6.5. Многочестные ультразвуковые инструменты:
 1 – обойма; 2 – припой; 3 – инструмент

Наиболее распространенные и технологичные конструкции многоместного инструмента приведены на рис. 6.5, *в*. В этом случае обойма имеет углубления со скосами под пайку инструментов мягким или твердым припоем.

Приведенный на рис. 6.5, *з* инструмент изготавливается в виде сотового набора калиброванных трубок с толщиной стенки порядка 0,2...0,3 мм, впаянных в обойму. Такой инструмент эффективно применяют для вырезания большого количества круглых заготовок диаметром 6...8 мм.

Детали крупных размеров, имеющие более сложную форму, а также прорезы, пазы и другие элементы, расположенные по наружному контуру, изготавливают последовательной обработкой по элементам контура за несколько переходов или операций.

Разрезание заготовок и раскрой материала

Для разрезания и раскроя заготовок из кварца, кремния, феррита и рубина могут применяться одиночный (рис. 6.6, *а*) и многоместный инструменты (рис. 6.6, *б*).

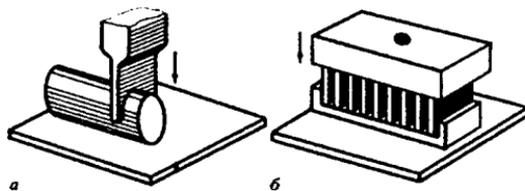


Рис. 6.6. Схема ультразвукового разрезания заготовок:
а – одиночным инструментом; *б* – многоместным инструментом

Обработку одиночным инструментом применяют в опытном производстве, а также при значительных размерах заготовок (диаметр более 20 мм и толщина свыше 2 мм). В случаях отрезания пластин малой толщины (менее 0,5 мм) одиночным инструментом из-за поперечных колебаний тонкого инструмента заготовки часто ломаются.

Для устранения этого, а также с целью повышения производительности более эффективным является применение многоместного инструмента. Чтобы предотвратить сколы материала на выходе инструмента, заготовку перед обработкой приклеивают шеллаком или мастикой к стеклянной подкладке. Для этого ее и заготовку предварительно разогревают, затем на поверхность подкладки ровным тонким слоем наносят мастику и сверху укладывают заготовку.

При изготовлении пластин-заготовок (4 × 12 × 45 мм) для пьезодатчиков брусок кварца разрезают многоместным инструментом. Во избежание сколов на выходе инструмента применяют следующую технологию (рис. 6.7). Брусок разрезают на части шириной 13 мм (на 1 мм больше ширины обрабатываемой пластины). Затем брусок наклеивают на стеклянную прокладку 2 и алмазным кругом сошлифовывают перемычку, связывающую заготовку (шлифование осуществляется вдоль стрелки *А*). После расклеивания получают шесть пластин-заготовок 1.

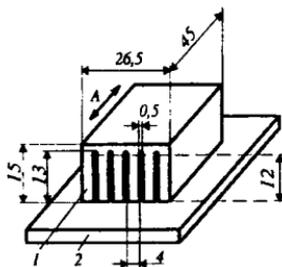


Рис. 6.7. Схема изготовления пьезодатчиков из кварца

Данная технология предотвращает сколы на кромках деталей, т.е. обеспечивает высокое их качество, хотя при этом неизбежны потери материала на перемычки. Однако они окупаются разницей в толщине реза. Так, при алмазной разрезке толщина круга составляла 1,2 мм, а толщина лезвия ультразвукового инструмента – 0,4 мм.

Преимущества ультразвуковой резки перед резкой алмазными кругами возрастают с увеличением количества лезвий в инструменте. Например, резка бруска кварца сечением 16×16 мм на пластины толщиной 0,4 мм многоместным инструментом, включающим 20 лезвий, выполняется за 4 мин, т.е. на получение одной пластины затрачивается 12 с, в то время как на алмазную отрезку одной такой пластины требуется 1 мин.

Известен способ ультразвуковой обработки неэлектрических хрупких материалов движущимся непрофилированным инструментом – тонкой проволокой. Для возбуждения в подвижном инструменте ультразвуковых колебаний можно использовать три варианта акустических систем, схемы которых приведены на рис. 6.8.

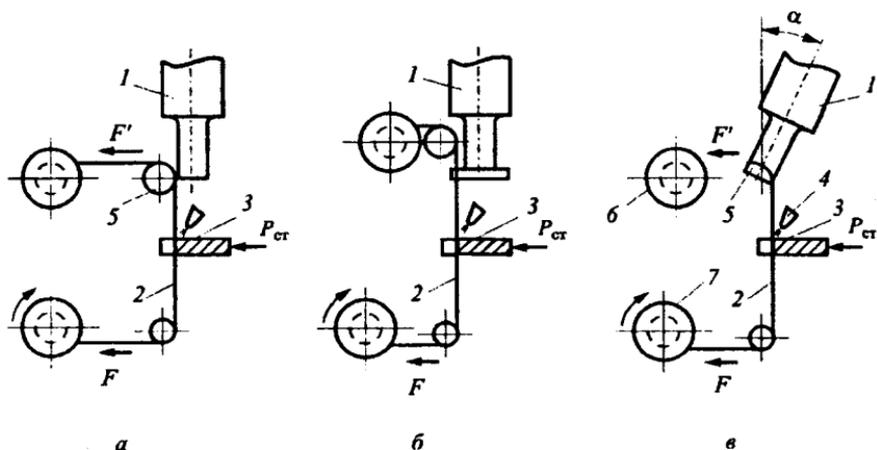


Рис. 6.8. Принципиальные схемы ультразвуковой размерной обработки непрофилированным инструментом

В первом случае (рис. 6.8, а) инструмент прижимается к боковой поверхности концентратора подпружиненным роликом 5 и за счет сил трения в проволоке 2 возбуждаются ультразвуковые колебания.

В варианте на рис. 6.8, б инструмент-проволока 2 протягивается с небольшим натягом через фильеру, установленную в пучности колебаний концентратора. В последнем случае (рис. 6.8, в) инструмент огибает концентратор 1 по радиусной канавке, а прижим проволоки к концентратору осуществляется за счет ее противонапряжения.

Как показала практика, оптимальным является последний вариант, при котором обеспечивается стабильное протекание процесса при различных диаметрах инструмента.

Обработка по этой схеме осуществляется следующим образом. В натянутой между двух опор проволоке, постоянно перематываемой с одной катушки 6 на другую катушку 7, с помощью шипа 5 возбуждаются ультразвуковые колебания от концентратора. Обрабатываемую заготовку 3 с небольшим усилием прижимают к инструменту, а в зону их контакта подается абразивная суспензия 4. Этот своеобразный «ультразвуковой лобзик» позволяет выполнять контурную вырезку, обработку узких пазов и щелей (шириной свыше 0,1 мм), разрезку заготовок и др. Производительность процесса резки стекла непрофилированным инструментом Q составляет 150...200 мм²/мин. Этот способ наиболее эффективен при обработке очень тонких деталей из стекла и керамики, когда другие способы вызывают разрушение детали. На производительность процесса и точность обработки основное влияние оказывают сила натяжения рабочего участка инструмента F и сила подачи $P_{ст}$ детали, свойства материала и толщина обрабатываемой детали, амплитуда и спектр колебаний инструмента-проволоки, материал и зернистость абразива.

Процесс обработки осуществляется под действием изгибных колебаний, возбуждаемых в проволочном инструменте. Работа изгибных колебаний зависит главным образом от амплитуды колебаний волновода A_0 и силы натяжения инструмента F .

Обработка отверстий

Данная операция является наиболее распространенной при ультразвуковой размерной обработке. Этим способом обрабатывают отверстия различной формы размером от 0,2 до 80 мм и глубиной более 20...30 мм. Обработку на глубине 15...20 мм эффективно можно выполнять при активных способах подвода абразивной суспензии (прокачка под давлением и вакуумный отсос). Ультразвуковую обработку

отверстий глубиной более 30 мм целесообразно осуществлять алмазным инструментом на металлической связке.

Ультразвуковая обработка отверстий небольшой глубины особых трудностей не вызывает. Необходимо только предусматривать меры, предотвращающие появление сколов на выходе инструмента. С этой целью на выходе инструмента приклеивают защитные подкладки из стекла или ведут обработку пакетов заготовок, а также снижают статическую нагрузку в конце обработки. На входе инструмента наблюдается скругление кромок на заготовке. Для устранения этого дефекта применяют защитные накладки, а иногда оставляют припуск по толщине, который после ультразвуковой обработки сошлифовывают.

При ультразвуковой обработке отверстий, так же как при вырезании по контуру и раскрое, применяют одиночные и многоместные инструменты (рис. 6.9).

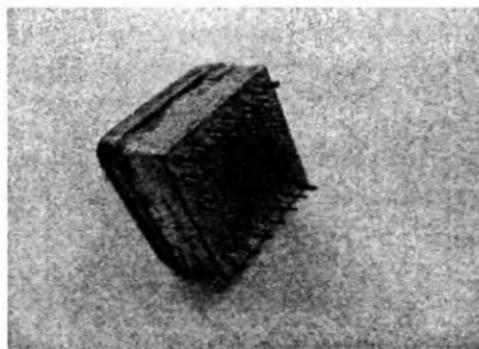


Рис. 6.9. Общий вид многоместного инструмента для прошивания отверстий

В мелкосерийном производстве установку заготовки при ультразвуковой обработке отверстий одиночными инструментами целесообразно производить при помощи специальных кондукторных втулок (рис. 6.10). Кондуктор, изготовленный из текстолита или латуни, имеет точно выполненное отверстие для правильной ориентации заготовки, прикрепленной на подкладку, относительно инструмента. После ориентации заготовки подкладку крепят к столу станка. Затем снимают кондукторную втулку и производят ультразвуковую

обработку. Применение кондукторных втулок позволяет вести обработку отверстий различной формы с точностью их взаимного расположения до 0,1 мм. При обработке по разметке максимальная точность расположения отверстий составляет около 0,2 мм.

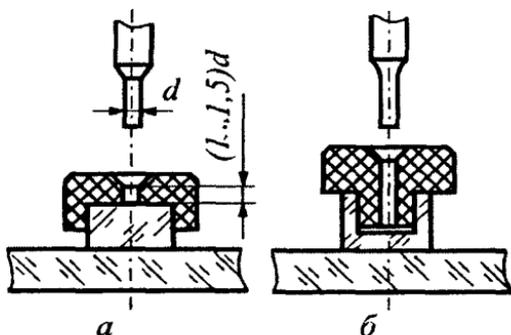


Рис. 6.10. Схемы ультразвуковой обработки отверстий по кондуктору:
a – с базированием по наружному контуру;
б – с базированием по внутреннему контуру

Обработка деталей из твердых сплавов

Наиболее эффективным способом повышения производительности ультразвуковой обработки твердых сплавов и других электропроводящих материалов является совмещенный (комбинированный) метод. Он основан на рациональной комбинации ультразвукового и электрохимического процессов анодного растворения.

Процесс электрохимического анодного растворения металлов заключается в том, что при прохождении электрического тока через электролит на поверхности заготовки, включенной в цепь источника постоянного тока в качестве анода, происходят химические реакции, в результате которых поверхностный слой металла переходит в окислы, соли и другие химические соединения. Процесс анодного растворения в неподвижном электролите имеет низкую производительность и характеризуется тем, что его интенсивность со временем обработки снижается по экспоненциальному закону. Это связано с тем, что образующаяся на аноде (заготовке) неэлектропроводящая пленка гидратов окиси быстро покрывает всю поверхность обрабатываемой детали (пассивация анода).

Если объединить в один два процесса – ультразвуковую размерную обработку и анодное растворение, то происходит следующее. Во-первых, зерна абразива воздействуют не на прочный и вязкий обрабатываемый материал, а на хрупкую пленку окислов, которая легко удаляется, и, во-вторых, действию электрического тока, проходящего через электролит, подвергаются неактивированные участки обрабатываемой поверхности. В результате одновременного протекания процессов анодного растворения и ультразвуковой обработки облегчаются условия работы абразивных зерен и обеспечивается близкий к 100 % выход по току. По сравнению с обычной ультразвуковой обработкой это ведет к повышению производительности процесса и снижению износа инструмента.

На рис. 6.11 приведена схема совмещенного метода обработки. По сравнению со схемой обычной ультразвуковой размерной обработки в данном случае добавляется источник постоянного тока напряжением 6...18 В, положительный полюс которого подключается к заготовке, а отрицательный – к концентратору и инструменту ультразвуковой колебательной системы. Обрабатываемая заготовка электрически изолирована от станка прокладкой. Абразивные зерна взвешены в электролите, состав которого, а также плотность тока выбираются оптимальными для каждого обрабатываемого материала.

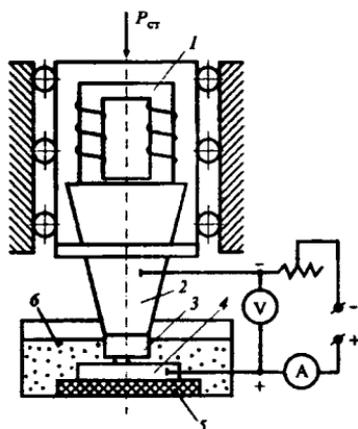


Рис. 6.11. Принципиальная схема совмещенного способа обработки:
 1 – преобразователь; 2 – концентратор; 3 – инструмент;
 4 – обрабатываемая заготовка; 5 – электроизоляционная прокладка;
 6 – абразивная суспензия

Производительность совмещенного метода обработки твердых сплавов в 50 раз выше электроэрозионного и в 10 раз выше обычного ультразвукового. Кроме того, в 8...10 раз снижается износ инструмента, в 3...5 раз уменьшается удельный расход электроэнергии (энергоемкость процесса); представляется возможным заменить карбид бора значительно более дешевым карбидом кремния. Недостаток совмещенного метода обусловлен несколько меньшей по сравнению с ультразвуковой точностью обработки и необходимостью защиты открытых поверхностей станка от коррозии.

Ультразвуковая установка для обработки отверстий

Для проведения экспериментов по обработке отверстий в заготовках из хрупких материалов в работе используется ультразвуковая установка, схема и общий вид которой приведены на рис. 6.12.

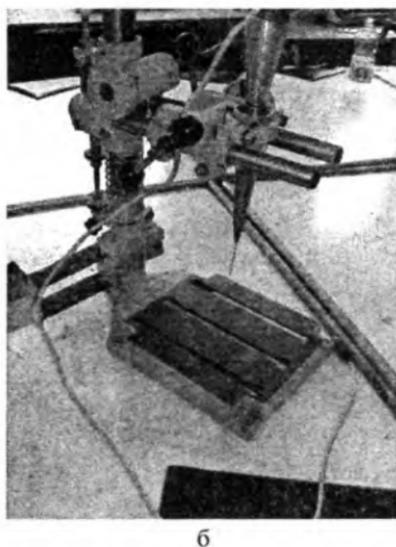
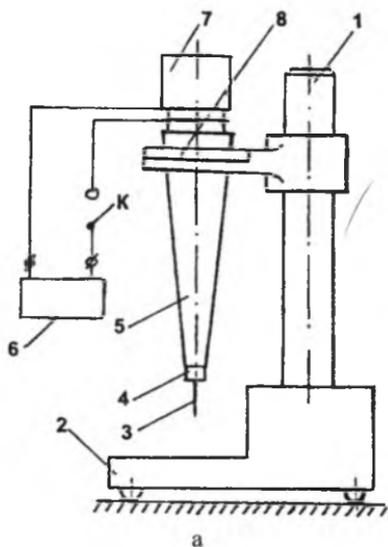


Рис. 6.12. Ультразвуковая установка для обработки отверстий:
а - принципиальная схема; б - общий вид

Установка состоит из акустической колебательной системы, которая включает в себя пьезокерамический ультразвуковой преобразователь.

зователь продольных колебаний 7, конический концентратор 5, сменный наконечник 4 с инструментом 3. Посредством фланца, выполненного на концентраторе, акустическая система закреплена на кронштейне 2. Последний установлен на цилиндрической стойке 1, которая жестко закреплена на массивном основании 2. Питание ультразвукового преобразователя осуществляется от генератора 6 через педальный выключатель К.

На рис. 6.13 показан сменный наконечник в сборе с инструментом, в качестве которого используется тонкая стальная проволока. Одним концом она с помощью мягкого припоя ПОС закрепляется в отверстии сменного наконечника, который посредством резьбового хвостовика жестко связывается с выходным торцом конического концентратора, образуя с ним резонансную акустическую систему.

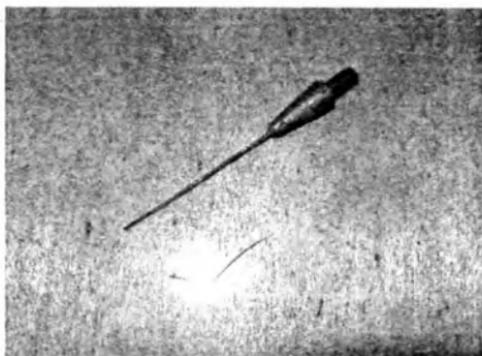


Рис. 6.13. Общий вид сменного наконечника в сборе с инструментом

Порядок выполнения работы

1. Получить у инженера стеклянные образцы, предназначенные для обработки.

2. С помощью штангенциркуля измерить толщину образцов и полученные данные занести в соответствующую графу 1 (h_3) табл.6.2.

3. Приготовить абразивную суспензию, для чего:

3.1) с помощью мерной ложки насыпать в емкость определенный объем абразивного порошка. Данные о его марке и зернистости занести в табл. 6.2;

3.2) с помощью той же ложки добавить в емкость воду в объеме, равном пяти объемам абразивного порошка, и тщательно перемешать полученную абразивную суспензию.

4. С помощью штангенциркуля измерить диаметр проволочного инструмента в его нижнем сечении и полученные данные занести в соответствующую графу 2 (d_n) табл. 6.2.

5. Поместить, как показано на рис. 6.14, на рабочий стол ультразвуковой установки пластмассовую ванночку для сбора в процессе обработки абразивной суспензии.

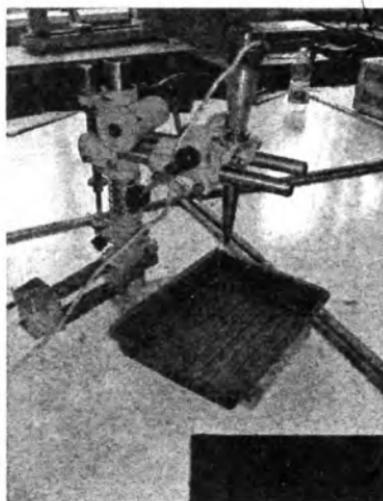


Рис. 6.14. Экспериментальная установка и ванночка для сбора абразивной суспензии

6. Произвести опробование работы ультразвуковой установки, для чего:

6.1) переместить тумблер «Сеть» на панели ультразвукового генератора в верхнее положение. При этом должна загореться сигнальная лампочка;

6.2) нажав ногой на педальный переключатель, включить цепь питания ультразвукового преобразователя. При этом должен появиться характерный звук;

6.3) взять мерной ложкой небольшое количество воды и аккуратно вылить ее сверху на колеблющийся проволочный инструмент.

При этом должно наблюдаться ее интенсивное диспергирование, что свидетельствует о достаточной для обработки амплитуде ультразвуковых колебаний инструмента. После этого с помощью pedalного выключателя отключить питание ультразвукового преобразователя.

7. Осуществить обработку отверстий в стеклянных образцах, для чего выполнить следующее:

7.1) на поверхность образца, с которой начинается обработка отверстия (поверхность входа инструмента), приклеить кусочек изолянт, т.е. нанести метку;

7.2) для предохранения рук от загрязнения абразивной суспензией учащемуся, который будет проводить обработку, необходимо надеть матерчатые рабочие перчатки;

7.3) взять образец и, удерживая его с двух сторон между большим и указательным пальцами рук, с небольшим усилием прижать его обрабатываемой поверхностью к торцу проволочного инструмента, как показано на рис. 6.15;



Рис. 6.15. Процесс получения отверстия в стеклянной заготовке

7.4) второму учащемуся, предварительно перемешав абразивную суспензию, с помощью мерной ложки нанести ее на обрабатываемую поверхность образца в зоне контакта с инструментом;

7.5) учащемуся, который работает на ультразвуковой установке, включить цепь питания ультразвукового преобразователя с помощью pedalного переключателя и, удерживая его в этом положении, начать обработку отверстия и одновременно вести отсчет времени по секундомеру;

7.6) в процессе обработки второй учащийся, постоянно перемещая абразивную суспензию, с помощью мерной ложки периодически наносит ее на обрабатываемую поверхность образца в зоне ее контакта с инструментом;

7.7) в момент окончания обработки, т.е. получения в заготовке сквозного отверстия с выходом через него инструмента, снять показания времени с секундомера и занести значение продолжительности обработки (T_0) в соответствующую графу 3 табл. 6.2. Не выключая питания преобразователя, аккуратно перемещая заготовку вниз, освободить ее от инструмента, после чего выключить питание преобразователя и ультразвукового генератора.

8. Провести измерения геометрических параметров полученного отверстия, для чего:

8.1) обработанный образец промыть водой для удаления остатков абразивной суспензии и насухо протереть ветошью;

8.2) поместить образец на измерительный стол микроскопа МИМ-5 и в двух взаимно перпендикулярных направлениях измерить диаметр отверстия, полученного на поверхности образца со стороны входа инструмента. Вычислить среднее его значение ($d_{вх}$) и занести в табл. 6.2. Переустановить образец на противоположную сторону, аналогичным образом измерить диаметр на выходе инструмента ($d_{вых}$) и полученное значение также занести в табл. 6.2. При выполнении этих измерений обратить внимание на наличие и величину сколов, возникающих на кромках отверстия как со стороны входа, так и выхода инструмента. Эти данные занести в соответствующие графы таблицы.

9. Определить производительность операции ультразвуковой обработки отверстия в стекле по значению скорости перемещения инструмента V_n . Для этого величину толщины стеклянного образца разделить на полученное значение продолжительности обработки отверстия:

$$V_n = \frac{h}{T_0}, \text{ мм/мин.}$$

Вычисленное значение V_n занести в табл. 6.2.

10. Оценить степень соответствия диаметра полученного отверстия диаметру проволочного инструмента. Для этого вычислить величину бокового зазора между инструментом и стенками полученного отверстия как на входе ($\Delta_{з.вх}$), так и на выходе ($\Delta_{з.вых}$) инструмента по следующим формулам:

$$\Delta_{з.вх} = \frac{d_{вх} - d_{и}}{2} \text{ и } \Delta_{з.вых} = \frac{d_{вых} - d_{и}}{2}.$$

Вычисленные значения $\Delta_{з.вх}$, $\Delta_{з.вых}$ занести в табл. 6.2.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Краткие сведения о физической сущности процесса ультразвуковой размерной обработки хрупких материалов и его технологических возможностях.
4. Схема ультразвуковой установки, используемой в данной лабораторной работе.
5. Полученные результаты измерений и расчетов показателей ультразвуковой обработки отверстия в стеклянной заготовке.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы лежат в основе ультразвуковой размерной обработки хрупких материалов?
2. По какому критерию оценивается обрабатываемость материалов ультразвуковым способом?
3. Как на производительность ультразвуковой размерной обработки влияют характеристики абразивной суспензии, амплитуда и частота колебаний инструмента, а также статическая нагрузка?
4. Как осуществляется обработка деталей по наружному контуру?
5. Какие вы знаете схемы ультразвуковой размерной обработки непрофилированным инструментом?
6. Какие меры предпринимаются для предотвращения появления сколов материала на выходе инструмента при обработке сквозных отверстий?

7. Какие преимущества дает объединение в один двух процессов – ультразвуковой размерной обработки и анодного растворения?

8. Из каких основных деталей и узлов состоит установка для ультразвуковой обработки отверстий в хрупких материалах?

Литература

1. Киселев, М.Г. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения: учебное пособие / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Г.А. Есьман. – Минск: Тесей, 2003. – 424 с.

2. Ультразвук / под ред. И.П. Голяминой. – М.: Сов. энцикл., 1979. – 400 с.

Лабораторная работа № 7

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Цель работы

1. Изучить физическую сущность процесса электроэрозионной обработки металлов и применяемые технологические схемы.
2. Изучить технологические возможности и области эффективного применения электроэрозионной обработки отверстий.
3. Изучить устройство и работу электроэрозионного прошивочного станка мод. ОЧЭП-10М.
4. Осуществить прошивание отверстий в листовой заготовке и оценить производительность операции и точность полученных отверстий.

Инструменты и принадлежности

1. Электроэрозионный прошивочный станок мод. ОЧЭП-10М.
2. Металлическая заготовка из листового материала.
3. Медная проволока для электрода-инструмента.
4. Штангенциркуль ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу, равной 0,05 мм.
5. Микроскоп МИМ-5.

Основные сведения о теории процесса электроэрозионной обработки и применяемых технологических схемах

Общее описание процесса и стадий его протекания

Электроэрозионные методы обработки основаны на использовании явления *электрической эрозии* – направленного разрушения электропроводящих материалов в результате кратковременного теплового действия импульсных электрических разрядов между инструментом и заготовкой в жидкой диэлектрической среде.

Проанализируем основные стадии протекания электроэрозионного процесса снятия припуска.

По мере сближения электрода-инструмента с заготовкой напряженность E электрического поля возрастает обратно пропорционально расстоянию между электродами:

$$E = \frac{U}{S},$$

где U – разность потенциалов электрода-инструмента и заготовки;
 S – зазор между электродами.

При этом наибольшая напряженность E возникает на участке, где межэлектродный зазор минимален. Причем расположение этого участка зависит от местных выступов и неровностей на инструменте и заготовке, а также от наличия и размеров электропроводных частиц (продуктов разрушения), находящихся в межэлектродном промежутке.

Если электроды сблизить до расстояния нескольких десятков микрометров, то в отдельных местах напряженность электрического поля может достигнуть значения, при котором в месте минимального зазора возникнет электрический разряд и через промежуток протекает электрический ток, т.е. имеет место направленное движение электронов. В электрическом поле, возникшем в межэлектродном пространстве, в направлении, обратном движению электронов, происходит перемещение более тяжелых частиц – ионов. Электроны, имеющие меньшую массу, быстро достигают положительно заряженной поверхности заготовки и нагревают металл, вызывая его расплавление и испарение в месте прохождения тока. В результате такого воздействия на поверхности заготовки образуется углубление в форме сферической лунки. Вылетевшие из лунки частицы металла охлаждаются жидкостью, находящейся в зазоре, и застывают в виде миниатюрных шариков. В результате воздействия серии разрядов поверхность приобретает кратерообразную поверхность с явно выраженными углублениями в виде множества перекрывающих друг друга лунок. Эти лунки формируют топографию поверхности и характеризуют ее шероховатость.

В электроискровом режиме большинство ионов, имеющих значительную массу, не успевает достичь отрицательно заряженного электрода и вызвать удаление металла с его поверхности. Поэтому

съем металла преимущественно происходит с анода, который выбирают в качестве заготовки. Интенсивность износа электрода-инструмента определяется количеством ионов, достигающих его поверхности. При этом чем меньше будет износ инструмента, тем точнее можно получить деталь. С этой целью стремятся сформировать импульс с меньшей длительностью, чтобы ионы не успевали достичь поверхности катода. Однако это приводит к возрастанию времени обработки и снижению ее производительности. Полярность, при которой заготовка является анодом, называют *прямой*, и она, как правило, используется при электроэрозионной обработке на электроискровом режиме.

По мере увеличения длительности импульсов возрастает интенсивность съема металла с катода (инструмента) за счет воздействия на него потока ионов. При этом можно подобрать такое время протекания тока, при котором доля съема металла электронами составит лишь незначительную часть от общего объема удаленного с электродов материала. Следовательно, в этом случае катодом следует считать заготовку. Полярность, при которой анодом является электрод-инструмент, называют *обратной*, и она используется на электроэрозионной обработке при электроимпульсном режиме.

Полярность зависит не только от длительности импульса, но и от используемых в качестве электродов инструментов материалов. Так, для снижения износа электрода-инструмента от воздействия потока электронов его изготавливают из материалов, слабо разрушающихся под действием искровых разрядов, в частности, графитовых и медно-графитовых композиций.

В общем случае однократный акт удаления металла в процессе электроэрозионной обработки состоит из трех основных стадий.

Первой стадией эрозионного процесса является пробой межэлектродного промежутка в результате образования локальной зоны с высокой напряженностью поля. Для применяемых при электроэрозионной обработке диэлектрических жидкостей напряженность поля в момент разряда достигает десятков мегавольт на метр. Под действием разряда происходит ионизация промежутка между электродами 1 и 2 (рис. 7.1), через который начинает протекать электрический ток, т.е. образуется *канал проводимости* 3. Он представляет собой довольно узкую цилиндрическую зону, заполненную нагретым веществом (плазмой), содержащим электроны и ионы. При

этом скорость нарастания силы тока, протекающего через канал проводимости, может достигать сотен килоампер в секунду. В результате на границах канала происходит плавление металла и образуются лунки, которые по форме близки к сферической.

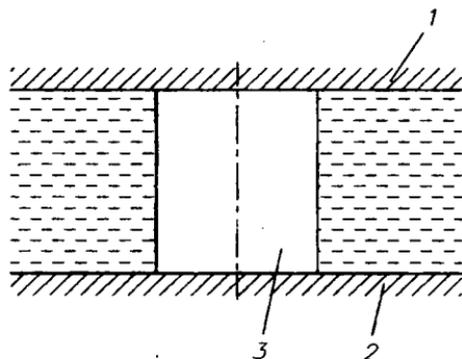


Рис. 7.1. Стадия пробоя межэлектродного промежутка:
 1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка;
 3 – образовавшийся канал проводимости

Вторая стадия характеризуется образованием около канала проводимости газового пузыря из паров жидкости и металлов. В результате действия высокого давления (до $2 \cdot 10^7$ Па) канал проводимости стремится расширяться, сжимая окружающую его газовую фазу. В силу инерции вначале газовый пузырь и окружающая его жидкость остаются неподвижны, а затем начинается их расширение. При этом граница канала проводимости движется в радиальном направлении с высокой скоростью, которая может достигать 150...200 м/с. На наружной границе образуется так называемый фронт уплотнения, в котором давление скачкообразно изменяется от исходного в жидкости до высокого его значения на границе.

Наступление **третьей стадии** связано с прекращением протекания тока, отрывом ударной волны от газового пузыря и продолжением его расширения по инерции. Ударная волна постепенно гасится окружающей жидкостью.

В межэлектродном промежутке (рис. 7.2) в начале этой стадии находятся жидкий металл 2 в углублениях электродов 1 и б; газовый пузырь 3, внутри которого присутствуют пары 4 металлов заго-

товки и инструмента; жидкий диэлектрик 5. В тот момент, когда газовый пузырь достигнет наибольшего размера, давление внутри него резко падает. При этом в лунках расплавленный металл вскипает и выбрасывается в межэлектродный промежуток.

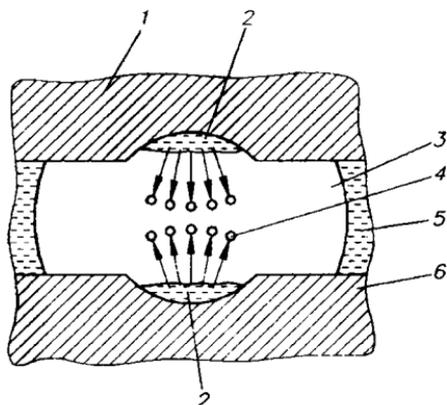


Рис. 7.2. Завершающая стадия единичного разряда:

- 1 – электрод-инструмент; 2 – жидкий металл; 3 – газовый пузырь;
4 – пары металла заготовки и инструмента; 5 – жидкий диэлектрик;
6 – обрабатываемая заготовка

Основные технологические показатели процесса электроэрозионной обработки (производительность, точность и качество поверхности) зависят от количества металла, выплавленного из лунки за один импульс. В свою очередь, это количество определяется энергией импульса $A_{и}$, которую можно представить как работу электрического тока, определяемую произведением силы тока I на напряжение U за время $\tau_{и}$ протекания импульса:

$$A_{и} = \int_0^{\tau_{и}} I \cdot U \cdot dt$$

Для технологических целей в первом приближении энергию $A_{и}$ можно рассчитывать по средним значениям силы тока и напряжения, т.е.

$$A_{\text{н}} = I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ср}} \cdot \tau_{\text{н}}$$

При этом среднее значение напряжения пробоя $U_{\text{ср}} = (0,5 \dots 0,75) U_0$, где U_0 – напряжение холостого хода при разомкнутых контактах, которое легко контролировать в процессе обработки.

Для различных режимов электроэрозионной обработки используются различные значения напряжения холостого хода. Так, при электроискровом режиме принимают $U_0 = 40 \dots 180$ В, при электроимпульсном $U_0 = 18 \dots 36$ В. Электроэрозионную обработку в жидкой среде осуществляют при $U_0 = 18 \dots 40$ В, а в воздухе – при $U_0 = 3 \dots 12$ В.

Среднюю силу тока определяют через значение тока $I_{\text{к}}$ при коротком замыкании электродов: $I_{\text{ср}} = (0,5 \dots 0,75) I_{\text{к}}$. При этом силу тока короткого замыкания можно устанавливать и контролировать по приборам станка. Ее значение устанавливают в зависимости от обрабатываемого материала и требуемой шероховатости поверхности. Так, при черновой обработке стали $I_{\text{к}} = 20 \dots 120$ А, при чистой $I_{\text{к}} = 0,5 \dots 5$ А. При обработке твердых сплавов значение $I_{\text{к}}$ принимается $0,2 \dots 0,5$ А.

Длительность импульсов $\tau_{\text{н}}$ обратно пропорциональна частоте f их следования. Поскольку между импульсами имеются паузы, то при расчете $\tau_{\text{н}}$ следует учитывать скважность q , которая определяется отношением периода T следования импульсов к их длительности:

$$q = \frac{T}{\tau_{\text{н}}}, q > 1.$$

Так как $f = \frac{1}{T}$, то длительность импульса определяется по выражению

$$\tau_n = \frac{1}{q \cdot f}.$$

Длительность импульса зависит от обрабатываемого материала и режима обработки. Так, при черновой обработке сталей $\tau_n = 5 \dots 200$ мкс, при чистовой $\tau_n = 5 \dots 200$ мкс. Для обработки твердых сплавов длительность импульса принимается на 2–3 порядка ниже.

При электроэрозионной обработке используются импульсы различной формы, но одной полярности (униполярные). Форма импульсов подбирается такой, чтобы при определенных параметрах импульса получить наибольшее углубление на заготовке, т.е. обеспечить наиболее эффективное использование подводимой энергии. Например, увеличение тока в импульсе в два раза позволяет повысить скорость эрозии в 2,5–3 раза. В общем случае в рабочем диапазоне режимов выбирают определенное отношение максимального значения силы тока в импульсе к его длительности.

Основные технологические схемы электроэрозионной обработки

В настоящее время применяется несколько технологических схем электроэрозионной обработки.

1. **Прошивание** – удаление металла из полостей, углублений, отверстий, пазов с наружных поверхностей. На рис. 7.3 приведены схемы изготовления углубления (рис. 7.3, а) и фасонного стержня (рис. 7.3, б). Электрод-инструмент 1 поступательно перемещается к заготовке 2 со скоростью V_n . Оба электрода помещены в ванну 3, заполненную диэлектрической жидкостью 4. Продукты обработки 5 выбрасываются в межэлектродный промежуток и оседают на дно ванны. С помощью прошивания можно получать поверхности как с прямой, так и с криволинейной осью.

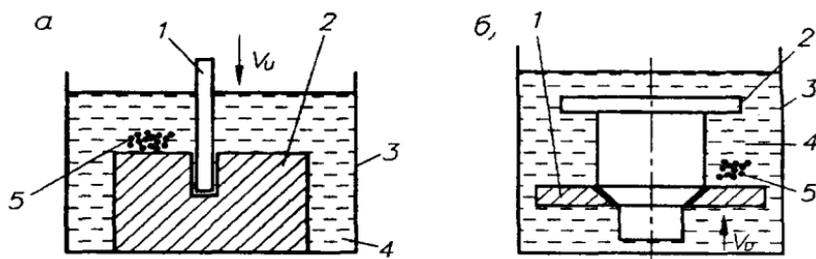


Рис. 7.3. Схема электроэрозионного прошивания:
а – прямое копирование; *б* – обратное копирование;
 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка;
 3 – ванна; 4 – диэлектрическая жидкость;
 5 – продукты обработки

Применяются два варианта прошивания:

1) прямое копирование, когда электрод-инструмент находится над заготовкой (см. рис. 7.3, *а*);

2) обратное копирование с расположением заготовки над электродом-инструментом (см. рис. 7.3, *б*). В этом случае движение подачи может осуществлять заготовка. Кроме того, при обратном копировании облегчается удаление продуктов обработки и за счет сокращения числа боковых разрядов через частицы расплавленного металла в межэлектродном промежутке можно повысить точность обработки детали.

2. **Электроэрозионное шлифование.** Схема такого процесса приведена на рис. 7.4. Она аналогична схеме традиционного круглого наружного шлифования с той лишь разницей, что вместо шлифовального круга применяется металлический электрод-инструмент 1 в форме диска. Он совершает вращательное и поступательное движение к заготовке 2 со скоростью V_n . Диэлектрическая жидкость 3 подается в МЭП поливом из насадки 4. При обработке заготовок небольших размеров процесс может осуществляться в ванне, заполненной рабочей жидкостью. Как и традиционное шлифование, электроэрозионное может быть как встречным, так и попутным.

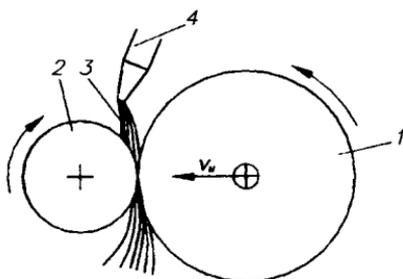


Рис. 7.4. Схема электроэрозионного шлифования:
 1 – вращающийся электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка;
 3 – диэлектрическая жидкость; 4 – насадка

3. Разрезание профильным и непрофилированным инструментом. Оно включает разделение заготовок на части – *отрезание* – и получение непрямолинейного контура – *вырезание*, которое выполняется только непрофилированным электродом-инструментом. При разрезании (рис. 7.5, а) профильный электрод-инструмент может быть выполнен в виде диска или пластины. Так, вращающийся металлический диск-электрод 1 перемещается к заготовке 2 со скоростью V_n и в плоскости вращения вдоль детали. Обработка осуществляется в ванне 3, заполненной диэлектрической жидкостью 4. Если разрезание выполняется пластиной с одним поступательным перемещением ее к заготовке, то это будет прошивание.

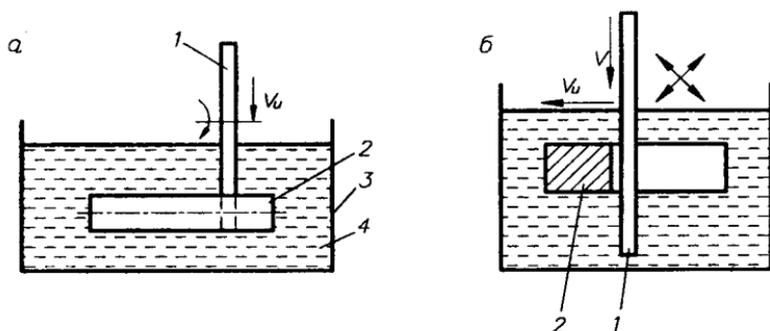


Рис. 7.5. Схема электроэрозионного разрезания:
 а – отрезание; б – вырезание непрофилированным инструментом;
 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – ванна;
 4 – диэлектрическая жидкость

В случае применения непрофилированного электрода (рис. 7.5, б) инструмент 1 выполняют в форме круглой проволоки диаметром 0,02...0,3 мм или тонкого стержня, которые могут перемещаться в различных направлениях со скоростью V_n в любой части заготовки 2. Для устранения влияния износа электрода инструмента на точность прорезаемых пазов проволоку постоянно перематывают вдоль ее оси со скоростью V . Разрезание осуществляют в ванне с диэлектрической жидкостью.

Основные сведения об операциях электроэрозионной обработки отверстий

Эти операции электроэрозионной обработки применяются:

– для удаления из деталей обломков метчиков, сверл и других инструментов. Такие процессы выполняют при режимах наибольшей производительности без предъявления требований к качеству и точности обработанных отверстий;

– для прошивания отверстий диаметром $d = 1$ мм и глубиной до $12d$;

– для прошивания отверстий диаметром $d = 1$ мм и глубиной более $12d$. Эти операции выполняют с применением направляющих втулок и прокачки рабочей жидкости;

– для прошивания отверстий малого диаметра ($d < 1$ мм). В этом случае необходимо применять кондуктор и желательна прокачка рабочей жидкости;

– для прошивания некруглых отверстий, пазов. Здесь основное внимание следует уделить изготовлению электрода-инструмента, который может иметь сложную форму и высокую точность размеров сечений;

– для прошивания отверстий и пазов с криволинейной осью. В этом случае расчет подачи электрода-инструмента выполняется с учетом его перемещения по заданной траектории, например по окружности.

При этом все виды деталей могут обрабатываться в одно- и многоместных приспособлениях одним или несколькими электродами-инструментами.

При удалении обломков инструмента необходимо знать габариты и массу детали, так как на основании этого подбирают требуемый станок. Если эти параметры заготовки превышают установленные для данного типа станка значения, то обработку выполняют выносной электроэрозионной головкой типа головки радиального станка, а ванну выполняют из пластилина или резиновой присоски.

В процессе удаления обломков инструментов обычно применяют схему прямого копирования одним электродом-инструментом из меди, латуни, алюминия или его сплавов. Как правило, режимы обработки не рассчитываются, а берутся их фиксированные значения, указанные на станках. В этом случае рассчитывают площадь сечения электрода при условии, что его диаметр d_1 (рис. 7.6) должен быть не меньше диаметра окружности, касательной профилю метчика, сверла или другого инструмента. Для метчиков d_1 принимают равным половине наружного диаметра D ; для сверл – не менее размера сердцевины и обычно в пределах $1/4$ диаметра сверла. Длину электрода-инструмента берут как сумму длин участка для его закрепления в электродержателе и рабочей части, равной длине обрабатываемого участка, и участка разрушающегося в результате эрозии. Применение кондукторных втулок, а также нанесение диэлектрических покрытий для рассматриваемой операции нецелесообразно.

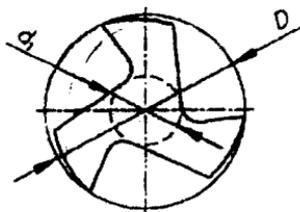


Рис. 7.6. Схема для определения диаметра электрода-инструмента при удалении обломка метчика

После завершения прошивания отверстия оставшиеся, не связанные между собой части метчиков или сверл легко удаляются из детали. В случае когда из резьбового отверстия необходимо удалить обломившуюся часть шпильки или болта, в ней прошивают квадратное или шестиугольное углубление, причем за счет износа электрода-инструмента оно будет иметь угол уклона боковых стенок в

пределах 2...6°. Затем в полученное углубление вставляют специальный ключ с рабочей частью, обратной форме углубления, и вывертывают обломок, восстанавливая деталь.

Электроэрозионный способ удаления обломков инструмента и крепежных деталей позволяет устранить брак при изготовлении деталей и сборочных единиц на заключительных операциях технологического процесса, исключить необходимость отжига, который применяют для снижения твердости обломка инструмента.

Прошивание отверстий небольшой глубины чаще всего используется при изготовлении деталей труднообрабатываемых материалов, например, твердых, магнитных, жаропрочных сплавов, а также закаленных сталей, термический отпуск которых нецелесообразен. Обработку выполняют одним инструментом без его вращения и без применения прокачки жидкости.

Для получения окончательного размера точного отверстия электрод-инструмент 1 подают через кондукторную втулку 2 (рис. 7.7). Саму втулку выполняют из диэлектрика, а для снижения трения в нее запрессовывают кольца 3, которые могут быть изготовлены как из электропроводных, так и электроизоляционных материалов. Втулка должна точно базироваться относительно заготовки 4. С целью снижения погрешностей по сечениям обрабатываемого отверстия электроду-инструменту сообщают вращательное движение вокруг его оси.

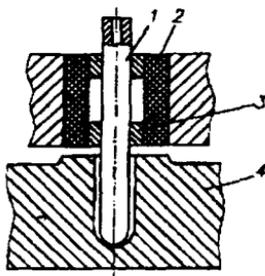


Рис. 7.7. Схема окончательной обработки прецизионных отверстий:

1 – электрод-инструмент; 2 – кондукторная втулка из диэлектрического материала;
3 – направляющие кольца; 4 – обрабатываемая заготовка

При выборе материала электрода-инструмента руководствуются следующими рекомендациями. Для обработки закаленных сталей, жаропрочных, твердых и титановых сплавов можно использовать

графитовые композиции. Для жаропрочных сплавов и сталей применяется также медь, а для титана – латунь. Вместе с тем электроды-инструменты диаметром до 4–5 мм из графитовых композиций используются редко в силу их малой прочности и хрупкости. Как правило, электроды-инструменты изготавливают цельными без изменения размера по длине. При этом они должны быть изготовлены с точностью на 1–2 квалитета точнее, чем обрабатываемое отверстие. Помимо этого для повышения точности размеров обрабатываемого отверстия осуществляют прокачку или отсос рабочей жидкости из зоны обработки.

При прошивании глубоких цилиндрических отверстий основная задача заключается в поддержании процесса при значительном внедрении электрода-инструмента в заготовку, когда условия эвакуации продуктов обработки весьма затруднены. Кроме того, скорость внедрения электрода-инструмента резко понижается из-за его вибрации, что вызывает пропуски разрядов и приводит к нестабильности процесса.

При глубине отверстия $\frac{L}{d} > 25$ его приходится выполнять за несколько ходов, увеличивая при этом диаметр электрода-инструмента. Во всех случаях необходима прокачка или отсос рабочей жидкости. Для обработки глубоких отверстий следует использовать станки с автоматическим выводом электрода-инструмента из отверстия для очистки его от продуктов эрозии.

Конструкция электрода-инструмента зависит от размера обрабатываемого отверстия, его точности и качества поверхности. Для отверстий диаметром $d = 5$ мм и отношением $\frac{L}{d} = 20$ в качестве электрода-инструмента можно применять сплошной стержень, который имеет большую жесткость и при обработке на заготовке не образует керн. Однако при использовании сплошного стержня по мере его заглубления в заготовку производительность обработки снижается до 10...15 % от первоначальной. Кроме того, необходимость периодического выведения стержня из отверстия еще больше увеличивает время прошивания отверстия, а при отношении $\frac{L}{d} > 20$ делает операцию экономически нецелесообразной.

При прошивании отверстий, имеющих $\frac{L}{d} > 20$, приходится менять электроды-инструменты в виде трубки из меди, латуни, графитовых материалов. С одной стороны, эта конструкция имеет меньшую жесткость, внутри трубки образуется kern, что нарушает стабильность процесса. Зато наличие отверстия позволяет проще организовать прокачку или отсос рабочей жидкости и сократить время обработки за счет исключения периодического выведения инструмента из углубления. Такие электроды-инструменты позволяют прошивать отверстия с $\frac{L}{d} = 40$, при этом с увеличением диаметра это отношение возрастает.

При получении отверстий с $\frac{L}{d} > 40$ необходимо в процессе обработки удалить kern, остающийся на заготовке внутри трубчатого электрода-инструмента. С этой целью используют трубки 1, внутрь которых вставлены детали 2 с нарезанным спиральным каналом (рис. 7.8, а), по которому в зону обработки подводится рабочая жидкость. Вращение электрода-инструмента в этом случае не обязательно. Помимо нарезной детали в трубку 1 можно вставлять пластинку 3 (рис. 7.8, б) или квадратный стержень 4 (рис. 7.8, в). При этом в процессе обработки электроду-инструменту необходимо сообщать вращательное движение.

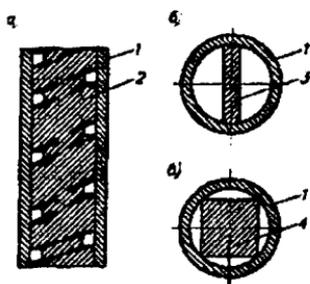


Рис. 7.8. Конструкция трубчатых электродов-инструментов при прошивании особо глубоких отверстий:

а – с нарезанным спиральным каналом; б – с пластиной; в – со стержнем квадратного сечения: 1 – трубка; 2 – деталь со спиральными канавками; 3 – пластинка; 4 – квадратный стержень

Отверстия диаметром менее 1 мм выполняют в форсунках, распылителях, сетках. При диаметре отверстия $d < 0,6 \dots 0,7$ мм используют цельные электроды из латунной или вольфрамовой проволоки 1 (рис. 7.9). Электрод подают в зону обработки через кондукторные втулки 4, изготовленные из рубина или других твердых диэлектриков. К заготовке 5 проволока подводится с помощью подающих роликов 3, а система роликов 2 служит для правки электрода-инструмента. Кроме того, перед обработкой проволоку правят, растягивая ее на специальном приспособлении. В процессе обработки проволоке сообщают вибрацию вдоль оси, что позволяет стабильно прошивать отверстия на большую глубину (до $\frac{L}{d} = 10 \dots 15$).

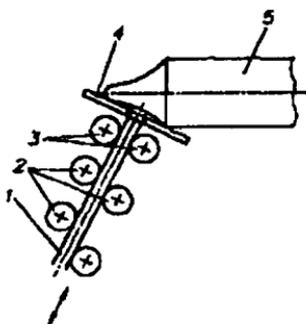


Рис. 7.9. Схема обработки отверстий диаметром менее 0,6 мм:
 1 – проволочный электрод-инструмент;
 2 – система роликов для правки проволоки; 3 – подающие ролики;
 4 – кондукторная втулка; 5 – обрабатываемая заготовка

Для обработки отверстий диаметром $d < 0,1$ мм в качестве электрода-инструмента применяют вольфрамовую проволоку, покрытую слоем меди. Такое покрытие повышает жесткость электрода-инструмента и облегчает токоподвод к нему. Перед обработкой слой меди на выходной части электрода-инструмента стравливают на конус. Для этого его помещают в ванну с травящим раствором и вынимают с постоянной скоростью. За счет большего времени пребывания в ванне конца проволоки на нем образуется конус, длина которого не должна превышать 5...6 диаметров. Обработка отверстий малого диаметра осуществляется по следующей схеме:

1) электрод-инструмент устанавливают в электродержателе так, чтобы его заходная часть была направлена в сторону заготовки, и контролируют выход проволоки;

2) выверяют точность установки электрода-инструмента;

3) устанавливают на станок приспособление с кондукторной втулкой;

4) выставляют на станке режимы обработки. Энергия импульса в этом случае не должна превышать 12 мкДж. Если толщина заготовки меньше 1 мм, то операцию выполняют за один ход на чистовых режимах. При большей толщине необходимо использовать два прохода – черновой и чистовой. Износ электрода-инструмента достигает 60...70 % от объема снятого металла;

5) устанавливают заготовку;

6) включают вибрацию проволоки вдоль ее оси;

7) обрабатывают отверстие, получая в заготовке заходный конус, как показано на рис. 7.10, а;

8) стравливают электрохимическим способом конец электрода до проволоки на длину $h = (2...2,5)h_1$, где h_1 – длина непрошитого участка заготовки (рис. 7.10, б);

9) прошивают отверстие на полную глубину и калибруют его участком проволоки, не имеющим покрытия.

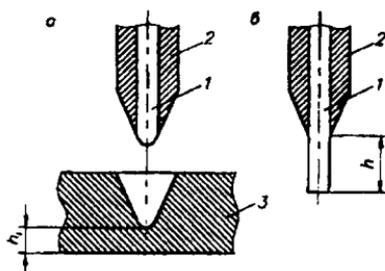


Рис. 7.10. Конструкция электрода-инструмента для прошивания отверстия диаметром менее 0,1 мм:

а – для получения заходной фаски; б – для окончательной обработки отверстия;

1 – вольфрамовая проволока; 2 – слой меди; 3 – обрабатываемая заготовка

Участок на входе полученного таким образом отверстия имеет фаску или конус. Высоту и угол раскрытия конуса регулируют изменением угла конуса на электроде-инструменте и глубиной прошивания заходного участка.

Как правило, операции прошивания мелких отверстий выполняют на автоматических станках несколькими электродами-инструментами. Погрешность формы таких отверстий не превышает нескольких микрометров, шероховатость поверхностей для отверстий диаметром до 0,1 мм соответствует $Ra = 0,16 \dots 0,32$ мкм, при больших диаметрах $Rz = 10 \dots 30$ мкм. Погрешность межосевого расстояния не превышает 5 мкм. При этом время обработки отверстия диаметром $d = 0,02 \dots 0,04$ мм составляет порядка 120 с, что в 3...6 раз меньше по сравнению со сверлением.

Прошивание различных соединительных каналов в корпусах гидроаппаратуры представляет собой трудновыполнимую задачу при использовании традиционных методов механической обработки. В том же случае, когда форма поперечного сечения канала некруглая, его можно получить только применением электрических методов и, в частности, электроэрозионным прошиванием.

Для осуществления такой операции необходимо, чтобы размер L_y одного из углублений (рис. 7.11) и длина L_p рабочей части электрода-инструмента были больше толщины стенки L_c , в которой необходимо получить канал. Общую длину L_n электрода-инструмента рассчитывают по зависимости

$$L_n = L_y + L_p,$$

где L_y – размер электродержателя, который определяют из условия обеспечения необходимой жесткости консольной части электродержателя.

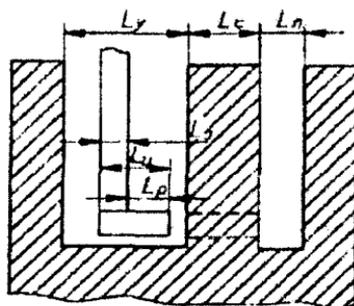


Рис. 7.11. Схема для определения размеров электрода-инструмента при прошивании соединительных каналов

Длину L_p рабочей части электрода-инструмента находят по формуле

$$L_p = kL_c,$$

где k – коэффициент, учитывающий длину электрода-инструмента, необходимую для калибровки канала и в зависимости от требований по точности $k = 1, 2 \dots 2, 5$.

Однако во всех случаях требуется, чтобы $L_p \leq L_c + L_n$, в противном случае необходимо использовать электрод-инструмент с выдвигающимся рабочим элементом.

Назначение, устройство и работа на электронском прошивочном станке мод. ОЧЭП-10М

Назначение и технические данные станка

На рис. 7.12 приведен общий вид станка мод. ОЧЭП-10М.

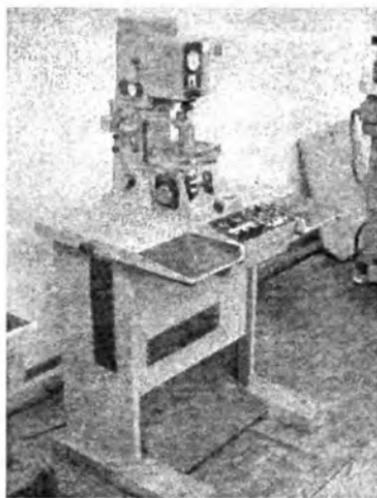


Рис. 7.12. Общий вид станка мод. ОЧЭП-10М

Станок предназначен для изготовления отверстий малого диаметра и пазов в любых токопроводящих деталях типа: сварочные микроинструменты, распылители, фильтры, фильеры, дроссели и другие миниатюрные детали.

Технические данные

Интенсивность прошивки капиллярных отверстий Ø 0,04 мм в детали из сплава ВК-6М в зависимости от требуемой шероховатости поверхности, мм/мин	0,8...1,5
Шероховатость обработанной поверхности по ГОСТ 2789-73 в зависимости от режима обработ- ки <i>Ra</i> , мкм	0,1...1,0
Диаметры прошиваемых отверстий, мм	0,015...0,5
Наибольшая глубина прошиваемых отверстий (диаметров электрода)	не менее 15
Относительный линейный износ электрода, %	2...15
Размеры координатного стола, мм	140 × 140
Ход координатных перемещений: <i>X</i> , <i>Y</i> , мм	25
Установочное перемещение каретки, мм	80
Рабочее перемещение вибратора, мм	40
Частота колебаний электрода, Гц	200...800
Частота вращения электрода, об/мин	100...1000
Тип генератора	транзисторный
Частота следования импульсов, кГц	44, 66, 100, 200
Длительность импульсов, мкс	0,05...0,9
Потребляемая электрическая мощность, Вт, не более	250
Расход воды, л/ч, не более	10
Габаритные размеры:	
ширина, мм	720
высота, мм	1400
длина, мм	650
Масса, кг, не более	160

При прошивке отверстий в качестве рабочей жидкости используется водопроводная вода. Возможно применение дистиллированной и деионизированной воды. Рабочая жидкость подается в цанговый патрон, а из него при помощи поворотной стойки через отверстия в цанге в зону обработки. Встроенный в станок транзисторный генератор импульсов обеспечивает обработку детали короткими импульсами,

амплитуда импульсов контролируется измерительным прибором на пульте управления.

В станке применяется полуавтоматическая подача электрода. Так как применяемые электроды и их перемещения очень малы, используется безынерционная следящая система, встроенная в станок.

Устройство и работа станка

На рис. 7.13 показана компоновка основных узлов станка.

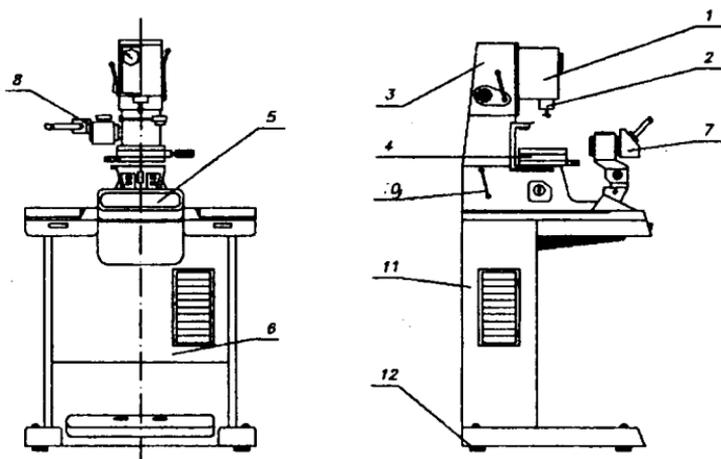


Рис. 7.13. Компоновка основных узлов
электроэрозионного прошивочного станка мод. ОЧЭП-10М

Несущим элементом его конструкции является стойка 10, которая представляет собой каркас, сваренный из прямоугольных труб. Для доступа в электронный блок передняя и задняя панели выполнены быстросъемными. На каркасе сверху закреплена литая алюминиевая крышка. В ее верхней части расположен пульт управления (рис. 7.14), а справа и слева от него размещены ящики для инструмента и принадлежностей. В верхней части стойки расположен электронный блок 6.

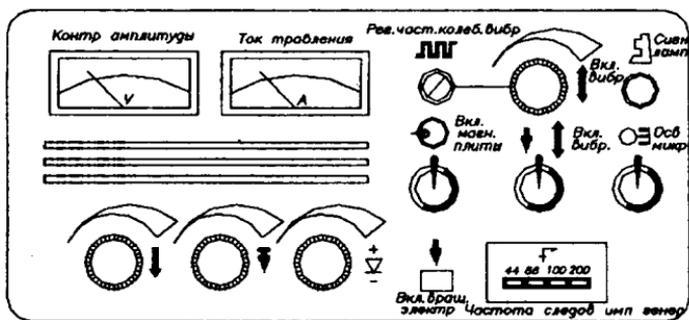


Рис. 7.14. Пульта управления работой станка

К сварному каркасу стола крепится стойка 3, представляющая собой отливку коробчатой формы. В верхней части стойки расположены направляющие качения, по которым перемещается каретка 1. В стойке расположена пружина, уравнивающая вес каретки. На стойке также закреплены боковой микроскоп и координатный стол.

Каретка 1 представляет собой корпус коробчатой формы, в котором расположены индикатор часового типа для измерения глубины прошивки и электродвигатель с редуктором для перемещения вибратора по направляющим качениям.

Вибратор 2 представляет собой гильзу с направляющими качениями. В корпусе гильзы крепятся магнитопровод с катушкой, мембраны и стержень. Мембраны исключают радиальные перемещения стержня, на котором крепится патрон для закрепления электродов.

Координатный стол 4 представляет собой систему платформ с шариковыми направляющими качениями. Крепление приспособлений с обрабатываемыми изделиями осуществляется с помощью встроенной в стол электромагнитной плиты.

Передний микроскоп 7 предназначен для точной установки обрабатываемой детали относительно электрода и визуального контроля процесса обработки.

Боковой микроскоп 8 служит для точной установки электрода относительно обрабатываемой детали.

Кран 9 предназначен для регулировки подачи воды в зону обработки. Включение подачи воды производится поворотом рукоятки до отказа, а плавная регулировка воды осуществляется маховичком, находящимся в центре крана.

Кинематическая схема станка представлена на рис. 7.15.

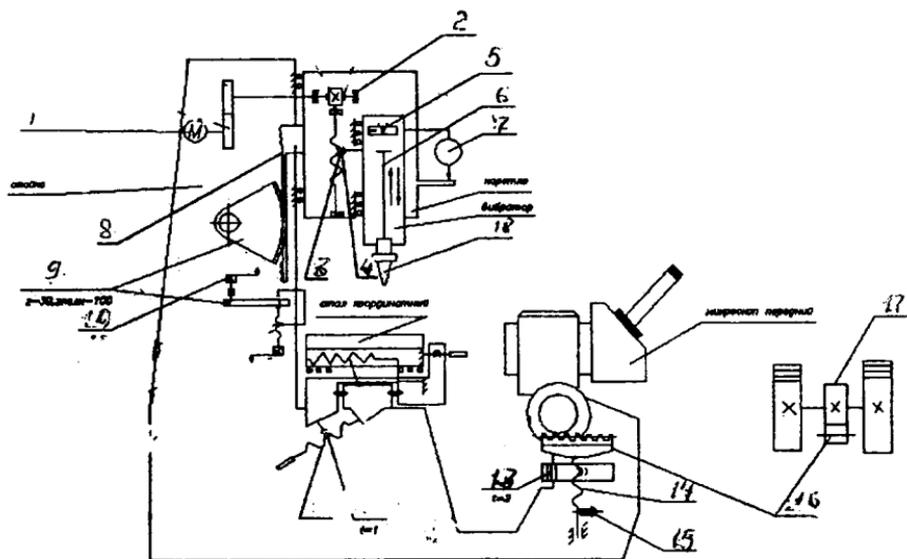


Рис. 7.15. Кинематическая схема станка

Вертикальное перемещение каретки осуществляется по направляющим качения через пару «шестерня 9 (сектор) – рейка 8».

Вертикальное перемещение вибратора осуществляется двигателем 1 с редуктором и парой «винт 8 – гайка 3» по направляющим качения. Величина хода вибратора ограничивается концевыми выключателями.

Продольные и поперечные перемещения платформ координатного стола по направляющим качения осуществляется вручную парой «микрометрический винт 11 – гайка 12».

Вибрация электрода осуществляется катушкой вибратора 5 через стержень 6.

Вертикальное перемещение переднего микроскопа осуществляется вручную парой «винт 14 – гайка 13», продольное – парой «шестерня 17 – рейка 16». Фиксация вертикальных перемещений производится винтом 15».

В основе работы станка лежит метод электроэрозионной обработки металлов. Прошивка отверстий диаметром 0,015...0,2 мм осуществляется вольфрамовой проволокой соответствующего диаметра, покрытой слоем меди, до диаметра 0,4...0,5 мм. Вольфрамовые электроды диаметром более 0,2 мм применяются без покрытия, как обладающие достаточной жесткостью в процессе прошивки, и могут быть непосредственно зажаты в цанговом патроне. Длину электрода выбирают из условия обеспечения достаточной жесткости в процессе работы, но не более 30 мм.

Обработку глубоких отверстий диаметром от 0,2 до 0,5 мм рекомендуется производить при одновременном использовании вибрации и вращения электрода (скорость вращения 200...300 об/мин).

Порядок выполнения работы

На рис. 7.14 изображен пульт управления станка. Для осуществления обработки отверстия необходимо выполнить следующее.

1. Закрепить в цанговом патроне при помощи соответствующей цанги из комплекта ЗИП электрод нужного диаметра.

2. На координатном столике 4 (рис. 7.13) закрепить приспособление с деталью, как показано на рис. 7.16. Включение электромагнитной плиты координатного столика производится соответствующим тумблером на пульте управления.

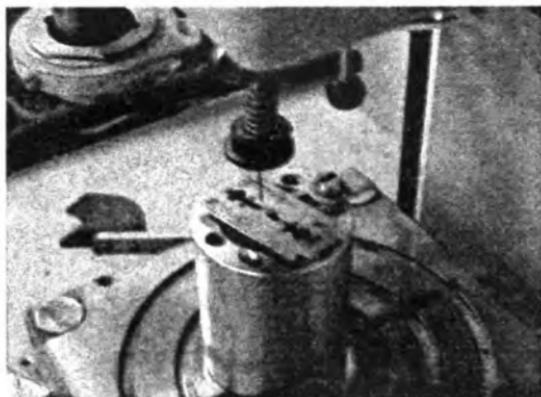


Рис. 7.16. Зона обработки

3. Подвести электрод к детали, используя рукоятку установочных перемещений каретки (см. рис. 7.15) и ключ ускоренных перемещений электрода 18. Для перемещения каретки необходимо поднять вверх рукоятку фиксации каретки.

4. Тумблером на пульте управления (см. рис. 7.14) включить прямую полярность питания электродов (+), обратная полярность (-).

5. Тумблером на пульте управления (см. рис. 7.14) включить вибратор. Подстройку амплитуды вибрации электрода производить ручкой на пульте управления в зависимости от материала детали и размеров электрода до достижения устойчивого процесса обработки.

6. Краном 10 (см. рис. 7.13) включить подачу воды в зону обработки путем поворота рукоятки крана, а расход воды плавно регулировать маховичком, находящимся на оси крана.

7. Кнопкой на пульте управления (см. рис. 7.14) включить питание электродов (вольтметр на пульте управления должен показывать 40...150 В в зависимости от режима работы генератора).

8. Кнопкой на пульте управления (см. рис. 7.14) включить рабочее перемещение электрода. Ручкой регулировки подачи на пульт управления установить равномерную подачу электрода. Перемещение электрода и глубина прошивки измеряются стрелочным индикатором.

9. После окончания обработки кнопкой на пульте управления (см. рис. 7.14) выключить питание электрода, при этом он автоматически поднимается вверх. После выхода электрода из отверстия соответствующей кнопкой выключить подачу.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Краткие сведения о явлениях, положенных в основу электроэрозионной обработки металлов.
4. Основные применяемые технологические схемы электроэрозионной обработки металлов.
5. Устройство электроэрозионного прошивочного станка мод. ОЧЭП-10М.
6. Результаты расчетов производительности прошивания и оценка точности полученных отверстий.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение явлению электрической эрозии.
2. Что называется прямой и обратной полярностью? От чего зависит выбор полярности при обработке?
3. Перечислите стадии протекания процесса электроэрозионного снятия припуска. Каковы технологические схемы электроэрозионной обработки?
4. Как определяется производительность электроэрозионной обработки?
5. Что такое скважность?
6. Перечислите основные технологические схемы электроэрозионной обработки и область их применения.
7. В чем заключается особенность электроэрозионного прошивания глубоких отверстий?
8. Назовите основные методы ультразвуковой очистки и области их применения.
9. Из каких основных узлов состоит электроэрозионный прошивочный станок мод. ОЧЭП-10М?

Литература

1. Киселев, М.Г. Электроэрозионная обработка материалов: учебно-методическое пособие / М.Г. Киселев, Ю.Ф. Ляшук, В.Л. Габец. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 112 с.
2. Золотых, Б.Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б.Н. Золотых, Р.Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. – 43 с.

Лабораторная работа № 8

РАЗМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Цель работы

1. Изучить механизм анодного растворения металлов и закономерности его протекания.
2. Изучить основные схемы электрохимической обработки и ее технологические возможности.
3. Произвести прошивание отверстия в листовой металлической заготовке электрохимическим методом.
4. По полученным экспериментальным данным рассчитать значение электрохимического эквивалента для обрабатываемого металла.

Инструменты и принадлежности

1. Лабораторная установка для электрохимического прошивания отверстий.
2. Металлическая заготовка из листового материала известной марки.
3. Штангенциркуль ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу, равной 0,05 мм.
4. Микроскоп МИМ-5.

Основные сведения о механизме анодного растворения металлов

Удаление металла при размерной электрохимической обработке (ЭХО) происходит под действием электрического тока в среде электролита без непосредственного контакта между инструментом и заготовкой. В основе процесса ЭХО лежит явление анодного растворения металлов. Анодное растворение может протекать в электролитах различного состава, в том числе в неагрессивных электролитах – водных растворах хлорида натрия, нитрата натрия и др. Эти соли дешевы и безвредны для обслуживающего персонала.

Под действием тока в электролите материал анода растворяется и в виде продуктов обработки выносится из промежутка потока

электролита. В результате реакций образуются газообразные продукты, которые удаляются в атмосферу. Катод, который служит инструментом, не изнашивается, что является одной из положительных особенностей процесса ЭХО.

При растворении в воде молекулы соли распадаются на положительные (катионы) и отрицательные (анионы) ионы. Молекулы воды поляризуются и располагаются в виде сферы вокруг центрального иона (рис. 8.1).

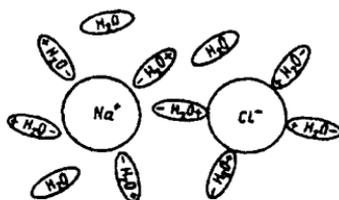


Рис. 8.1. Схема поляризации молекул воды при растворении в ней соли NaCl

Если электроды погружены в электролит, то на их поверхности протекает обратимая реакция



где n – валентность металла;

Me^{n+} – ион в растворе;

e – электрон.

На поверхности металла возникает положительный заряд, и к нему притягиваются отрицательно заряженные ионы из раствора. На границе электролита с металлом образуется так называемый двойной электрический слой (рис. 8.2), подобный тому, какой возникает на обкладках конденсатора. Один слой представляет собой поверхностные заряды в металле (+), другой – ионы в растворе (-). За счет этого на электродах возникают скачки электрического потенциала. Протекание процесса ЭХО становится возможным, если приложить внешнее напряжение, превышающее разность $\varphi_a - \varphi_k$, где φ_a – скачок потенциала на аноде, а φ_k – скачок потенциала на катоде.

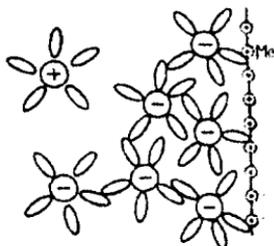
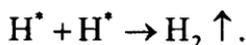
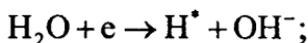


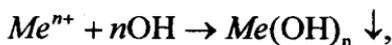
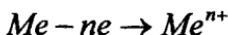
Рис. 8.2. Схема образования двойного электрического слоя на границе электролита с металлом

При подключении электродов к источнику напряжения они начинают двигаться в электрическом поле через межэлектродный промежуток от электрода к электроду.

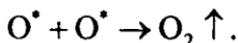
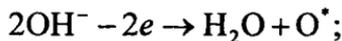
На катоде происходит ускоренное разложение молекул воды с выделением молекулярного водорода:



На аноде справедлива следующая схема перехода металла в нерастворимый гидроксид:



одновременно образуется молекулярный кислород



Таким образом, в результате реакции на катоде выделяется газ (водород), на аноде – осадок (гидроксид металла) и газ (кислород). Продукты обработки выносятся потоком электролита из промежутка. При большой силе тока возможны также и другие реакции, в

ходе которых на поверхности анода могут образовываться оксиды. Они снижают скорость растворения металла заготовки и ухудшают ее обрабатываемость.

Если на электроде протекает только один электрохимический процесс, например растворение металла, то он описывается законами Фарадея. Согласно первому закону Фарадея

$$m = \varepsilon Q, \quad (8.1)$$

где m – масса материала, растворенного с анода;

ε – коэффициент пропорциональности;

Q – количество электричества, пропущенное через электролит.

При постоянном токе

$$Q = It,$$

где I – сила тока;

t – время его прохождения.

Тогда зависимость (8.1) можно записать в виде

$$m = \varepsilon It. \quad (8.2)$$

Коэффициент ε называется электрохимическим эквивалентом:

$$\varepsilon = An / F,$$

где A – атомная масса;

n – валентность;

$F = 96500$ – число Фарадея. Здесь ε выражается в килограммах на ампер-секунду.

Численные значения ε для различных элементов приводятся в справочных материалах. Электрохимический эквивалент ε_c любого сплава можно найти через эквиваленты ε входящих в него элементов и через массовое содержание k_i в процентах элемента в сплаве:

$$\varepsilon_c = 100 / \sum_i k_i / \varepsilon.$$

Ниже, в табл. 8.1, приведены расчетные значения электрохимических эквивалентов некоторых сплавов.

Таблица 8.1

Значение электрохимического эквивалента
для различных материалов

Материал	$\epsilon_c, \text{мг} / A_c$
Сталь 45	0,223
Сталь 12Х18Н9Т	0,165
Жаропрочные сплавы	0,26...0,29
Титановые сплавы	0,158...0,162
Алюминиевые сплавы	0,092...0,093

В действительности каждый компонент сплава имеет свой электрохимический эквивалент, т.е. свою скорость анодного растворения. За счет этого в процессе обработки возникают углубления и выступы, формирующие макропрофиль и шероховатость поверхности.

Для практических целей необходимо знать скорость линейного растворения, которая позволяет найти скорость подачи инструмента при изготовлении деталей. Если в уравнении (8.2) массу материала записать через площадь обрабатываемого участка S и перемещение электрода-инструмента к детали, то

$$m = Sl\rho,$$

где ρ – плотность материала.

Силу тока можно выразить через площадь участка S и плотность тока J :

$$I = JS.$$

Тогда уравнение (8.2) примет вид

$$Sl\rho = \epsilon JSt. \quad (8.3)$$

Если левую и правую части выражения (8.3) разделить на время t , то отношение l / t называется скоростью линейного растворения материала анода:

$$V = J\varepsilon / \rho, \quad (8.4)$$

Плотность тока по закону Ома может быть выражена через напряжение U и удельную проводимость χ . В расчет принимается только та часть напряжения, которая используется для протекания электрохимической реакции. Сюда не входят потери напряжения на электродах и в токоподводящих цепях:

$$J = U\chi / s. \quad (8.5)$$

С учетом формул (8.4) и (8.5) закон анодного растворения может быть записан в виде

$$V = \varepsilon\chi U / (\rho s). \quad (8.6)$$

Если зазор s не изменяется в процессе анодного растворения, то режим ЭХО *стационарный*, в случае переменного, неустановившегося зазора – *нестационарный*. В зависимости (8.6) учитывается действие только электрического поля. Однако, как следует из определения процесса, необходимым условием его осуществления является удаление продукта обработки из прианодной и прикатодной областей. В большинстве случаев это достигается принудительной прокачкой электролита. Следовательно, помимо электрического поля определяющее влияние на процесс оказывают гидродинамические факторы.

Если измерить массу металла, растворенного с анода, то она окажется меньше, чем получается по формуле закона Фарадея (8.2). Это объясняется тем, что часть количества электричества тратится на побочные реакции на электродах, образование газов, вторичные реакции. Эти потери можно учесть, введя коэффициент η , который называют выходом по току. Выход по току представляет собой отношение действительного и теоретически ожидаемого количества растворенного вещества и характеризует долю полезного использования тока. Тогда закон анодного растворения (8.6) может быть записан в виде

$$V = \eta\varepsilon\chi U / (\rho s).$$

Выход по току при ЭХО зависит от ряда взаимосвязанных факторов: плотности тока, материала заготовки, скорости прокатки, температуры и степени защелоченности электролита и др.

Ввиду большого числа факторов, влияющих на выход по току, найти его значение теоретическим путем не удастся, поэтому используют экспериментальный метод нахождения выхода по току для среднего значения рабочего диапазона режимов обработки. При использовании электролитов на базе растворов хлорида натрия выход по току для конструкционных низколегированных сталей $\eta = 0,8...0,85$, для жаропрочных сплавов $\eta = 0,85...0,93$, для титановых сплавов $\eta = 0,83...0,85$. Если процесс ЭХО осуществляют в среде нитрата натрия, то для большинства сталей выход по току снижается ($\eta = 0,6...0,7$). Для алюминиевых сплавов, которые обрабатываются преимущественно в растворах нитрата натрия, выход по току может составлять $\eta = 1,1...1,35$. Это объясняется тем, что при экспериментальном определении выхода по току учитывалось химическое растворение алюминиевого сплава в щелочных продуктах реакции.

Для нормального протекания электрохимических реакций необходимо обеспечить интенсивный вынос продуктов обработки из межэлектродного промежутка, поэтому электролит должен протекать со скоростью, достаточной для захвата и удаления твердых и газообразных частиц, образующихся в ходе реакции. При расчете скорости следует учитывать свойства электролита: его вязкость, состав, стабильность характеристик и др.

Пассивация обрабатываемой поверхности

На рис. 8.3 схематически показана зависимость силы тока от напряжения при постоянной площади обрабатываемой поверхности. На участке АБ с возрастанием напряжения ток увеличивается. Это так называемая активная область. Участок АБ характеризует анодное растворение элементов сплава заготовки с низкой валентностью. Сила тока здесь незначительна, и высокой скорости обработки заготовки достичь не удастся. Поэтому в процессе ЭХО область активного растворения практически не используют. На участке БВ возрастание напряжения вызывает снижение силы тока. Наступает **пассивация** обрабатываемой поверхности, т. е. образование на ней оксидной пленки. С увеличением напряжения растет толщина пленки,

обладающей большим сопротивлением. При дальнейшем увеличении напряжения сила тока сначала остается неизменной (участок ВГ), а затем вновь начинает расти (участок ГД). Этот участок называют перепассивной областью. Рост силы тока объясняется химическими превращениями в пленке и ее разрушением при повышенных напряжениях. В перепассивной области атомы металла переходят в ионы высшей валентности. Здесь можно получить большую силу тока, а значит, и большую скорость растворения заготовки. Этот участок, как правило, и используют для ЭХО. После точки Д может начаться новый спад силы тока, т.е. снова возникает пассивация. При дальнейшем увеличении напряжения возможны электрические пробой межэлектродного промежутка.

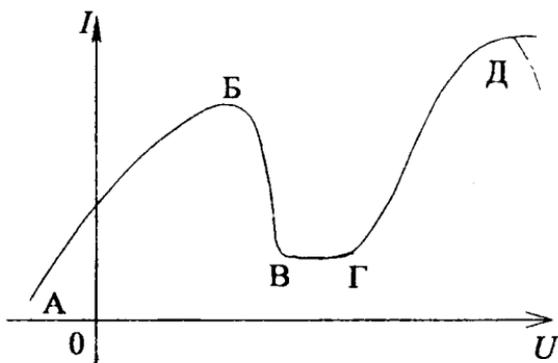


Рис. 8.3. Характер зависимости силы тока от напряжения при достаточной площади обрабатываемой поверхности

Для устранения пассивации поверхности применяют колебания электродов с ультразвуковой частотой. При воздействии ультразвука прочность пленки снижается, ее легче удалять с поверхности. Ультразвуковые колебания можно подавать на инструмент, деталь или на жидкость в межэлектродном промежутке. Можно механически удалять пленку различными скребками, абразивным инструментом. При этом ускоряется растворение металла с участков, с которых снята пленка, можно добиться избирательного удаления припуска с заготовки, т. е. повысить точность формообразования.

Основные схемы электрохимической обработки металлов

1. Обработка с неподвижными электродами. По этой схеме (рис. 8.4) получают местные облегчения в деталях, отверстия в листовых материалах, наносят информацию, удаляют заусенцы, скругляют кромки. Требуемая форма углубления или отверстия получается за счет нанесения на электроды слоя диэлектрика.

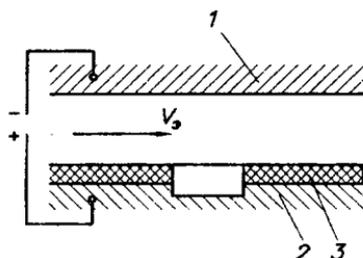


Рис. 8.4. Схема анодного растворения с неподвижными электродами

Электрод-инструмент 1 не перемещается к обрабатываемой поверхности — межэлектродный зазор по мере съема металла с заготовки 2 возрастает, а скорость V_n прокачки электролита снижается. Процесс будет неустановившимся с нестационарным по времени режимом обработки. Это резко усложняет расчеты технологических параметров, регулирование и управление процессом.

2. Прошивание углублений, полостей, отверстий (рис. 8.5, *а*). При такой схеме электрод-инструмент 1 имеет одно рабочее движение — поступательное перемещение со скоростью V_n к детали. Система регулирования зазора поддерживает постоянным межэлектродный зазор s (т.е. имеет место стационарный режим). Через межэлектродный промежуток прокачивают электролит со скоростью $V_э$. В заготовке иногда предусматривают технологические отверстия для подвода и отвода электролита и продуктов обработки. По этой схеме изготавливают рабочие полости ковочных штампов, пресс-форм, прошивают отверстия, пазы, перья лопаток турбин, вырезают заготовки различного профиля.

К такой схеме относят и получение отверстий струйным методом. Электрод-инструмент состоит из токоподвода 1 (рис. 8.5, *б*), омываемого потоком электролита. Токоподвод находится внутри корпуса 3 , выполненного из изоляционного материала. Электролит

создает токопроводящий канал между токоподводом и заготовкой 2. В месте контакта жидкости с обрабатываемой поверхностью материал заготовки растворяется и образуется углубление. По мере увеличения глубины отверстия корпус 3 сближают с заготовкой 2. Процесс идет достаточно быстро только при высоких напряжениях (до нескольких сотен вольт). Так получают отверстия диаметром 1,5...2,0 мм и вырезают контуры деталей сложной формы.

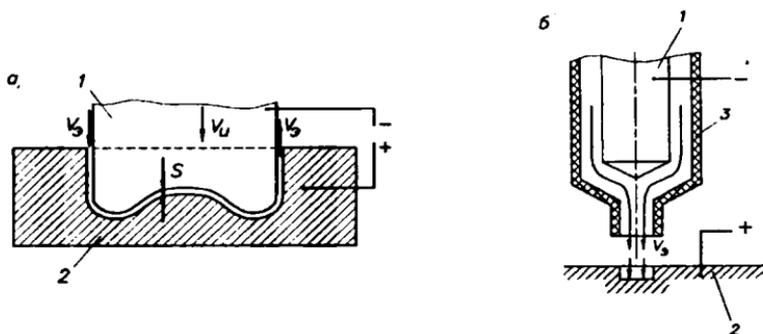


Рис. 8.5. Схемы прошивания отверстий и углублений

3. Точение наружных и внутренних поверхностей (рис. 8.6). При такой схеме электрод-инструмент 1 выполняет роль резца, но в отличие от обработки на токарных станках он не имеет механического контакта с заготовкой 2, а находится от нее на расстоянии s . Электрод-инструмент может двигаться как поперек заготовки со скоростью V_u (рис. 8.6, а), так и вдоль нее со скоростью V_n (рис. 8.6, б). Межэлектродный зазор s может поддерживаться диэлектрическими прокладками 3.

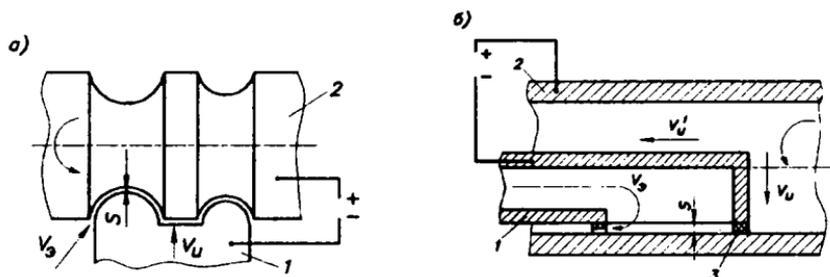


Рис. 8.6. Схемы точения наружных и внутренних поверхностей

4. Протягивание наружных и внутренних поверхностей (рис. 8.7) в заготовках, имеющих предварительно обработанные поверхности, по которым можно базировать электрод-инструмент 1. Его устанавливают относительно заготовки 2 с помощью диэлектрических элементов 3. Электрохимическое протягивание осуществляют при продольном перемещении (иногда с вращением) инструмента со скоростью V_n . По такой схеме выполняют чистовую обработку цилиндрических отверстий, нарезание резьбы, шлицев, винтовых канавок.

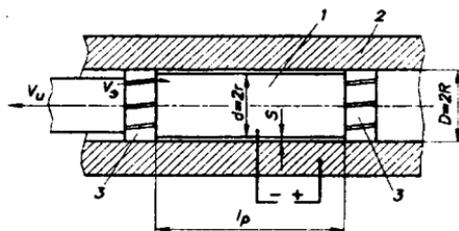


Рис. 8.7. Схема протягивания наружных и внутренних поверхностей

5. Разрезание заготовок. Инструментом 1 может быть вращающийся диск (рис. 8.8, а) или проволока (рис. 8.8, б). Инструменты подают к заготовке 2 со скоростью V_n . При этом необходимо сохранять постоянным зазор s . По этой схеме выполняют пазы, щели, подрезку нежестких деталей, например пружин.

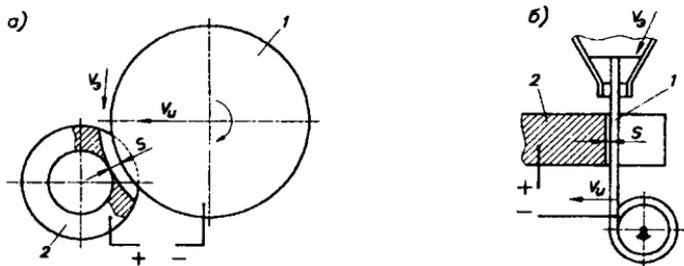


Рис. 8.8. Схемы разрезания заготовок

6. При шлифовании (рис. 8.9) используют вращающийся металлический инструмент 1 цилиндрической формы, который поступательно движется вдоль заготовки 2 со скоростью V_n . Электрохимическое шлифование используют в качестве окончательной опе-

рации при изготовлении пакетов пластин из магнитомягких материалов, когда при обработке недопустимы механические усилия, а также для изготовления деталей из вязких и прочных сплавов.

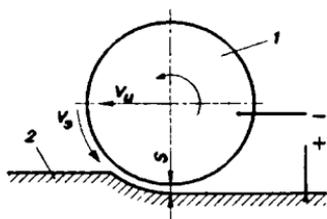


Рис. 8.9. Схема шлифования поверхностей

Технологические возможности электрохимической размерной обработки

С помощью электрохимической размерной обработки можно получать формы поверхностей, образование которых другими способами или невозможно, или экономически нецелесообразно. Поэтому применение размерной электрохимической обработки существенно расширяет технологические возможности изготовления деталей. Рассмотрим ряд примеров эффективного применения различных схем ЭХО.

Маркирование деталей, как правило, выполняют по схеме с неподвижными электродами. Необходимая информация (цифры, буквы, рисунки) переносится на деталь путем копирования профиля на электродах или избирательным растворением металла в прорезях диэлектрического трафарета. На рис. 8.10 приведена схема копирования знаков, с помощью которых на деталь наносят цифры. При этом знаки 1, 4 на инструменте выполнены в зеркальном отображении и закреплены на торцевой части корпуса 3. Пространство между ними заполнено диэлектриком 2, который предохраняет материал детали от растворения на участках между знаками. Начальный зазор между рабочей частью наносимых знаков 1, 4 и заготовкой б обеспечиваются диэлектрическими прокладками 5. В тех случаях, когда глубина нанесения информации невелика (0,01...0,02 мм), электролит в МЭП наносят тампоном. Если необходимо получить углубления до 0,3...0,4 мм, то между электродом-инструментом и деталью прокачивают электролит. В результате анодного растворе-

ния металла под знаками образуются углубления, повторяющие отображение профиля знаков, как показано в нижней части рис. 8.10. В связи с тем, что процесс протекает при малой скорости движения электролита или вообще без его прокачки, продукты обработки оседают в углублениях, образуя контрастное изображение.

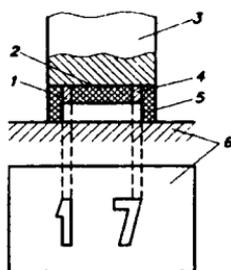


Рис. 8.10. Схема маркирования с нанесением диэлектрика на электрод-инструмент:

1, 4 – знаки, выполненные в зеркальном отображении; 2 – диэлектрик, заполняющий пространство между знаками; 3 – корпус электрода-инструмента; 5 – диэлектрические прокладки; 6 – обрабатываемая заготовка

При маркировании с использованием диэлектрических трафаретов (рис. 8.11) наносимая информация имеет форму просечек 1, 2. Трафарет 4 накладывают на деталь 3 и прижимают электродом-инструментом 5. Процесс анодного растворения протекает в электролите, который заранее нанесен на поверхность детали. Если необходима прокачка электролита, то трафарет прижимают по контуру, оставляя зазор между ним и электродом-инструментом, или выполняют прорезы в самом трафарете для прохода электролита. В ряде случаев роль трафарета может выполнять слой фотоземлюли, наносимый на деталь.

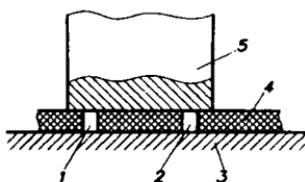


Рис. 8.11. Схема маркирования с использованием диэлектрических трафаретов: 1, 2 – просечки, имеющие форму наносимой информации; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – трафарет; 5 – электрод-инструмент

К маркируемым деталям предъявляются следующие требования:

- поверхность, на которую будет наноситься информация, не должна иметь загрязнений, царапин, забоин;
- шероховатость поверхности должна быть не выше $Rz = 20$ мкм;
- участки поверхности детали, предназначенные для подвода тока, не должны иметь местных дефектов, а их шероховатость не должна превышать $Ra = 2,5 \dots 3$ мкм.

При обработке по схеме с неподвижными электродами можно легко удалять заусенцы в труднодоступных для подвода инструмента местах, в частности, в сообщающихся каналах топливораспределительной аппаратуры. В изделиях такого назначения после механической обработки на кромках отверстий неизбежно образуются заусенцы 4 (рис. 8.12), которые в процессе эксплуатации могут оторваться и, попав в жиклеры или сопла форсунок, вывести всю систему из строя. Поэтому их необходимо удалить, а кромки отверстий скруглить. Для этого в одно из отверстий заготовки 2 вводят электрод-инструмент 1, у которого наружная боковая поверхность покрыта изоляционным слоем 3. По времени процесс растворения заусенцев 4 и скругления кромок занимает доли минуты. Помимо этого уменьшается шероховатость поверхности, благодаря чему снижаются гидравлические потери в системе.

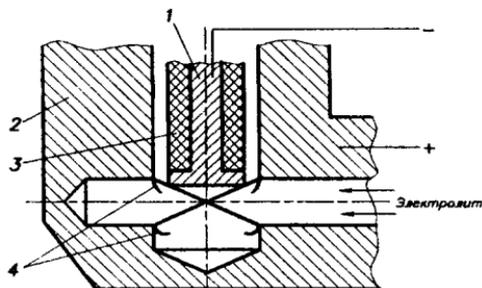


Рис. 8.12. Схема удаления заусенцев в труднодоступных местах:

- 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – слой изоляции;
4 – заусенцы на кромках отверстий

В технике находят применение детали с внутренними полостями, изготовленные из труднодеформируемых сплавов (рис. 8.13). При этом диаметр рабочей части у них в несколько раз превышает диа-

метр горловины. Изготовить внутреннюю полость в таких деталях, используя металлорежущий инструмент, невозможно. С помощью ЭХО их можно получать с помощью электрода-инструмента 1, выполненного в виде трубки. В заготовке предварительно просверливают отверстие 5 (на рисунке оно показано пунктиром) и через него внутрь заготовки 2 вставляют электрод-инструмент. При этом часть поверхности электрода-инструмента или заготовки на участке горловины покрывают изоляционным слоем 4, предотвращая тем самым растворение этого участка детали. Через отверстие 3 в электроде-инструменте прокачивают электролит со скоростью V_3 .

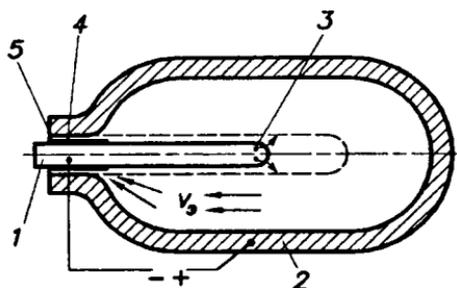


Рис. 8.13. Схема обработки внутренней полости в заготовках, изготовленных из труднодеформируемых сплавов:

- 1 – электрод-инструмент в виде трубки; 2 – обрабатываемая заготовка;
 3 – отверстие в электроде-инструменте; 4 – слой изоляционного материала;
 5 – предварительно просверленное отверстие

Схему точения можно эффективно использовать при обработке части нежесткой заготовки. В качестве примера на рис. 8.14 показана такая деталь, у которой имеется выступ 3, допустим сварной шов, который необходимо сохранить. При этом сама заготовка является весьма нежесткой и при минимальных усилиях меняет свою форму, что исключает использование методов механической обработки. Поэтому обработка таких деталей возможна только с использованием бесконтактных методов. Электрохимическую обработку выполняют электродом-инструментом 1, через который прокачивают электролит со скоростью V_3 . Заготовке 2 сообщается возвратно-вращательное движение вокруг оси таким образом, чтобы рабочая часть электрода-инструмента не достигала выступа на заготовке.

Таким способом можно получать детали диаметром до нескольких метров при толщине стенки, измеряемой долями миллиметра, с погрешностью не более 0,03...0,05 мм.

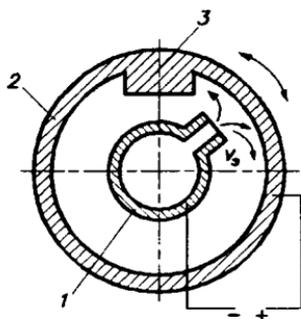


Рис. 8.14. Схема точения при обработке части нежесткой заготовки:
 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка;
 3 – выступ на заготовке

При обработке по схеме прошивания можно одновременно получать несколько плавно сопряженных между собой поверхностей сложной формы, как показано на рис. 8.15. В этом случае обеспечивается точное взаимное расположение всех участков без применения копировальных устройств. При ЭХО таких поверхностей электрод-инструмент 1 имеет одно поступательное движение V_n к заготовке 2 независимо от формы обрабатываемой поверхности. Электролит поступает в межэлектродный зазор через систему отверстий и щелей в электрод-инструменте.

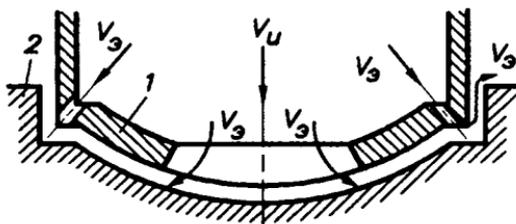


Рис. 8.15. Схема обработки нескольких плавно сопряженных между собой поверхностей сложной формы:
 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

По схеме прошивания можно получить цилиндрические и конические глухие и сквозные отверстия любой формы поперечного сечения, выполнять каналы даже с криволинейной осью (рис. 8.16). В последнем случае электрод-инструмент 2 подают к заготовке 3 по окружности радиусом R . Чтобы предотвратить конусность отверстия, электрод-инструмент 2 покрывают изоляционным слоем 1. Скорость прошивания таких отверстий составляет порядка 0,03 мм/с при глубине обработки более 30 диаметров.

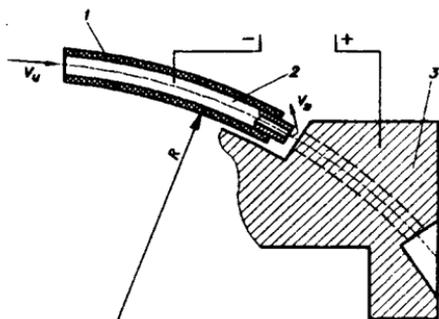


Рис. 8.16. Схема обработки канала с криволинейной осью:
1 – слой изоляции; 2 – электрод-инструмент; 3 – обрабатываемая заготовка

Применение схемы протягивания позволяет выполнять чистовую обработку отверстий любого поперечного сечения как с прямой, так и с криволинейной осью, при этом форма и размеры сечения могут изменяться по длине отверстия. Пример схемы обработки внутренней поверхности трубы, имеющей радиус изгиба R , показан на рис. 8.17. В этом случае электрод-инструмент 3 выполняется бочкообразной формы и на его наружную поверхность наносят выступы 2 из диэлектрического материала. В процессе ЭХО электрод-инструмент протягивается вдоль трубы 1, например тросом, со скоростью V_n . Внутри трубной заготовки со скоростью V_p прокачивается электролит. При диаметре отверстия $d \geq 7 \dots 8$ мм, радиусе изгиба R не менее двух диаметров трубы припуск, удаляемый в процессе ЭХО, как правило, не превышает 1,5 мм на диаметр, при этом $V_n = 0,3 \dots 1$ мм/с. Шероховатость обработанной поверхности $Ra \leq 0,6 \dots 2$ мкм, а погрешность не превышает 0,1 ... 0,2 мм.

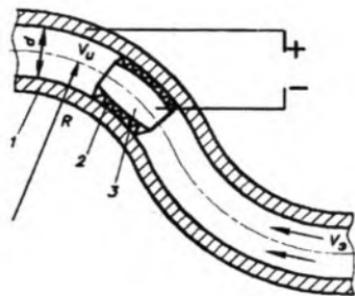
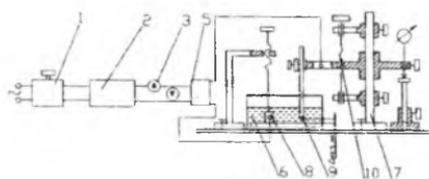


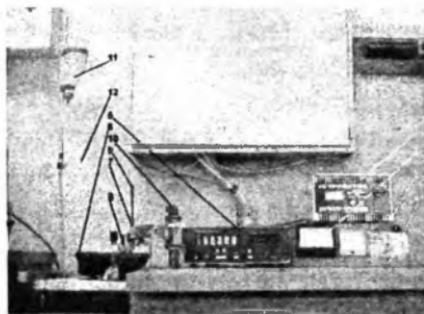
Рис. 8.17. Схема обработки протягиванием внутренней поверхности трубы:
 1 – обрабатываемая труба; 2 – выступы из диэлектрического материала;
 3 – электрод-инструмент

Лабораторная установка для прошивания отверстий электрохимическим методом

Для проведения опытов по электрохимической обработке металлов используется экспериментальная установка, схема и общий вид которой приведены на рис. 8.18. Установка содержит источник постоянного тока 1, блок контрольных приборов 2, амперметр 3, тумблер включения установки 4, счетчик продолжительности обработки 5, ванночку 6 для сбора электролита в процессе обработки, стойку 7 с установленными анодом 8 и катодом 9, систему регулирования межэлектродного зазора 10, систему подачи электролита в зону обработки 11 с регулятором расхода 12.



а



б

Рис. 8.18. Лабораторная установка для прошивания отверстий электрохимическим методом:
 а – схема; б – общий вид

Порядок выполнения работы

1. Получить металлический образец (рис. 8.19), предназначенный для обработки. Для увеличения электропроводности образца с помощью наждачной бумаги очистить его поверхность от окалины и механических загрязнений.

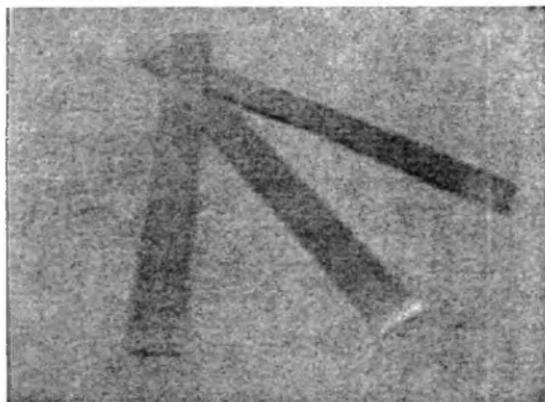


Рис. 8.19. Образцы, предназначенные для обработки

2. С помощью штангенциркуля измерить толщину образцов и полученные данные занести в соответствующую графу (h_3) табл. 8.2.

Таблица 8.2

Результаты измерений и вычислений при электрохимической обработке отверстий

Толщина заготовки h_3 , мм	Диаметр отверстия в заготовке d_3 , мм	Продолжительность обработки $t_{обр}$, с	Сила тока I , А	Плотность материала ρ , г / см ³	Значение электрохимического эквивалента ϵ , мг/А·с	
					расчетное	справочное

3. Подготовить раствор электролита путем растворения в водопроводной воде объемом около 400 миллилитров поваренной соли в количестве 50 грамм.

4. В ванне установки для электрохимического прошивания отверстий поместить образец, как показано на рис. 8.20. Для этого образец *1* поместить между упором *2* и планкой *3*, на которую через контакты *4* подается положительное напряжение, и прижать заготовку с помощью фиксирующего болта *5*. Заполнить приготовленным раствором систему подачи *11* (см. рис. 8.18, б) электролита в зону обработки.

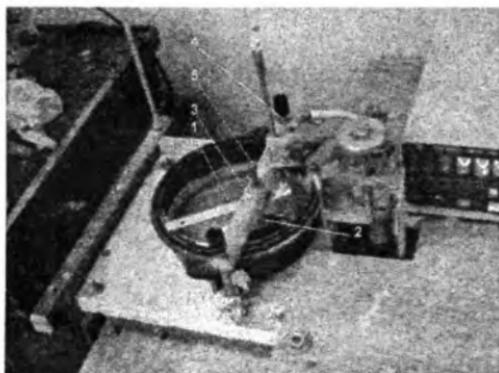


Рис. 8.20. Установленная на лабораторной установке заготовка

5. Катод (отрицательный электрический контакт) *9* (см. рис. 8.18, б) в виде медной трубки ввести в соприкосновение с деталью, затем отвести его от заготовки с помощью системы регулирования зазора *10* (см. рис. 8.18, б) на расстояние, равное 0,5 мм.

6. Обеспечить подачу электролита в зону обработки. Для этого сместить колесико регулятора расхода *12* (рис. 8.18, б), увеличив внутреннее сечение подающей трубки. Подать напряжение на электроды установки путем перемещения тумблера *4* (см. рис. 8.18, б), включающего источник питания *1* и счетчика времени *5* фиксирующего продолжительность обработки. При этом в соответствующую графу табл. 8.2 занести значение силы тока *I*, сняв показания с амперметра *3* (см. рис. 8.18).

7. Производить обработку, контролируя показания амперметра *3* (см. рис. 8.18, б) до момента уменьшения силы тока до значения, равного 10...20 % от первоначального, что соответствует прошиванию отверстия в образце, зафиксировав при этом по счетчику *5* продолжительность обработки. Значение продолжительности занести в графу $t_{\text{обр}}$ табл. 8.2.

8. Выключить экспериментальную установку тумблером 4 (см. рис. 8.18, б). Повернув сместить колесико регулятора расхода 12, (см. рис. 8.18, б) для уменьшения внутреннего сечения подающей трубки и остановки подачи электролита в зону обработки. Извлечь деталь из установки, ослабив фиксирующий винт 5 (см. рис. 8.20). На образце должно наблюдаться отверстие, аналогичное отверстию, приведенному на рис. 8.21.

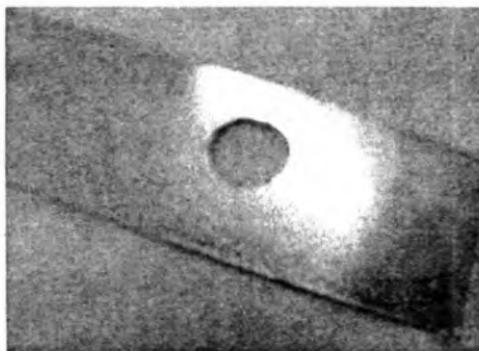


Рис 8.21. Образец с отверстием, полученным путем электрохимической обработки

9. Оставшийся в системе 11 подачи электролита раствор, а также раствор из приемной ванны 6 установки слить в емкость (см. рис. 8.18, б). Установку привести в исходное состояние.

10. С помощью штангенциркуля определить диаметр полученного в образце отверстия и полученные данные занести в соответствующую графу (d_3) табл. 8.2.

11. Рассчитать значение электрохимического эквивалента по формуле

$$\epsilon = \frac{\pi \rho h_3 d_3^2}{4 I t_{\text{обр}}},$$

где ρ – плотность материала образца (табл. 8.3). Сравнить рассчитанное значение электрохимического эквивалента со справочным, приведенным в табл. 8.1.

Значение плотности для различных материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³
Сталь 45	7800
Бронза	8150
Латунь	8400
Титановые сплавы	4500
Алюминиевые сплавы	2700

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструмент и принадлежности.
3. Краткие сведения об электрохимической обработке металлов и ее технологических возможностях.
4. Схема используемой установки.
5. Полученные результаты измерений и вычислений электрохимического эквивалента.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы происходят в электролите при электрохимической обработке, без и в случае подачи напряжения на электроды?
2. Сформулируйте первый закон Фарадея.
3. В чём заключается явление пассивации анода?
4. Какие требования предъявляются к электролиту?
5. Перечислите основные технологические схемы электрохимической обработки.
6. Как регулируется межэлектродный зазор в процессе электрохимической обработки?
7. Какими способами производят электрохимическое маркирование деталей?
8. Из каких основных деталей и узлов состоит установка для электрохимического прошивания отверстий?

Литература

1. Киселев, М.Г. Размерная электрохимическая обработка материалов: учебно-методическое пособие / М.Г. Киселев, С.Н. Бондаренко, А.В. Дроздов. – Минск: БНТУ, 2005. – 164 с.

2. Попилов, Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов / Л.Я. Попилов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 544 с.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторный практикум
для студентов специальностей 1-38 01 01 «Механические
и электромеханические приборы и аппараты»
и 1-52 02 01 «Технология и оборудование
ювелирного производства»

Составители:
КИСЕЛЁВ Михаил Григорьевич
ДРОЗДОВ Алексей Владимирович

Редактор Т.Н. Микулик
Компьютерная верстка С.М. Степаненко

Подписано в печать 02.06.2008.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 11,04. Уч.-изд. л. 8,64. Тираж 100. Заказ 776.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.
220013, Минск, проспект Независимости, 65.