

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Пособие
для студентов специальности 1-38 02 02 «Биотехнические
и медицинские аппараты и системы»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2022

УДК 615.47/658.5(075.8)

ББК 34.7я7

Т38

А в т о р ы:

*М. Г. Киселёв, В. Л. Габец, Д. А. Степаненко,
С. Г. Монич, Д. А. Шишурин, Н. Ф. Ступак*

Р е ц е н з е н т ы:

доцент кафедры стандартизации и метрологии БГАТУ,
канд. техн. наук, доцент *А. В. Кудина*;
кафедра электронной техники и технологии БГУИР (зав. кафедрой,
канд. техн. наук, доцент *С. И. Мадвейко*)

Т38

Технология производства изделий медицинского назначения :
пособие для студентов специальности 1-38 02 02 «Биотехнические
и медицинские аппараты и системы» / М. Г. Киселёв [и др.]. –
Минск : БНТУ, 2022. – 405 с.
ISBN 978-985-583-482-4.

Пособие предназначено для студентов специальности 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Технология производства изделий медицинского назначения».

Описание лабораторных работ, приведенных в пособии, включает следующие разделы: цель работы, инструменты и принадлежности к работе, теоретическую часть, где приводятся краткие сведения, необходимые для выполнения лабораторной работы, описание экспериментальных установок, порядок выполнения работы, содержание отчета, контрольные вопросы и литературу.

УДК 615.47/658.5(075.8)

ББК 34.7я7

ISBN 978-985-583-482-4

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Ультразвуковые преобразователи. Методы измерения амплитуды ультразвуковых колебаний и визуализации акустических полей.....	4
Лабораторная работа № 2. Ультразвуковая очистка и звукокапиллярный эффект в жидкости	33
Лабораторная работа № 3. Ультразвуковая размерная обработка хрупких материалов и ультразвуковое распыление жидкостей.....	62
Лабораторная работа № 4. Технология балансировки вращающихся деталей и узлов	91
Лабораторная работа № 5. Технология изготовления элементов и систем волоконной оптики, применяемых в медицинских эндоскопах	117
Лабораторная работа № 6. Электрохимическая обработка материалов	144
Лабораторная работа № 7. Технологические основы изготовления зубных протезов.....	168
Лабораторная работа № 8. Технология изготовления контактных линз	198
Лабораторная работа № 9. Технология изготовления упругих элементов приборов.....	221
Лабораторная работа № 10. Технология изготовления стентов	248
Лабораторная работа № 11. Электроэрозионная размерная обработка и электроэрозионное модифицирование металлических поверхностей	268
Лабораторная работа № 12. Магнитно-абразивная обработка материалов	300
Лабораторная работа № 13. Определение прочности соединения поверхности образца титанового имплантата с имитатором костной ткани и ее смачиваемости различными жидкостями	324
Лабораторная работа № 14. Ультразвуковая сварка пластмасс, сварка пластмасс трением и нагретым инструментом.....	348
Лабораторная работа № 15. Технология изготовления и контроля обмоток	382

Лабораторная работа № 1

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Цель работы

1. Изучить конструкции и принцип действия акустических колебательных систем технологического назначения и электроакустических преобразователей (магнитострикционных и пьезокерамических).

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

Инструменты и принадлежности к работе

1. Магнитострикционный преобразователь из никеля в сборе с коническим концентратором.

2. Пьезокерамический преобразователь типа Ланжевена.

3. Штангенциркуль типа ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу 0,05 мм.

4. Линейка с ценой деления 1 мм и пределом измерения не менее 200 мм.

5. Экспериментальная установка для наблюдения фигур Хладни.

6. Ультразвуковой генератор.

7. Образцы для наблюдения фигур Хладни.

8. Мелкодисперсный абразивный порошок.

9. Гаечный ключ.

10. Электромагнитный вибратор.

11. Микроскоп ММИ-1.

Теоретическая часть

Основные сведения об акустических колебательных системах технологического назначения

В общем случае ультразвуковая колебательная система (рис. 1.1) состоит из преобразователя, концентратора, служащего для увеличения амплитуды колебаний, и рабочего инструмента.

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.

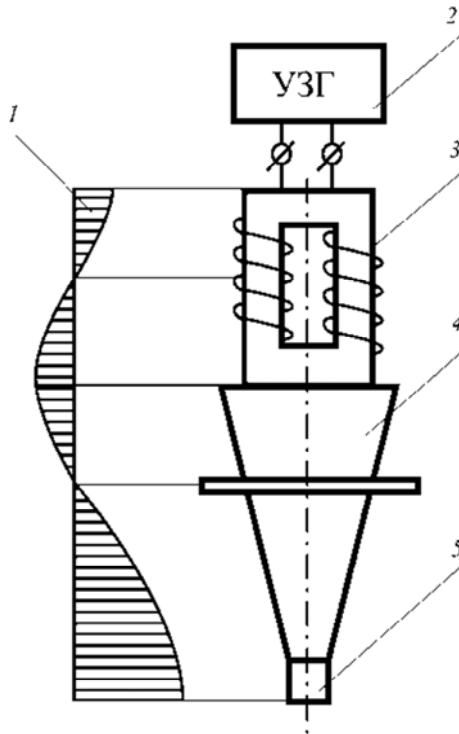


Рис. 1.1. Основные элементы акустической колебательной системы технологического назначения:

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

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 магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи.

Магнитострикционные преобразователи

В основу действия этих преобразователей положен магнитострикционный эффект, сущность которого заключается в изменении размеров ферромагнитных материалов под действием магнитного поля.

Для количественной оценки магнитострикционных свойств материалов используется магнитострикционное удлинение $\Delta L / L$, представляющее собой относительное изменение длины стержня при приложении магнитного поля. Величина магнитострикционной деформации зависит от напряженности магнитного поля H , материала, способа обработки и температуры. Наиболее сильно эффект магнитострикции выражен в ферромагнетиках ($\Delta L / L = 10^{-6} - 10^{-5}$) и некоторых ферритах ($\Delta L / L = 10^{-4} - 10^{-3}$). Магнитострикционные материалы, помещенные в магнитное поле, ведут себя по-разному. Например, сплав платины с железом с увеличением напряженности магнитного поля удлиняется, а никель, наоборот, укорачивается. Значительной магнитострикционной деформацией обладают никель, сплавы алюминия с железом (алфер), железокобальтовые сплавы (пермендюр).

В настоящее время наибольшее применение находят никель и пермендюр. Никель обладает хорошими антикоррозионными свойствами, пластичностью и прочностью. Кроме того, очень важно, что никель хорошо паяется оловом и серебром со сталями при соединении преобразователя с концентратором.

Наиболее рациональным материалом для изготовления преобразователя является пермендюр 49К2Ф (49 % кобальта, 2 % ванадия, остальное – железо). Он обладает сильно выраженным магнитострикционным эффектом, т. е. позволяет получать весьма значительные мощности при относительно небольших размерах преобразователя. Однако, по сравнению с никелем, он обладает меньшей механической прочностью и антикоррозионной стойкостью, а, кро-

ме того, при его использовании возникают серьезные трудности соединения со сталями.

Преобразователь можно рассматривать как четырехполюсник, к входу которого подводится электрическая энергия, а с выхода снимается механическая. 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 изменяет свои размеры (вторая ступень).

Следует подчеркнуть, что при отсутствии подмагничивания магнитострикционный эффект «квадратичен», т. е. частота колебаний сердечника в 2 раза выше частоты колебаний электромагнитного поля.

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

В ультразвуковых установках технологического назначения чаще всего применяют магнитострикционные преобразователи стержневого типа, реже – кольцевого.

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

$$f_0 = C_m / 2L,$$

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

L – длина стержня, м.

Резонансная длина преобразователя при заданной частоте f_0 продольных колебаний определяется как

$$L = C_m / 2f_0 = \lambda / 2,$$

где λ – длина волны, т. е. колебательные системы продольных колебаний строятся из полуволновых элементов длиной $\lambda / 2$.

Сердечники стержневых магнитострикционных преобразователей представляют собой два или несколько стержней, совершающих продольные колебания вдоль оси. Концы стержней соединяются между собой накладкой таким образом, что образуется замкнутый магнитопровод (рис. 1.2).

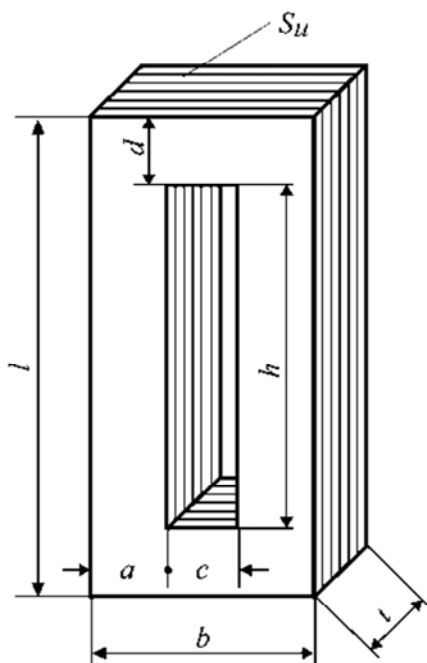


Рис. 1.2. Двухстержневой полуволновой магнитострикционный преобразователь

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 выпол-

няются 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 – 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 постоянные магниты, которые вставляют или вклеивают в магнитопровод преобразователя, как показано на рис. 1.3 (постоянные магниты зарисованы).

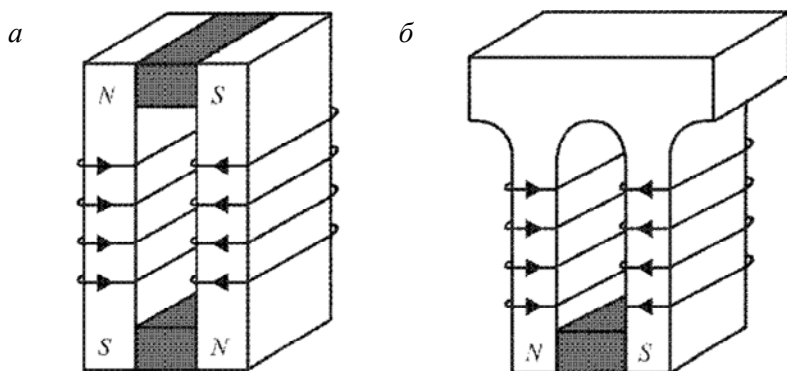


Рис. 1.3. Подмагничивание ферритовых преобразователей с помощью постоянных магнитов:

а – с установкой двух магнитов; *б* – с установкой одного магнита

Отсутствие 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 в качестве высокоэнергетических источников ультразвука пьезоэлектрических преобразователей. 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, к примеру, кварц и турмалин, а ко второй – пьезокерамические материалы, пьезоэлектрический эффект у которых появляется только после их специальной обработки (поляризации). Выполняется она путем нагревания керамики до температуры выше точки Кюри (температура, при которой материал теряет пьезоэлектрические свойства) 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 пьезокерамики обладают невысоким сопротивлением, поэтому для их возбуждения требуются небольшие электрические напряжения.

Помимо этого, из пьезокерамики можно изготовить излучатели различной формы:

- круглые диски;
- прямоугольные пластины;
- кольцевые, трубчатые, 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, их рабочая температура не должна превышать 60 °С, что требует, при длительной их работе, принудительного охлаждения. Преобразователи из этой керамики могут создавать колебания интенсивностью не более 2 Вт/см².

Керамика группы цирконата-титаната свинца (ЦТС-19, ЦТС-23) имеет более высокую точку Кюри (300 °С), а, соответственно, ее рабочая температура может превышать 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 .

В ультразвуковых колебательных системах технологического назначения широко применяют преобразователи типа «сэндвич», предложенные Ланжевенем (рис. 1.4).

Они состоят из двух пьезокерамических пластин, излучающей и отражающей металлических накладок, контактных пластин из мягкой фольги и стягивающего центрального болта или шпильки. Возбуждение преобразователя осуществляется таким образом, чтобы вся система работала как полуволновой излучатель. Металлические накладки действуют как добавочные массы и значительно снижают резонансную частоту излучателя. Благодаря этому устраняется необходимость применения толстых пьезоэлементов и улучшаются условия их охлаждения.

Параллельное соединение двух пьезокерамических пластин толщиной h удобно потому, что обе металлические накладки могут быть заземлены. При этом напряжение возбуждения снижается в 2 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.

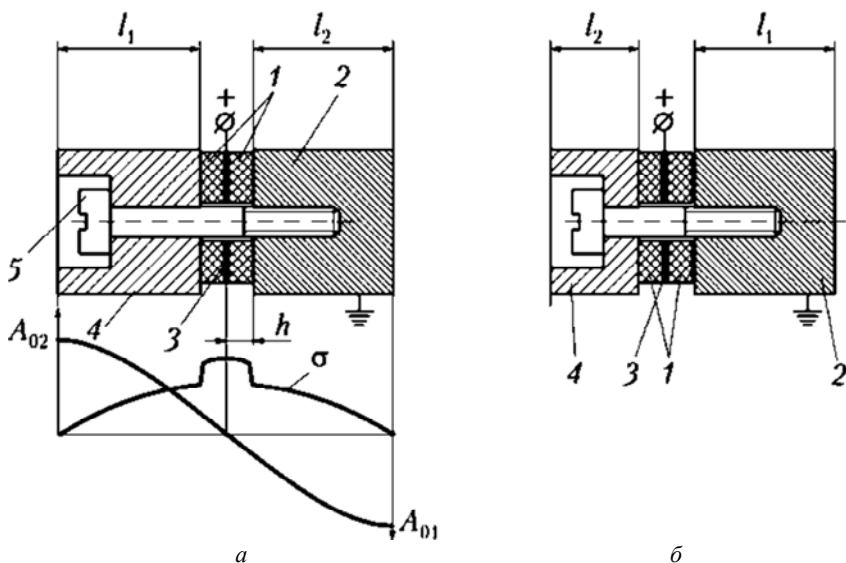


Рис. 1.4. Конструкция пьезокерамического преобразователя типа Ланжевена с частотопонижающими накладками из одного (а) и из разных металлов (б):

- 1 – пьезокерамические пластины; 2 – излучающая накладка;
- 3 – отражающая накладка; 4 – контактные пластины;
- 5 – стягивающий болт

Преобразователи могут изготавливаться с частотопонижающими накладками из одного металла, имеющими одинаковую длину ($L_1 = L_2$) (рис. 1.4, 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 ($L_1 \neq L_2$) (рис. 1.4, 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 увеличения интенсивности ультразвуковых волн высокой частоты 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 и согласования параметров преобразователя 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 полуволн

$$L = n\lambda / 2,$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$

При заданной частоте и свойствах материала длина волны зависит от формы концентратора (геометрическая дисперсия). 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 магнито-стрикционного 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 второй ступенью, соединяемой с инструментом.

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. 1.5 показаны различные типы полуволновых концентраторов, а также распределение амплитуд смещений A_0 и напряжений σ для конического, экспоненциального, катеноидального и ступенчатого профилей (соответственно, рис. 1.5, *a–z*).

Для эффективной работы концентраторов важен не только правильный расчет их размеров, но и выбор материала с оптимальными акустическими и механическими свойствами. Концентраторы при передаче энергии ультразвука находятся в сложном термомехани-

ческом состоянии, которое характеризуется значительными знакопеременными нагрузками в сочетании с высокими температурами.

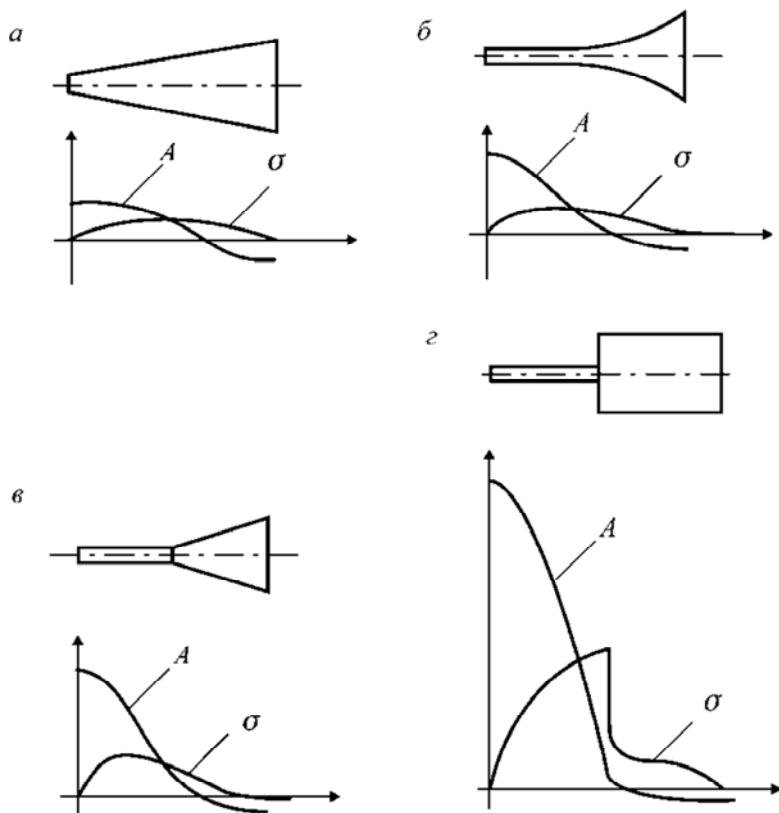


Рис. 1.5. Типы полуволновых концентраторов:
a – конический; *б* – экспоненциальный; *в* – катеноидальный; *г* – ступенчатый;
A – распределение амплитуд колебательных смещений по длине концентратора;
 σ – распределение напряжений

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 инструмен-

та. Так, экспериментально установлено, что амплитуда на торце концентраторов из титанового сплава, например BT5, в 2 раза больше амплитуды на торце концентраторов из стали 45.

Кроме того, концентраторы из титановых сплавов обладают сравнительно 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 магнитострикционными 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 припой применяют для неразъемных соединений и при высоких требованиях к их прочности.

У пьезокерамических преобразователей присоединение концентратора осуществляется посредством резьбового соединения.

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.

Основные сведения о методах и средствах измерения амплитуды ультразвуковых колебаний и визуализации характера распределения акустического поля по поверхности колеблющейся механической системы

В процессе изготовления, отладки и эксплуатации акустических колебательных систем возникает необходимость измерения механических параметров ультразвуковых колебаний, в частности, их амплитуды, и визуализации характера распределения акустического поля по поверхности колеблющейся механической системы.

Измерение амплитуды ультразвуковых колебаний

Малые значения амплитуды ультразвуковых колебаний в сочетании с высокой частотой регистрируемого процесса усложняют задачу измерения амплитуды 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 располагают таким образом, чтобы направление его перемещений совпадало с направлением колебательных смещений контактирующей с ним поверхности акустической системы. Затем последовательно фиксируются два положения стрелки прибора, соответствующие статическому положению поверхности, т. е. в отсутствии колебаний, и при ее возбуждении, при этом разность показаний для магнестрикционных вибраторов определяет размах колебаний $2A_0$. Однако точность этого метода невелика и, в зависимости от измеряемой величины погрешность, находится в пределах 10–25 %.

Известен электроконтактный метод измерения амплитуды колебаний, схема которого приведена на рис. 1.6.

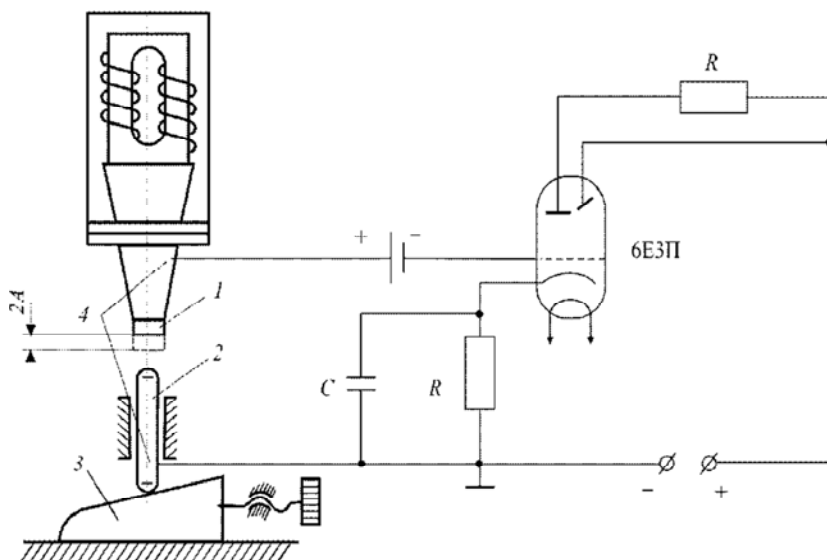


Рис. 1.6. Схема электроконтактного метода измерения амплитуды колебаний:
 1 – инструмент; 2 – измерительный наконечник;
 3 – устройство тонкой подачи; 4 – контакты

К колеблющемуся с ультразвуковой частотой инструменту *1* при помощи устройства *3* тонкой подачи (микрометрический винт и клиновая передача 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 светиться 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 для магнестрикционных вибраторов величину размаха колебаний, т. е. удвоенное значение их амплитуды.

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 $100\text{--}500^{\times}$, 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 $1\text{--}2$ 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. 1.7.

Когда световод 1, передающий свет от источника на измеряемую поверхность, и световод 2, воспринимающий отраженный от нее свет и передающий его на фотоэлемент, 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, 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. 1.8) до тех пор, пока вся поверхность воспринимающего световода не станет освещена отраженным светом, что на зависимости соответствует максимуму.

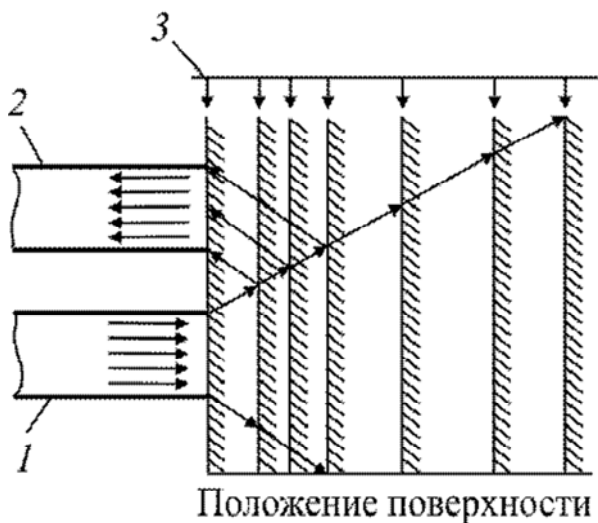


Рис. 1.7. Принципиальная схема измерения амплитуды колебания:
1, 2 – световоды; 3 – поверхность



Рис. 1.8. 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. При этом существенным фактором, влияющим на чувствительность преобразователя, является распределение световодов по сечению зонда.

С целью получения пологой характеристики оптимальным является распределение, при котором воспринимающий элемент окружен четырьмя передающими световодами. Более дешевыми, с точки зрения сборки, являются зонды, у которых распределение световодов по сечению случайное.

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 ее границу, сокращая тем самым эффективную поверхность зонда.

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 фотоспротивление.

Характеристика преобразователя имеет три участка (рис. 1.8). На первом с увеличением измеряемого расстояния выходной сигнал возрастает. Он является практически линейным и принимается рабочим. Второй участок (падающая часть) также может быть использован для измерений. Он более пологий, по сравнению с первым, и, следовательно, диапазон измеряемых перемещений здесь будет большим. Третий 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, расстояния между нею и зондом. Необходимо добиться того, чтобы выходной сигнал был функцией только измеряемого расстояния.

На рис. 1.9 приведена схема, поясняющая метод автоматической компенсации влияния отражающей способности поверхности.

Несмотря на то, что при изменении отражающей способности поверхности точка максимума смещается, отношение двух точек остается постоянным. Так, отношение между точками *A* и *B* на верхней кривой равно отношению между точками *C* и *D* на нижней.

Следовательно, можно использовать два зонда, освещаемые одним источником, но имеющие для фиксирования отраженного света отдельные фотоэлементы и закрепленные на различном расстоянии от измеряемой поверхности.

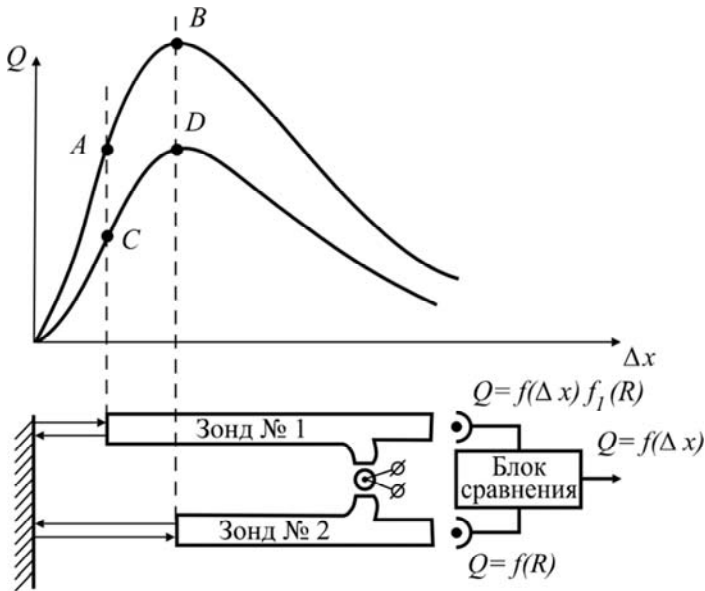


Рис. 1.9. Схема автоматической компенсации влияния отражающей способности поверхности

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. $P = f(\Delta X)f_1(R)$. 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.

Лазерные доплеровские виброметры позволяют измерять величину колебательной скорости поверхностей акустических колебательных систем бесконтактным методом на основе эффекта Доплера, состоящего в изменении длины волны лазерного излучения при его отражении или рассеянии на совершающей колебания поверхности.

Методы визуализации акустических полей на колеблющейся поверхности

В ряде случаев при разработке сложных акустических колебательных систем, генерирующих, к примеру, 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 накопления вблизи узловых линий мелких сухих частиц абразива или песка, насыпанного на колеблющуюся поверхность пластинки, диска или другой механической системы. Каждой собственной форме (моды) колебаний 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 фотобума-

гу накладывают на исследуемую поверхность и смачивают проявителем, и в местах, где интенсивность ультразвуковых колебаний выше, диффузия проявителя в желатине больше, и фотобумага здесь чернеет быстрее. В результате на фотобумаге образуется картина, представляющая сочетание черных и более светлых зон, соответствующих характеру распределения интенсивности ультразвука на исследуемой поверхности.

Визуализация характера распределения колебательных скоростей по поверхностям акустических колебательных систем может также производиться с помощью сканирующих лазерных доплеровских виброметров.

Описание экспериментальных установок

Для выполнения практической части лабораторной работы по визуализации акустических полей с помощью фигур Хладни применяется экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.10, *а*, а фотография ее общего вида показана на рис. 1.10, *б*.

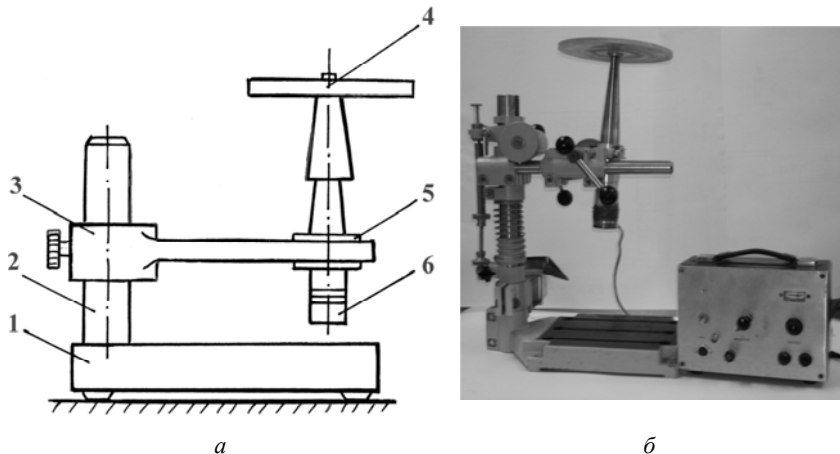


Рис. 1.10. Принципиальная схема экспериментальной установки (*а*); фотография общего вида экспериментальной установки (*б*):
 1 – основание; 2 – стойка; 3 – кронштейн; 4 – закрепленный образец;
 5 – фланец; 6 – ультразвуковой преобразователь

Она 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 пьезокерамический ультразвуковой преобразователь 6. При этом он установлен таким образом, что излучающий торец конического концентратора находится вверху.

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 симметрично расположенных винтов закрепляется в узловом сечении концентратора. Питание преобразователя осуществляется от малогабаритного ультразвукового генератора.

Для получения и исследования фигур Хладни в работе используется диск круглой формы.

Для приобретения практических навыков измерения амплитуды колебаний прямым оптическим методом в работе используется специальный электромагнитный вибратор, фотография общего вида которого представлена на рис. 1.11.

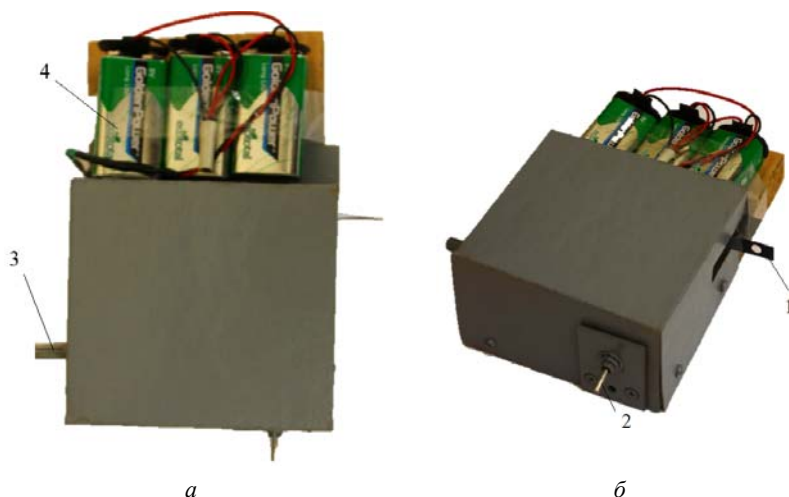


Рис. 1.11. Фотография электромагнитного вибратора:

a – вид сверху; *б* – вид сбоку;

1 – тонкая стальная пластинка; 2 – тумблер; 3 – рукоятка; 4 – блок батарей

Объектом измерения является тонкая стальная пластинка 1, совершающая изгибные колебания. Амплитуда колебаний регулируется с помощью рукоятки 3. Вибратор питается от блока батарей 4 и включается с помощью тумблера 2.

Порядок выполнения работы

Изучение конструкции электроакустических преобразователей

1. Получить у инженера ультразвуковые преобразователи и штангенциркуль. Фотографии общего вида магнитострикционного и пьезоэлектрического преобразователей, соответственно, приведены на рис. 1.12, а, б.



Рис. 1.12. Фотография общего вида:
а – магнитострикционного преобразователя;
б – пьезокерамического преобразователя

2. Вычертить эскиз магнитострикционного преобразователя в сборе с коническим концентратором, обратив внимание на то, что эти элементы соединены между собой посредством пайки.

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

4. Располагая значением длины волны λ ($\lambda = 2L$, где L – длина магнитострикционного пакета) и скоростью распространения звука в никеле ($C_{зв} = 4780$ м/с), по известной зависимости определить резонансную частоту магнитострикционного преобразователя:

$$f = C_{зв} / \lambda.$$

5. Построить эпюру распределения амплитуды колебательных смещений и напряжений по длине магнитострикционного преобразователя, обратив внимание на то, что, во-первых, место располо-

жения фланца на концентраторе должно совпадать с узловым сечением распределения амплитуды колебательных смещений, а, во-вторых, амплитуда колебательных смещений от широкого к узкому сечению концентратора должна возрасти.

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

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

7. Вычертить эскизы деталей, входящих в конструкцию преобразователя.

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

9. Оформить эскиз сборочного чертежа пьезоэлектрического преобразователя.

10. Определить линейный размер L от середины пьезоэлектрических пластин до выходного торца изучаемой накладки. Это расстояние равно четверти длины волны в ее материале, т. е. $\lambda / 4$.

11. Располагая значением длины волны λ и скоростью распространения звука в сплаве Д16Т ($C_{зв} = 4780$ м/с), определить резонансную частоту пьезоэлектрического преобразователя:

$$f = C_{зв} / \lambda.$$

12. Построить эпюру распределения амплитуды 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 пьезоэлектрических пластин.

Визуализация акустических полей с помощью фигур Хладни

1. Верхнюю (рабочую) поверхность круглого диска тщательно протереть от загрязнений.

2. Взять щепотку мелкодисперсного абразива и с высоты 100–150 мм над поверхностью образца нанести его равномерно на исследуемую поверхность.

3. Включить тумблер «сеть» на панели ультразвукового генератора.

4. Плавно изменяя частоту генератора путем поворота ручки «частота», внимательно наблюдать за поведением абразивных частиц на поверхности образца. На определенной частоте генератора происходит резонансное возбуждение акустической системы «ультразвуковой преобразователь–испытуемый образец», где последний начинает совершать колебания определенной формы, а абразивные частицы располагаются по соответствующим узловым линиям, образуя фигуры Хладни (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Фотография фигуры Хладни, полученная на поверхности колеблющегося диска

5. После получения фигур Хладни на данной частоте возбуждения преобразователя, отключить на генераторе тумблер «сеть».

6. Измерить геометрические параметры полученной фигуры Хладни и нанести их на чертеже образца.

7. По результатам проведенных исследований построить эпюры распределения амплитуды колебательных смещений по поверхности исследованных образцов.

8. Вычислить резонансную частоту ($C_{зв} = 5000$ м/с).

Освоение оптического метода измерения амплитуды колебаний

1. Установить вибратор 1 на измерительном столе 2 микроскопа ММИ-1 таким образом, чтобы направление пластины совпадало

с направлением продольного перемещения измерительного стола микроскопа (рис. 1.14).

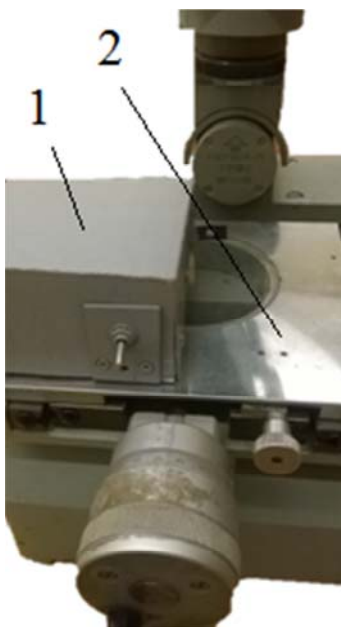


Рис. 1.14. Фотография вибратора (1), установленного на измерительном столе микроскопа (2)

2. С помощью маховика перемещения кронштейна с тубусом микроскопа добиться резкого изображения торцевой (узкой) поверхности пластины.

3. Включить на вибраторе тумблер питания и, вращая рукоятку регулирования амплитуды колебаний пластины, установить режим, при котором величина размаха (размытости изображения) ее свободного конца составит порядка 2–3 мм.

4. Вращая микрометрические винты продольного и поперечного перемещения измерительного стола микроскопа, совместить перекрестье в окуляре с верхним положением колеблющегося конца пластины (рис. 1.15) и зафиксировать показание на лимбе микрометрического винта поперечного перемещения измерительного стола микроскопа.

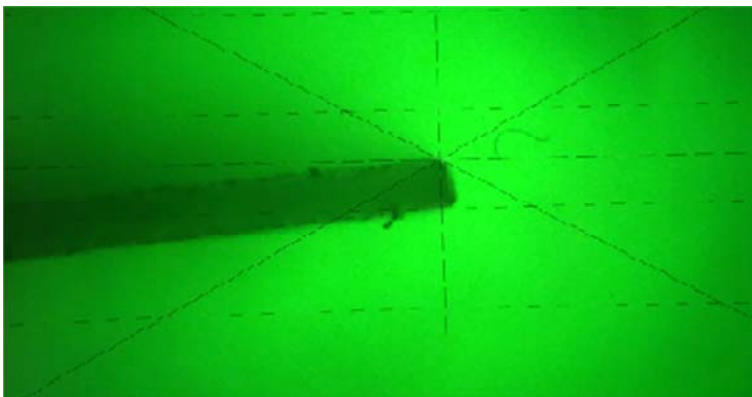


Рис. 1.15. Фотография, иллюстрирующая совмещение перекрестья в окуляре с верхним положением колеблющегося конца пластины

5. Вращая микрометрический винт поперечного перемещения измерительного стола микроскопа, совместить перекрестье в окуляре с нижним положением колеблющегося конца пластины и зафиксировать показание на лимбе. Разность показаний на лимбе микрометрического винта соответствует удвоенному значению амплитуды колебаний конца пластины, т. е. ее размаху.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Сборочные чертежи магнитострикционного и пьезокерамического ультразвуковых преобразователей с эпюрами распределения амплитуды колебательных смещений и напряжений по их длине. Результаты расчета резонансной частоты колебаний магнитострикционного и пьезокерамического ультразвуковых преобразователей.
 - 4.2. Схема экспериментальной установки для наблюдения фигур Хладни. Результат исследования фигур Хладни, представленный в виде эскиза исследуемого диска с нанесенным на него изображением фигур Хладни и эпюрой распределения амплитуды колебательных смещений.

4.3. Схема электромагнитного вибратора. Результаты измерений амплитуды колебаний оптическим методом.

5. Вывод.

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? Какие меры принимаются для его предотвращения?

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

5. В чем преимущества и недостатки ферритовых магнитострикционных преобразователей, в сравнении с металлическими?

6. Что положено в основу действия пьезоэлектрических преобразователей?

7. На какие группы подразделяются пьезоэлектрические материалы?

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

9. Каковы назначение и принцип работы концентраторов ультразвуковых колебаний?

10. Какие основные требования предъявляются к материалам концентраторов?

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

12. В чем заключается методика измерения амплитуды колебаний электроконтактным методом?

13. Назовите достоинства и недостатки оптического метода измерения амплитуды ультразвуковых колебаний.

14. Какая зависимость положена в основу измерения амплитуды колебаний с помощью фотоэлектрических преобразователей? Какие характерные участки она имеет?

15. Из каких основных элементов состоит прибор для измерения амплитуды колебаний фотоэлектрическим методом?

16. Каким образом при измерении амплитуды колебаний фотоэлектрическим методом производится компенсация влияния отражающей способности контролируемой поверхности?

17. В чем состоит эффект Доплера, применяемый для измерения амплитуды колебаний с помощью лазерных доплеровских виброметров? Для чего применяются сканирующие лазерные доплеровские виброметры?

18. Какие методы применяются для визуализации акустических полей на колеблющейся поверхности?

19. В чем заключается механизм образования на колеблющейся поверхности фигур Хладни?

Литература

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

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

3. Киселев, М. Г., Минченя, В. Т., Ибрагимов, В. А. Ультразвук в поверхностной обработке материалов. – Минск : Тесей, 2001. – 344 с.

Лабораторная работа № 2

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЧИСТКА И ЗВУКОКАПИЛЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ В ЖИДКОСТИ

Цель работы

1. Изучить основные закономерности процесса ультразвуковой очистки, а также технологию и оборудование для ее осуществления.
2. Изучить механизм и закономерности проявления звукокапиллярного эффекта в жидкости, а также основные сведения о явлении ультразвуковой кавитации.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Ультразвуковая установка УЗУ-0,25.
2. Алюминиевая фольга.
3. Перманентный маркер.
4. Стеклянная капиллярная трубка.
5. Приспособление для закрепления капиллярной трубки и регулирования положения ее торца относительно излучающей поверхности ультразвукового преобразователя.
6. Линейка с пределом измерения 300 мм и ценой деления 1 мм.

Теоретическая часть

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, получить при этом 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, радиационное 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: ее вязкость, упругость насыщенного пара, поверхностное натяжение, степень газосодержания. За счет выбора параметров ультразвукового поля и жидкостей с определенными физико-химическими свойствами возможно 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.

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 растягивающее давление P в жидкости становится по абсолютной величине большее некоторого критического значения $P_{кр}$, называемого *порогом кавитации*. Для

идеальной однородной чистой жидкости вероятность спонтанного образования пузырьков становится заметной лишь при достаточно больших растягивающих напряжениях, к примеру, 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 более низких давлениях. Это связано с тем, что в реальных жидкостях всегда содержится множество парогазовых пузырьков и мельчайших частиц различных размеров, представляющих собой так называемые *зародыши кавитации*.

Следует подчеркнуть, что порог кавитации зависит от многих параметров, характеризующих как состояние жидкости – газосодержание, давление насыщенного пара, 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. Для возникновения кавитации в воде при 20 кГц величина интенсивности ультразвука должна составлять десятые доли Вт/см², увеличение частоты до 200 кГц требует создания ультразвукового поля с интенсивностью порядка 10 Вт/см², а при 0,5 МГц порядка 200 Вт/см².

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

$$R_{кр} < R_0 < R_{рез}. \quad (2.1)$$

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.

Крупные парогазовые пузыри 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.

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

$$P_{\text{п}} + P_r = P_0 + \frac{2\sigma}{R_0}, \quad (2.2)$$

где $P_{\text{п}}$ – давление насыщенного пара;

P_r – давление газа;

P_0 – статическое давление;

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

Под действием переменных давлений, возникающих в жидкости при распространении звуковой волны, радиус парогазовой полости (форму которой можно считать близкой к сферической) увеличивается до максимального значения R_{max} примерно на два порядка (от нескольких до сотен микрометров). Затем пузырек резко захлопывается до радиуса R_{min} .

Качественная картина процесса роста и захлопывания кавитационной полости в воде представлена на рис. 2.1

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 статического давления на поверхность кавитационной полости в связи с тем, что поверхность увеличивается пропорционально квадрату радиуса. Скорость стенок полости снижается и в наивысшей точке становится равной нулю.

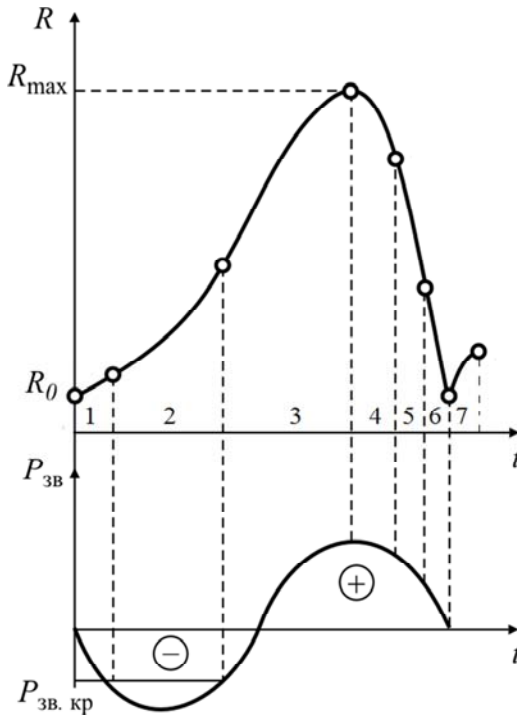


Рис. 2.1. Изменение радиуса кавитационной полости за один период колебаний:

- 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

Затем на участке 4 под действием положительного давления звуковой волны начинается фаза сжатия полости, и на участке 5 скорость стенок полости (пузырька) стремительно растет. Звуковое давление, статическое давление и поверхностное натяжение действуют в одном направлении: к центру кавитационного пузырька; 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. 2.1 показан процесс захлопывания кавитационного пузырька за один период колебаний. Однако, до наступления момента захлопывания, пузырек в течение нескольких циклов совершает пульсирующие колебания, не захлопываясь.

Вещество в кавитационной области подвергается интенсивным воздействиям (кавитационной эрозией), что сопровождается разрушением поверхности твердых тел, находящихся в этой области. 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

Он 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, если кавитационная область, состоящая из пульсирующих и захлопывающихся кавитационных пузырьков, находится непосредственно под капилляром.

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

$$P_{\text{к}} = \frac{2\sigma \cos \theta}{R_{\text{к}}}, \quad (2.3)$$

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

θ – краевой угол, характеризующий способность жидкости смачивать поверхность, рад (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

$$P_r = \rho gh, \quad (2.4)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – высота столба жидкости, м.

Под действием разности давлений $\Delta P = P_k - P_r$ жидкость приходит в движение.

По вертикальному капилляру жидкость поднимается на высоту

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g R_k}. \quad (2.5)$$

Скорость подъема U жидкости в цилиндрическом капилляре составляет

$$U = \frac{P}{4\eta h} (R_k^2 - r^2), \quad (2.6)$$

где P – давление, Н/м²;

η – коэффициент динамической вязкости, сП;

r – расстояние от центра капилляра, м.

Таким образом, из приведенных соотношений (2.5) и (2.6) 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.

Одной из причин увеличения подъема жидкости в капилляре под действием ультразвука являются импульсы давления, возникающие при захлопывании кавитационных полостей, локализованных в се-

чении капилляра, как показано на рис. 2.2, *а*. За время захлопывания единичной кавитационной полости жидкость в капилляре приобретает скорость и продолжает двигаться по инерции до момента следующего захлопывания кавитационной полости.

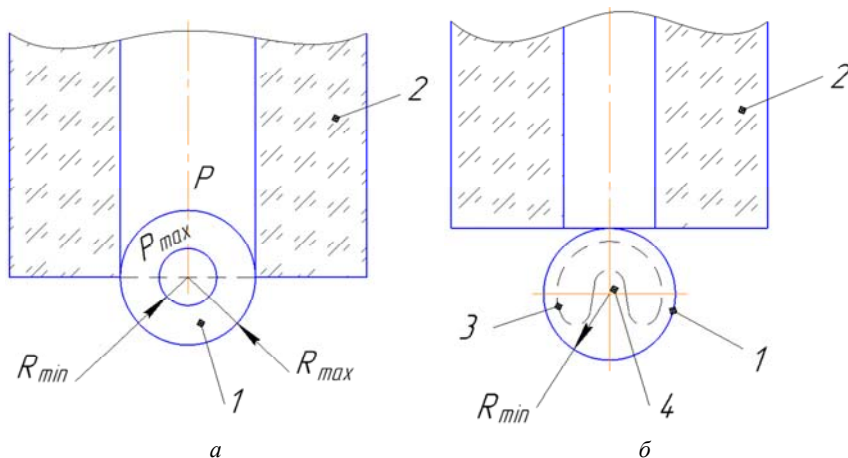


Рис. 2.2. Схема захлопывания пузырька у входа капилляра:

а – симметричное захлопывание;

б – 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 у основания капилляра является неустойчивым. Уход кавитационных пузырьков из сечения капилляра приводит к мгновенному опусканию жидкости до уровня, определяемого действием сил поверхностного натяжения. Поддержание уровня жидкости в капилляре требует меньших затрат акустической энергии (в 5–10 раз), так как при этом уже не нужно преодолевать силы вязкого трения жидкости о стенки капилляра.

В качестве второй возможной причины подъема жидкости в капилляре рассматривается попадание кумулятивных струй жидкости в канал капилляра из-за несимметричного захлопывания кавитационных пузырьков (рис. 2.2, б). Факторами, способствующими образованию струи, направленной в канал капилляра, являются:

- ухудшение условий поступления жидкости к пузырьку со стороны, обращенной к капилляру;
- 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 подъема жидкости в нем на величину $\Delta h_{\text{п}}$. Повторяясь с частотой, определяемой вероятностью возникновения пузырька у входа в канал капилляра, захлопывание приводит к суммированию величин $\Delta h_{\text{п}}$ 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 $\Delta h_{\text{п}}$, вызванное попаданием струи в канал капилляра, очевидно, равно его уменьшению $\Delta h_{\text{в}}$ вследствие вытекания под действием силы тяжести столбика жидкости, т. е. установится равенство $\Delta h_{\text{п}} = \Delta h_{\text{в}}$.

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. 2.3 приведены зависимости высоты (кривая 1) и скорости (кривая 2) подъема воды в стеклянном капилляре сечением $0,35 \times 0,35 \text{ мм}^2$ от времени воздействия ультразвука. Из этих данных видно, что уровень воды в капилляре за счет звукокапиллярного эффекта превышает уровень, обусловленный силами поверхностного натяжения, более чем в 10 раз.

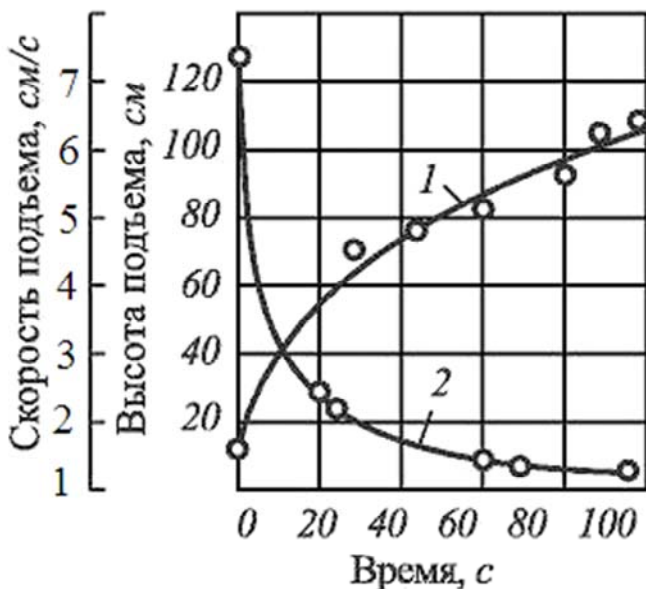


Рис. 2.3. Высота (1) и скорость (2) подъема воды в стеклянном капилляре в зависимости от времени воздействия ультразвука

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.

Звукокапиллярный эффект позволяет в десятки раз ускорить пропитку пористо-капиллярных тел и увеличивает заполнение щелей в конструкциях. Применяется при пропитывании катушек трансформаторов и дублении кож, 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 заполнения тонких каналов литейной формы при изготовлении точных отливок из алюминиевых сплавов, когда их затверждение проводится в поле акустической кавитации при наложении статического давления.

Акустические течения

Акустические течения представляют собой регулярные течения среды, возникающие в интенсивном звуковом поле. Они возникают как в свободном неоднородном звуковом поле, так и вблизи различного рода препятствий, причем они 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 λ различают акустические течения трех типов:

1) течения *в свободном неоднородном поле*, когда характерный масштаб течения определяется размером неоднородности, к примеру, радиусом звукового пучка r (рис. 2.4, *а*);

2) течения *в стоячих волнах*, масштаб которых определяется длиной волны (рис. 2.4, *б*);

3) течения *в пограничном слое вблизи препятствий*, расположенных в акустическом поле (рис. 2.4, *в*).

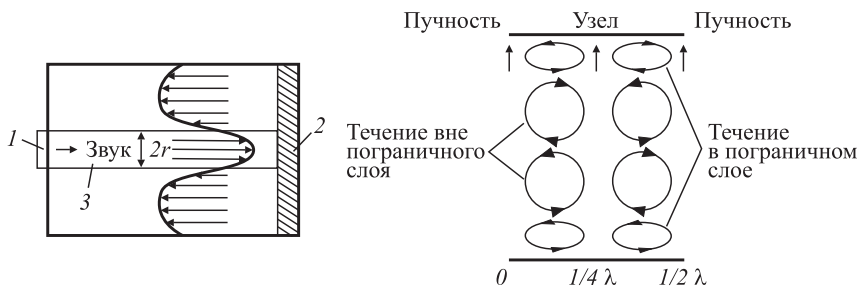


Рис. 2.4. Схемы акустических течений:

a – 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.

Радиационное давление

На любое тело, помещенное в акустическое поле, действует *переменная сила* с равным нулю средним значением, связанная с воздействием на поверхность тела акустического давления, изменяющегося во времени по гармоническому закону, и *постоянная радиационная сила*, вызванная воздействием на поверхность тела давления излучения (радиационного давления), которое, в отличие от акустического давления, изменяется во времени по негармоническому закону и имеет отличное от нуля среднее значение. Давление излучения возникает и при воздействии на тело волн другой физической природы; в частности, световые волны оказывают на поверхность тела постоянное давление, известное как давление света.

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. 2.5) 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 микропоры и глухие каналы. Благодаря действию акустических течений осуществляется ускоренное удаление загрязнений с поверхности.

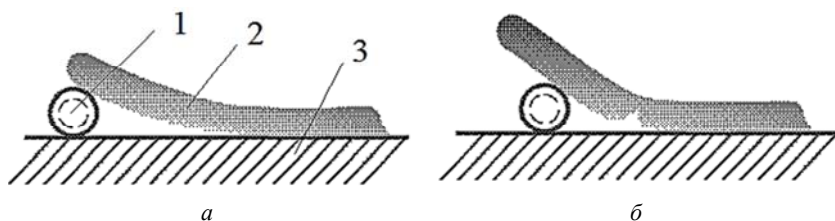


Рис. 2.5. Схема, поясняющая разрушение пленки загрязнения пульсирующими кавитационными пузырьками:

а – начальная стадия; *б* – стадия разрушения пленки;

1 – пульсирующий пузырек; *2* – пленка загрязнения; *3* – очищаемая поверхность

Если загрязнения прочно связаны с поверхностью, то для их разрушения и удаления 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;

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

– по 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:

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

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

3) окалина и окисные пленки, обладающие кавитационной стойкостью и прочной связью с поверхностью и взаимодействующие лишь с агрессивными средами;

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

5) 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.

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, может оказывать 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 сильно вязких 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 наступила стадия сжатия в звуковой волне. 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 кавитационной 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 вводят в моющий раствор 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 постоянных прочих 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 по-

вышению 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 к увеличению резонансных размеров 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, поэтому оказывает первостепенное влияние на процесс очистки. При очень 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 замочки деталей, загрязненных доводочными пастами, рекомендуется применять ацетон, фреон, бензин, керосин. Однако при наличии в составе загрязнений жирных кислот и парафинов замочка деталей в легколетучих растворителях нецелесообразна. 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 замочку 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, 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 барабаны 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. 2.6 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.

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 от-

рыву 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.

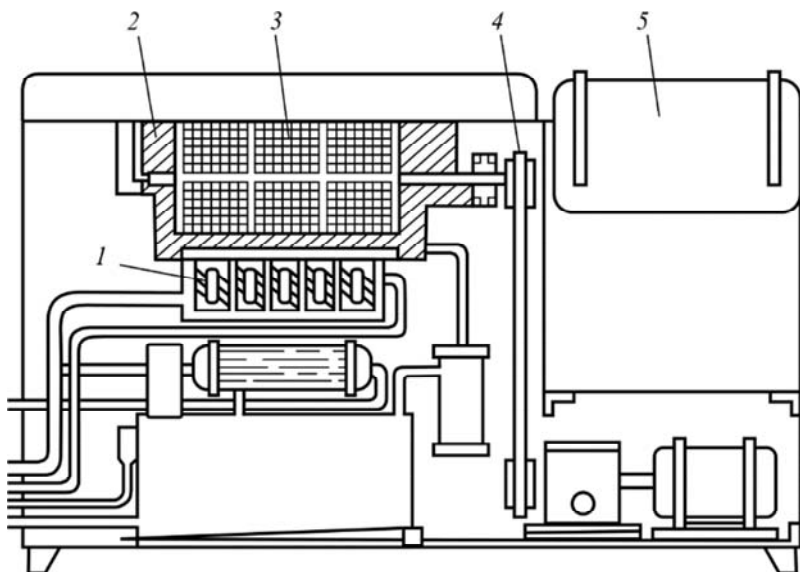


Рис. 2.6. Схема механизированной ультразвуковой ванны:
1 – преобразователи; 2 – корпус ванны; 3 – загрузочные сетчатые барабаны;
4 – привод; 5 – пульт управления

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 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 приме-

няться 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. 2.7). В очищаемое отверстие вводится трубчатый волновод, в котором от магнитострикционного 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 выходящим через трубчатый волновод в зону очистки. В рукоятке установлен курок-выключатель.

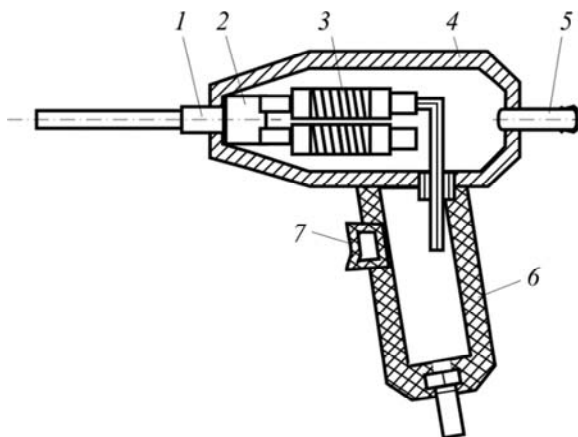


Рис. 2.7. Устройство для очистки глубоких отверстий:
1 – волновод; 2 – диафрагма; 3 – магнитострикционный преобразователь;
4 – корпус; 5 –штуцер для подачи моющего раствора;
6 – рукоятка; 7 – курок-выключатель

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 излу-

чателъ ультразвука. Источником колебаний служит магнитострикционный преобразователь большой мощности (4 кВт). Очищаемая труба с помощью пневматического привода зажимается между цилиндрическим волноводом и полуволновой опорой, образуя резонансную акустическую систему (рис. 2.8). Очищаемая труба постепенно перемещается в осевом направлении, а во внутреннюю ее полость от насоса подается моющий раствор. В тех случаях, когда необходимо очистить одновременно и наружную поверхность, трубу помещают в ванну с моющим раствором. Для очистки длинных труб применяются кольцевые излучатели, в которых заготовки перемещаются вдоль оси излучателя.

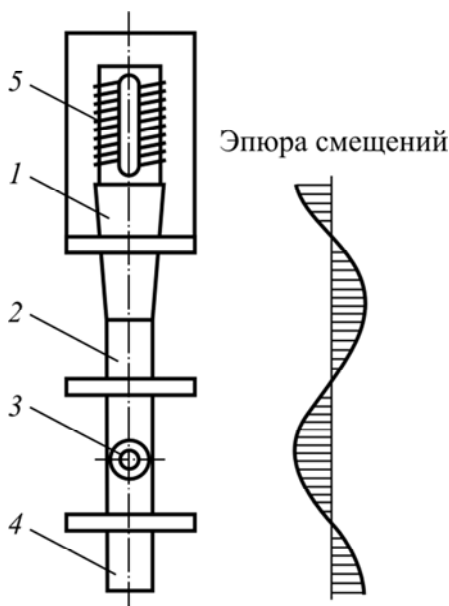


Рис. 2.8. Схема установки для ультразвуковой очистки внутренних полостей труб:
 1 – ультразвуковой концентратор; 2 – инструмент; 3 – труба;
 4 – полуволновая опора; 5 – преобразователь

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

1. Контакт с излучателем прецизионной поверхности детали может вызвать ее повреждение.

2. Возбуждение в детали знакопеременных напряжений может вызвать ухудшение ее геометрической формы.

Таким образом, применение контактного метода можно рекомендовать с учетом выше отмеченных 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. 2.9 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 магнитострикционными преобразователями общей мощностью 300 кВт.

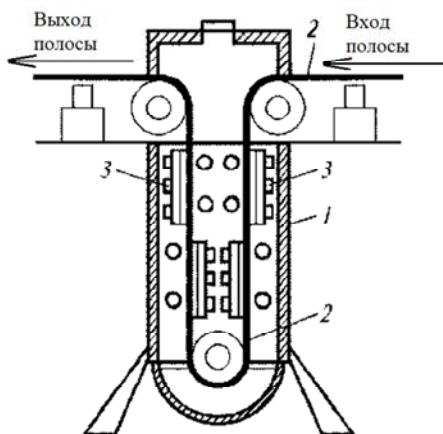


Рис. 2.9. Схема ультразвуковой ванны для очистки стальной полосы при поточном производстве:

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 деталей 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.

Описание экспериментальных установок

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 (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Технические характеристики ультразвуковой установки УЗУ-0,25

Характеристика	Значение
Мощность генератора, кВт:	
– выходная;	0,25
– потребляемая;	0,45
– напряжение питающее сетевое, В;	220
– преобразователь;	пьезокерамический
– число преобразователей	3
Частота, Гц:	
– питающей сети;	50
– генератора	18000
Габариты генератора, мм:	
– в плане не более;	380×360
– высота не более	210
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 легкосъемным кожухом.

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

На задней стенке шасси генератора находятся патрон для предохранителя, 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 кожуха и отсека ультразвуковой очистки, в дно которого вмонтированы три пакетных преобразователя. Пакет преобразователя состоит из двух пьезоэлектрических пластин из материала ЦТС-19, двух частотно-понижающих 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 пластинах, верхней накладке и навинчивающейся нижней (отражающей) накладке.

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.

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. Приспособление состоит из основания, выполненного в виде пластины, которая устанавливается на верхнюю плоскость ванны. Капиллярная трубка устанавливается в приспособлении и фиксируется с помощью стопора. При ослаблении стопора капиллярная трубка получает возможность вертикально перемещаться,

что позволяет регулировать расстояние от торца капилляра до излучающей поверхности преобразователей.

Порядок выполнения работы

Оценка кавитационной стойкости загрязнения

1. Закрепить на проволочной петле кусочек фольги и нанести с помощью перманентного маркера на нее загрязнение.
2. Включить тумблер на генераторе в верхнее положение.
3. 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.
4. Произвести озвучивание воды в ванне в течение 30 секунд. При этом наблюдать за характером воздействия кавитирующей жидкости на поверхность фольги (на ее поверхности возникают кратковременные деформации в виде углублений цилиндрической формы).
5. Отключить генератор, переведя тумблер на нем в нижнее положение, и извлечь из ванны проволочную петлю с фольгой.
6. 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 и после ультразвуковой очистки.

Определение электроакустического КПД ультразвуковой ванны

1. Рассчитать значение акустической мощности, излученной преобразователем в воду, по следующей зависимости

$$P_{\text{ак}} = \frac{cm(t_2 - t_1)}{\tau}, \quad (2.7)$$

где $m = 2$ кг – масса воды, находящейся в ванне;

$c = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/кг·К – теплоемкость воды;

$t_1 = 20$ °С – начальная температура воды;

$t_2 = 22$ °С – температура воды после ее озвучивания;

$\tau = 2$ мин – продолжительность озвучивания воды.

2. Определить значение интенсивности ультразвука в воде, принимая площадь излучающей поверхности источника равной суммарной площади S_{Σ} трех излучающих накладок (диаметр излучающей накладки 56 мм) пьезоэлектрических преобразователей, по формуле

$$I = \frac{P_{\text{ак}}}{S_{\Sigma}}. \quad (2.8)$$

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

$$\eta_{\text{эа}} = \frac{P_{\text{ак}}}{P_{\text{э}}}, \quad (2.9)$$

где $P_{\text{э}} = 250$ Вт – электрическая мощность, подводимая от генератора к преобразователям.

Исследование звукокапиллярного эффекта

1. Установить стеклянный капилляр в приспособление для закрепления капиллярной трубки так, чтобы его торец касался одного из излучающих элементов ультразвуковой ванны. При этом должны совпасть метки на капиллярной трубке и отсчетной шкале устройства для регулирования положения капиллярной трубки.

2. Подать ультразвуковые колебания в жидкость ультразвуковой ванны путем включения тумблера на генераторе в верхнее положение.

3. Замерить уровень подъема жидкости $h_{\text{узк}}$ в капиллярной трубке. Из-за хаотичного характера захлопывания пузырьков в кавитационной области уровень подъема жидкости в капиллярной трубке будет постоянно изменяться. Поэтому за значение уровня жидкости принимать максимально наблюдаемый уровень подъема уровня жидкости в течение 20 секунд работы ультразвукового генератора.

4. Выключить питание ультразвукового генератора с помощью тумблера.

5. Результаты наблюдений занести в табл. 2.2.

6. С помощью устройства для регулирования положения капиллярной трубки отвести торец стеклянного капилляра на расстояние

2 мм от излучающего элемента 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.

7. Повторить пп. 2–5 для нового положения стеклянного капилляра.

8. Пп. 2–5 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.

9. По расстоянию S между торцом капиллярной трубки и излучающей поверхностью преобразователей сделать вывод о размерах зоны активных кавитационных процессов.

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

Таблица 2.2

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

№ опыта п/п	Диаметр капиллярной трубки, мм	Смещение торца капилляра S , мм	Высота подъема жидкости $h_{\text{узк}}$, мм

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Оценка кавитационной стойкости загрязнения и кавитационной стойкости материала. Заключение о целесообразности применения ультразвукового метода очистки загрязнений для алюминиевой фольги.

4.2. Результаты вычисления электроакустического КПД ультразвуковой ванны.

4.3. График зависимости высоты подъема уровня жидкости от значения смещения торца капиллярной трубки относительно излучающей поверхности преобразователя.

5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие явления лежат в основе механизма ультразвуковой очистки? Что такое радиационная сила и радиационное давление?

2. В чем заключается сущность возникновения акустической кавитации?

3. Каким образом классифицируются загрязнения с точки зрения ультразвуковой очистки?

4. Каким образом на эффективность процесса ультразвуковой очистки влияют поверхностное натяжение жидкости, ее вязкость, газосодержание и температура?

5. Каким образом 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. Какого типа преобразователи применены в ультразвуковой установке УЗУ-0,25?

10. В чем заключается методика определения электроакустического КПД ультразвукового преобразователя?

11. В чем состоит сущность звукокапиллярного эффекта?

12. Перечислите основные силы, действующие на единичный пузырь в жидкости и влияющие на его радиус.

13. Опишите стадии изменения радиуса единичной кавитационной полости в звуковом поле.

14. Назовите причины увеличения подъема жидкости в капилляре при подаче ультразвуковых колебаний.

15. Почему в отсутствие кавитации подъем жидкости в капилляре не наблюдается?

16. Назовите возможные области применения звукокапиллярного эффекта.

Литература

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

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

Лабораторная работа № 3

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ И УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

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.
3. Изучить устройство и принцип работы ультразвукового ингалятора.

Инструменты и принадлежности к работе

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. Штангенциркуль типа ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу равной 0,05 мм.
7. Микроскоп МИМ-5.
8. Ультразвуковой ингалятор.

Теоретическая часть

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 ко-

торых 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. 3.1. 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 входит магнитострикционный 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 – 10^6 Па.

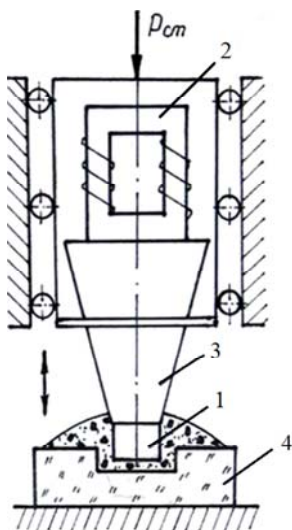


Рис. 3.1. Схема ультразвуковой размерной обработки:
1 – инструмент; 2 – ультразвуковой преобразователь; 3 – концентратор;
4 – обрабатываемая заготовка

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:

- ударное внедрение абразивных зерен, приводящее к выкалыванию частиц обрабатываемого материала;
- 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. 3.2).

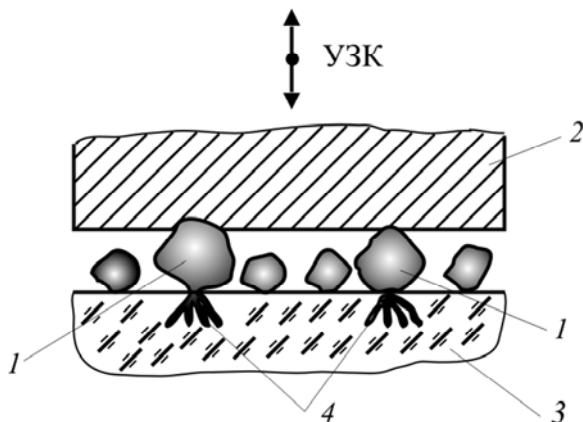


Рис. 3.2. Схема взаимодействия абразивных зерен с поверхностью заготовки и инструмента в процессе ультразвуковой размерной обработки:

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, как правило, взаимно влияющих друг на друга параметров: 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 материала сдвигу τ к сопротивлению на отрыв σ . В табл. 3.1 приведена

классификация обрабатываемости материалов ультразвуковым методом по критерию хрупкости t_x .

Таблица 3.1

Классификация обрабатываемости материалов ультразвуковым способом

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

Материалы первой группы (стекло, кварц, ситалл, керамика, кремний, германий, феррит и др.) имеют $t_a \geq 2$. 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 $1 < t_a < 2$. Это твердые и титановые сплавы, закаленные, цементированные и азотированные стали, вольфрам. В процессе их обработки под действием абразивных зерен наряду с упругими происходят и микропластические деформации, которые затрудняют диспергирование материала.

К третьей группе относятся мягкие стали, свинец и другие материалы, имеющие $t_a < 1$. 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 используются 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. К примеру, добавление в суспензию 15 % водного раствора сернокислой 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

слоей 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, а 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 $V_{и}$.

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 ($2A_0 / d_a > 1$) происходит, главным образом, не внедрение зерен в обрабатываемую поверхность, а их интенсивное дробление. В том случае, когда амплитуда колебаний мала, а зерна абразива крупные ($2A_0 / d_a < 0,5$), импульс ударной силы, действующий на зерно, оказывается недостаточным для внедрения зерен в обрабатываемый материал и его разрушения.

Максимальная производительность наблюдается при условии

$$2A_0 / d_a = 0,6-0,8.$$

Статическая нагрузка

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.

Увеличение силы подачи в определенных пределах, до момента проявления демпфирования колебаний, приводит к увеличению импульса ударных сил и глубины внедрения зерен абразива, в результате чего интенсифицируется съем материала. Одновременно с этим увеличение статической нагрузки уменьшает среднее расстояние между торцом инструмента и обрабатываемой поверхностью заго-

товки, что ухудшает условия поступления в зону обработки свежего абразива и удаления из нее продуктов износа.

Технологические возможности ультразвуковой размерной обработки

Ультразвуковая размерная обработка абразивной суспензии имеет ряд преимуществ 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, обработке 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 операцию 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. 3.3. В этом случае значительное снижение трудоемкости достигается за счет сокращения большого числа операций, обычно выполняемых другими методами, к примеру, алмазным шлифованием.

Инструменты для ультразвукового вырезания сложнопрофильных прецизионных деталей выполняются в сборной конструкции. К оправке с резьбовым хвостовиком припаивают профильную рабочую часть (рис. 3.4).

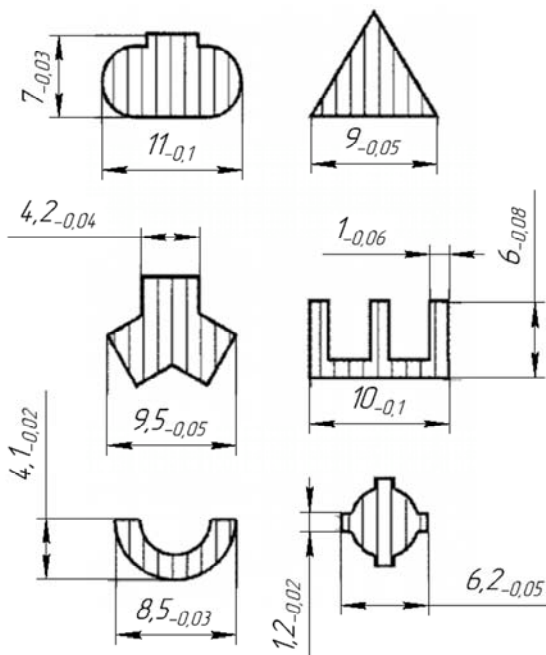


Рис. 3.3. Примеры деталей из ферритов и керамики, полученные ультразвуковой размерной обработкой

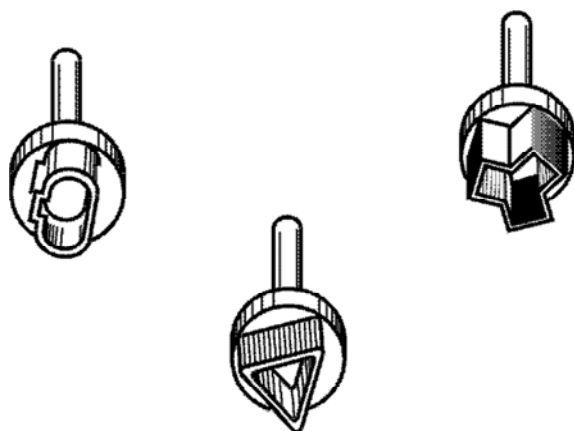


Рис. 3.4. Примеры ультразвуковых инструментов для вырезания деталей сложной формы

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. 3.5.

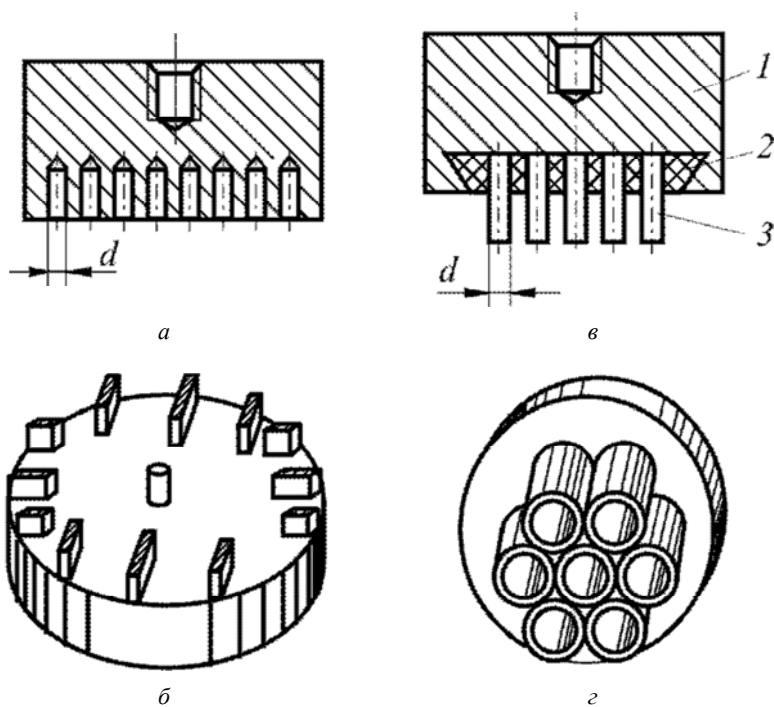


Рис. 3.5. Многоместные ультразвуковые инструменты:
1 – обойма; 2 – припой; 3 – инструмент

Инструмент, приведенный на рис. 3.5, *a* 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 процен-

том отходов, что особенно сказывается при обработке дорогих и дефицитных материалов.

Инструменты, фрезеруемые из цельной заготовки (рис. 3.5, б), используют при обработке различных пазов и других элементов некруглой формы.

Наиболее распространенные и технологичные конструкции многоместного инструмента приведены на рис. 3.5, в. В этом случае обойма имеет углубления со скосами под пайку инструментов мягким или твердым припоем.

Приведенный на рис. 3.5, г 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 прорези, 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. 3.6, а) и многоместный инструменты (рис. 3.6, б).

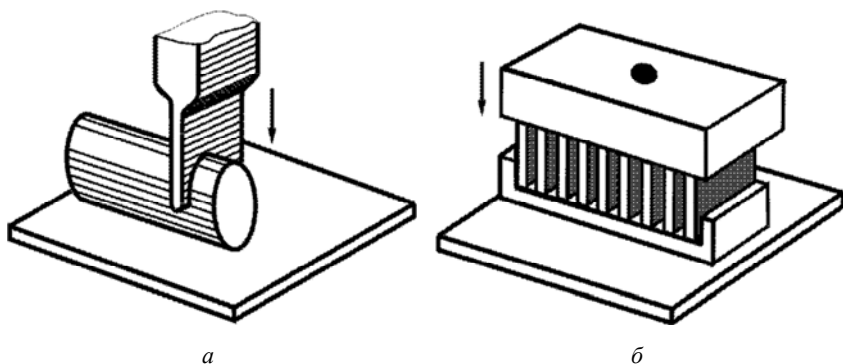


Рис. 3.6. Схема ультразвукового разрезания заготовок:
а – одиночным инструментом; б – многоместным инструментом

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 этой проблемы, а также с целью повышения производительности более эффективным является применение многоместного инструмента. Чтобы предотвратить сколы материала на выходе инструмента, заготовку перед обработкой приклеивают шилаком 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. 3.7). 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 *A*). После расклеивания получают шесть пластин-заготовок 1.

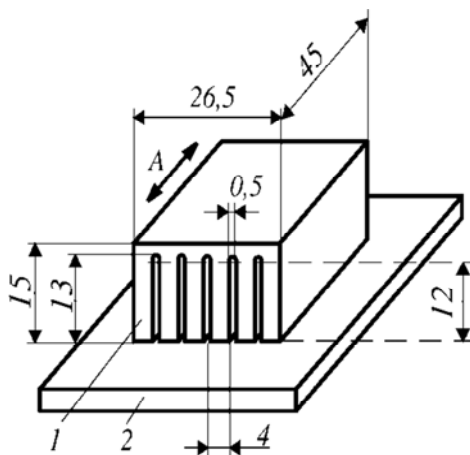


Рис. 3.7. Схема изготовления пьезодатчиков из кварца

Данная технология предотвращает сколы на краях 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. К примеру, 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 секунд, в то время как на алмазную отрезку одной такой пластины требуется 1 минута.

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. 3.8.

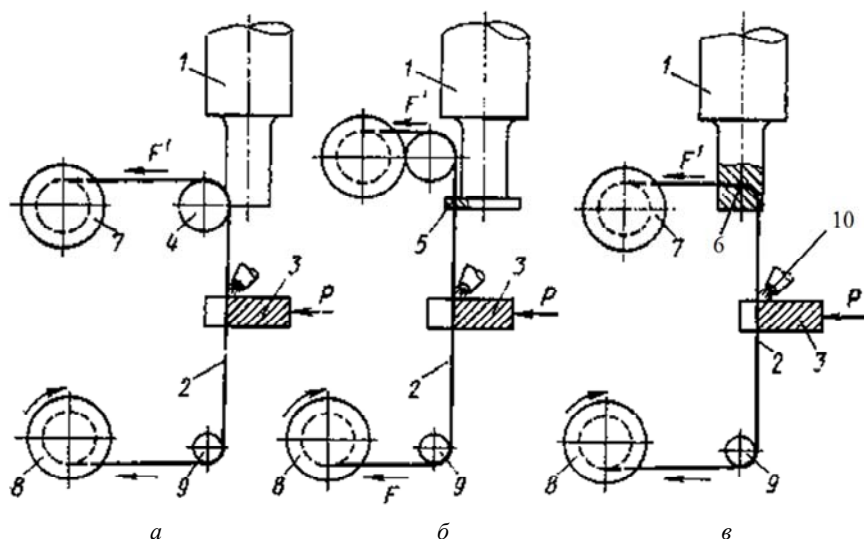


Рис. 3.8. Принципиальные схемы ультразвуковой размерной обработки непрофилированным инструментом:

- 1 – концентратор; 2 – проволока; 3 – обрабатываемая заготовка;
- 4 – абразивная суспензия; 5 – подпружиненный ролик; 6, 7 – катушки

В первом случае (рис. 3.8, *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. 3.8, *б* инструмент-проволока 2 протягивается с небольшим натягом через фильеру, установленную в пучности колебаний концентратора.

В последнем случае (рис. 3.8, *в*) инструмент огибает концентратор 1 по радиусной канавке, а прижим проволоки к концентратору осуществляется за счет ее противонатяжения.

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, возбуждаются ультразвуковые колебания от концентратора с помощью шипа 5. 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 $\geq 0,1$ мм), разрезку заготовок и др. Производительность процесса резки стекла непрофилированным инструментом Q составляет 150–200 мм²/мин. Наиболее эффективен этот способ 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 детали $P_{ст}$, 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, применяют одиночные и многоместные инструменты (рис. 3.9).

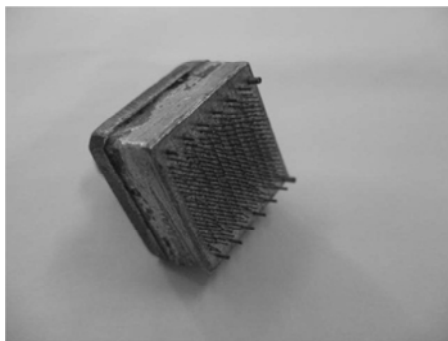


Рис. 3.9. Общий вид многоместного инструмента для прошивания отверстий

В мелкосерийном производстве установку заготовки при ультразвуковой обработке отверстий одиночными инструментами целесообразно производить при помощи специальных кондукторных втулок (рис. 3.10). 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 порядка 0,2 мм.

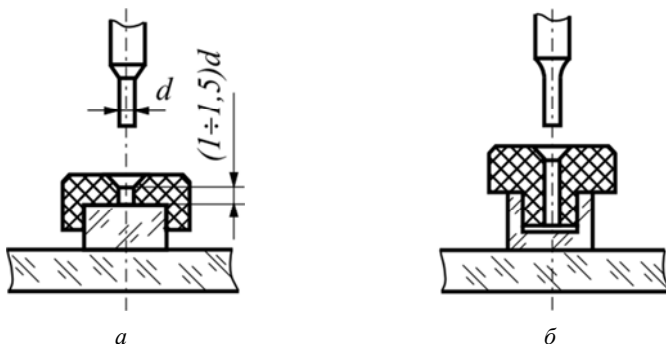


Рис. 3.10. Схемы ультразвуковой обработки отверстий по кондуктору:
а – с базированием по наружному контуру;
б – с базированием по внутреннему контуру

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 рациональном совмещении 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; во-вторых, действию электрического тока, проходящего через электролит, подвергаются непассивированные 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. 3.11 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.

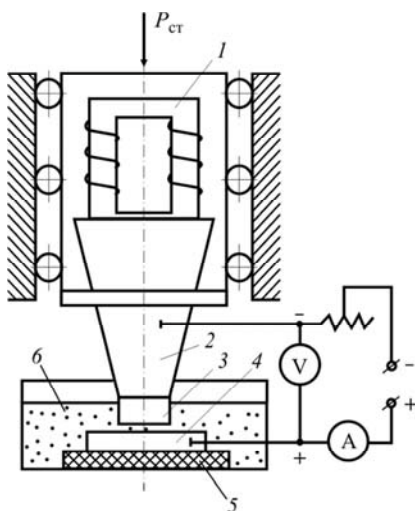


Рис. 3.11. Принципиальная схема совмещенного способа обработки:
 1 – преобразователь; 2 – концентратор; 3 – инструмент; 4 – обрабатываемая заготовка; 5 – электроизоляционная прокладка; 6 – абразивная суспензия

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 (энергоёмкость процесса); представляется возможным заменить карбид бора значительно более дешевым карбидом кремния. Недостаток совмещенного метода обусловлен несколько меньшей, в сравнении с ультразвуковой обработкой, точностью и необходимостью защиты открытых поверхностей станка от коррозии.

Описание экспериментальных установок

Ультразвуковая установка для обработки отверстий

Для проведения экспериментов по обработке отверстий в заготовках из хрупких материалов в работе используется ультразвуковая установка, схема и фотография общего вида которой приведены на рис. 3.12.

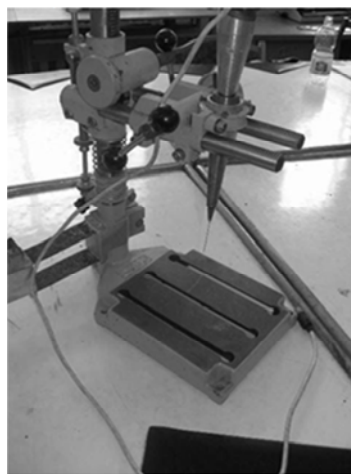
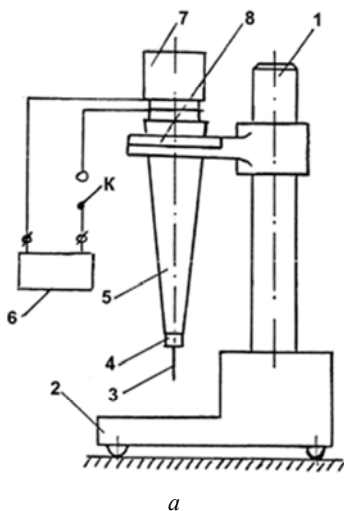


Рис. 3.12. Ультразвуковая установка для обработки отверстий:
а – принципиальная схема; б – фотография общего вида

Она состоит из акустической колебательной системы, которая включает пьезокерамический ультразвуковой преобразователь продольных колебаний 1, конический концентратор 2, сменный нако-

нечник 3 с инструментом 4. посредством фланца 5, выполненного на концентраторе, акустическая система закреплена на кронштейне 6. Последний установлен на цилиндрической стойке 7, которая жестко закреплена на массивном основании 8. Питание ультразвукового преобразователя осуществляется от генератора 9 через pedalный выключатель К.

На рис. 3.13 приведена фотография сменного наконечника 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.

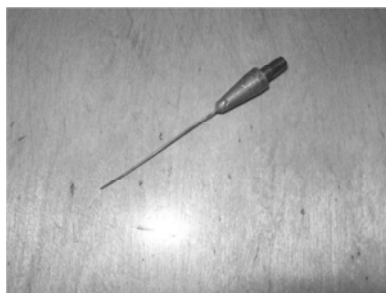


Рис. 3.13. Фотография общего вида сменного наконечника в сборе с инструментом

Ультразвуковые ингаляторы

Эффект распыления жидкостей с помощью ультразвука используется в ультразвуковых ингаляторах. *Ингаляция* (от лат. “inhalo” – вдыхаю) – это лечебно-профилактическая процедура, основанная на вдыхании лекарств в виде пара, газа или распыленной жидкости. Действующим фактором в ингаляциях чаще всего являются аэрозоли лекарственных веществ, то есть мельчайшие частицы твердого вещества или жидкости, взвешенные в газообразной среде. Чем выше степень дисперсности аэрозолей, тем выше их удельная поверхность, химическая и физико-химическая активность, тем глубже их проникновение в дыхательные пути. Частицы лекарственного вещества величиной до 0,3 мкм свободно циркулируют в дыхатель-

ных путях и не оседают на слизистых оболочках, в силу чего их использование с лечебными целями не имеет смысла. Высокодисперсные частицы, величиной 2–4 мкм, оседают преимущественно на стенках альвеол и бронхиол, а средне дисперсные (5–20 мкм) – на слизистых крупных бронхов и в трахее.

Аэрозоли, создаваемые с помощью ультразвуковых ингаляторов, имеют плотность на порядок больше, чем аэрозоли, полученные с помощью пневматических ингаляторов. Это позволяет повысить концентрацию лекарственных веществ и сократить продолжительность ингаляции. Производительность ультразвуковых ингаляторов составляет до 1,5 см³/мин. При этом размер частиц аэрозоля весьма мал и зависит от частоты ультразвука, поэтому его можно легко контролировать.

Существуют две основные схемы ультразвукового распыления: распыление в слое и распыление в фонтане. В обоих случаях образование капель аэрозоля происходит в результате их отрыва от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности жидкости. Диаметр капель аэрозоля составляет

$$d \approx 0,3\lambda_k,$$

где длина капиллярной волны определяется зависимостью

$$\lambda_k = \sqrt[3]{8\pi\sigma/(\rho f^2)},$$

где σ и ρ – соответственно, коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкости;

f – частота ультразвуковых колебаний.

При распылении в слое стоячие капиллярные волны с частотой $0,5f$ образуются на поверхности тонкого слоя жидкости, покрывающего пластину, которая колеблется перпендикулярно своей плоскости с частотой f . Капиллярные волны малой амплитуды имеют синусоидальную форму, однако с возрастанием амплитуды ультразвуковых колебаний эта форма нарушается и образуются волны конечной амплитуды, похожие на узкие язычки, близкие по форме к каплям. При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний происходит отрыв капель жидкости от гребней волн. При распылении

в слое обычно используются частоты порядка десятков кГц, а диаметр капле составляет десятки мкм. В этом случае толщина слоя жидкости должна составлять порядка долей мм, но быть не менее половины длины капиллярной волны. Распыление обычно производится с помощью концентратора с осевым каналом, который имеет на выходном торце фланец, играющий роль колеблющейся пластины.

На рис. 3.14 представлена схема конструкции ингалятора типа УИИП (ультразвуковой ингалятор индивидуального применения) с распылением в слое жидкости.

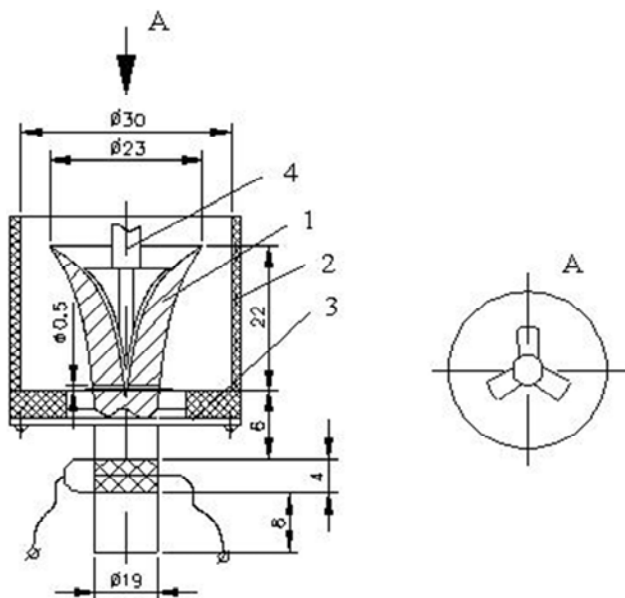


Рис. 3.14. Схема конструкции ингалятора типа УИИП:
 1 – концентратор; 2 – фланец; 3 – емкость с препаратом;
 4 – полиуретановая вставка

При распылении в фонтане капиллярные волны образуются на поверхности струи, возникающей в результате фонтанирования жидкости под действием высокочастотного ультразвука с частотой порядка МГц

Капиллярные волны возникают лишь при наличии кавитации, так как причиной их образования являются ударные волны, возни-

кающие при коллапсе кавитационных пузырьков. Схема устройства для распыления в фонтане приведена на рисунке 3.15.

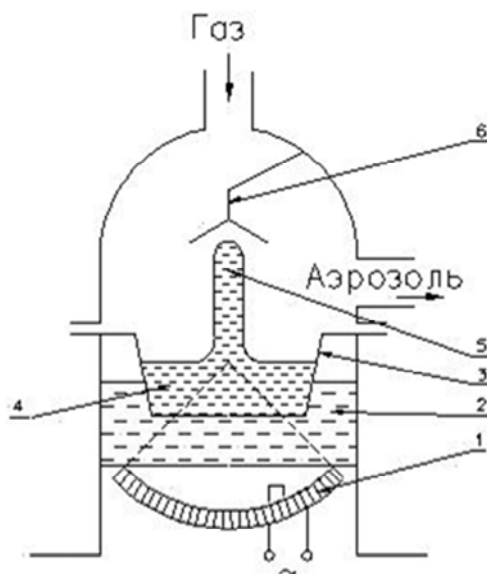


Рис. 3.15. Схема ультразвукового ингалятора с распылением жидкости в фонтане:
1 – пьезокерамическая пластина; 2 – промежуточная жидкая среда;
3 – кювета с звукопрозрачным дном; 4 – распыляемая жидкость;
5 – ультразвуковой фонтан; 6 – отражатель для ограничения высоты фонтана

Основным элементом ингалятора является фокусирующий преобразователь с резонансной частотой 1–3 МГц в виде вогнутой пьезокерамической пластины. Фокус преобразователя размещается несколько ниже поверхности жидкости. Мощность устройства составляет около 150 Вт, размер капель аэрозоля – 2–4 мкм.

Устройство ультразвукового ингалятора Comfort

Ультразвуковой ингалятор Comfort (рис. 3.16) состоит из распылительной камеры 1, на дне которой находится фокусирующий ультразвуковой излучатель, крышки 2 распылительной камеры и штуцера 3. Включение и выключение прибора производятся кнопкой 4.

Крышка 2 предотвращает разбрызгивание лекарственного препарата, связанное с образованием фонтана в процессе распыления.

Лекарственный препарат заливается в специальный стаканчик с звукопрозрачным дном, который устанавливается в распылительную камеру 1.



Рис. 3.16. Ультразвуковой ингалятор Comfort:

1 – распылительная камера; 2 – крышка; 3 – штуцер; 4 – выключатель прибора

Для передачи ультразвуковых волн от излучателя к стаканчику используется контактная жидкость (вода), которая заливается в распылительную камеру 1 между излучателем и дном стаканчика. Регулировка производительности распыления (объема аэрозоля, формируемого за единицу времени) осуществляется с помощью выполненного паза на верхнем краю распылительной камеры 1. При совмещении этого паза с аналогичным, выполненным на нижнем краю крышки 2, формируется выходное отверстие, через которое часть аэрозоля может выходить в атмосферу, минуя штуцер. Путем изменения степени перекрытия пазов за счет поворота крышки 2 регулируются размеры выходного отверстия и, соответственно, объем аэрозоля, выходящего через него в атмосферу за единицу времени. Технические характеристики вышеописанного ингалятора представлены в табл. 3.2.

Технические характеристики ингалятора Comfort

Характеристика	Значение
Питание, сетевой адаптер	220/12 В
Потребляемая мощность, не более	15 Вт
Ультразвуковая частота	2,64 МГц
Интенсивность распыления	Регулируемая (0–1 мл/мин)
Дисперсный состав аэрозоля	80 % не более 4 мкм
Объем стаканчика для лекарств	9 мл
Объем камеры распыления	14 мл
Размеры	150×80×50 мм
Вес	170 г

Порядок выполнения работы*Обработка сквозных отверстий в стеклянном образце*

1. Получить у инженера стеклянный образец, предназначенный для обработки.

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

3. Приготовить абразивную суспензию, для чего:

– с помощью мерной ложки насыпать в емкость определенный объем абразивного порошка; данные о его марке и зернистости занести в табл. 3.3;

– с помощью той же ложки добавить в емкости 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 ($d_{\text{инстр}}$) табл. 3.3.

5. Поместить на рабочий стол ультразвуковой установки пластмассовую ванночку, как показано на рис. 3.17, для сбора в процессе обработки абразивной суспензии.

6. Включить тумблер «сеть» на панели ультразвукового генератора в верхнее положение.

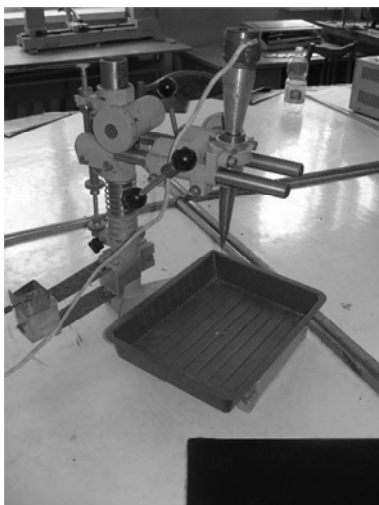


Рис. 3.17. Фотография экспериментальной установки и ванночки для сбора абразивной суспензии

7. Осуществить обработку отверстия в стеклянном образце для чего выполнить следующее:

- взять образец и, удерживая с двух сторон между большим и указательным пальцами рук, с небольшим усилием прижать его обрабатываемой поверхностью к торцу проволочного инструмента, как показано на рис. 3.18;

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

- в процессе обработки, постоянно перемешивая абразивную суспензию, с помощью мерной ложки периодически наносить ее на обрабатываемую поверхность образца в зоне ее контакта с инструментом;

- в момент окончания обработки, т. е. получения в заготовке сквозного отверстия с выходом через него инструмента, снять показания времени и занести значение продолжительности обработки (T_0) в соответствующую графу табл. 3.3. Не выключая питание преобразователя, аккуратно перемещая заготовку вниз, освободить ее от инструмента, после чего выключить питание преобразователя и ультразвукового генератора.



Рис. 3.18. Фотография процесса получения отверстия в стеклянной заготовке

8. Провести измерения геометрических параметров полученного отверстия для чего:

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

– поместить образец на измерительный стол микроскопа МИМ-5 и измерить в двух взаимно перпендикулярных направлениях диаметр отверстия, полученного на поверхности образца со стороны входа инструмента; вычислить среднее его значение ($d_{\text{вх}}$) и занести в таблицу.

– переустановить образец на противоположную сторону и измерить аналогичным образом диаметр на выходе инструмента ($d_{\text{вых}}$). Полученное значение также занести в табл. 3.3. 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 $V_{\text{и}}$. Для этого величину толщины стеклянного образца разделить на полученное значение продолжительности обработки отверстия

$$V_{\text{и}} = h/T_0, \text{ мм/мин.} \quad (3.1)$$

Вычисленное значение $V_{и}$ занести в табл. 3.3.

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 ($\Delta_{з. \text{ВХ}}$), так и на выходе ($\Delta_{з. \text{ВЫХ}}$) инструмента по следующим формулам

$$\Delta_{з. \text{ВХ}} = \frac{d_{\text{ВХ}} - d_{и}}{2};$$

$$\Delta_{з. \text{ВЫХ}} = \frac{d_{\text{ВЫХ}} - d_{и}}{2}.$$
(3.2)

Вычисленные значения ($\Delta_{з. \text{ВХ}}$ и $\Delta_{з. \text{ВЫХ}}$) занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты измерений и вычислений
при ультразвуковой обработке отверстий

Толщина заготовки, h_3 , мм	Диаметр инструмента, $d_{и}$, мм	Продолжительность обработки, T_0 , мин	Диаметр отверстия		Производительность обработки $V_{и}$, мм/мин	Величина зазора		Наличие и величина сколов	
			на входе $d_{\text{ВХ}}$, мм	на выходе $d_{\text{ВЫХ}}$, мм		на входе $\Delta_{з. \text{ВХ}}$, мм	на выходе $\Delta_{з. \text{ВЫХ}}$, мм	на входе	на выходе

Принцип работы ультразвукового ингалятора

1. Поместить штекер сетевого адаптера в разъем, находящийся в нижней части прибора. Установить прибор на ровную горизонтальную поверхность.

2. Снять крышку 2 распылительной камеры 1. Заполнить распылительную камеру 1 водой до нижней отметки.

3. Поместить стаканчик для лекарств внутрь распылительной камеры 1 и залить в него воду до верхней отметки распылительной камеры 1.

4. Установить крышку 2 на распылительную камеру 1, вставить в нее штуцер 3.

5. Включить сетевой адаптер в сеть переменного тока. При этом загорится подсветка распылительной камеры 1.

6. Включить прибор с помощью кнопки 4 (рис. 3.19).



Рис. 3.19. Фотография работы ультразвукового ингалятора

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Схема ультразвуковой установки, используемой в данной лабораторной работе.
 - 4.2. Результаты измерений и расчетов показателей ультразвуковой обработки отверстия в стеклянной заготовке.

- 4.3. Ультразвуковой ингалятор: описание и принцип работы.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы лежат в основе ультразвуковой размерной обработки хрупких материалов?
2. По какому критерию оценивается обрабатываемость материалов ультразвуковым способом?
3. Каким образом на производительность ультразвуковой размерной обработки влияют характеристики абразивной суспензии, амплитуда и частота колебаний инструмента, а также статическая нагрузка?
4. Каким образом 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 обработке и анодного растворения?
8. Из каких основных деталей и узлов состоит установка для ультразвуковой обработки отверстий в хрупких материалах?
9. Дать определение ингаляции.
10. Какие существуют схемы ультразвукового распыления?
11. Пояснить схему конструкции ингалятора типа УИИП.
12. Пояснить схему ультразвукового ингалятора с распылением жидкости в фонтане.

Литература

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

Лабораторная работа № 4

ТЕХНОЛОГИЯ БАЛАНСИРОВКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ

Цель работы

1. Изучить причины, вызывающие несбалансированность (дисбаланс) вращающихся деталей и узлов машин и приборов.
2. Изучить особенности статической и динамической неуравновешенности.
3. Изучить методы статической балансировки.
4. Изучить технологию статической балансировки.
5. Изучить технологию динамической балансировки.
6. Изучить методы определения угловой координаты дисбаланса.
7. Изучить методы измерения величины дисбаланса.
8. Изучить способы устранения неуравновешенности.
9. Получить практические навыки определения дисбаланса якоря электродвигателя и его устранения, а также статической балансировки шлифовальных кругов.

Инструменты и принадлежности

1. Установка балансировки якоря электродвигателя.
2. Подлежащие балансировке якоря электродвигателей.
3. Балансировочная паста (пластилин).
4. Приспособление для статической балансировки.
5. Оправка со шлифовальным кругом

Теоретическая часть

Общие сведения о балансировке

Балансировка представляет собой процесс, включающий комплекс технологических операций по определению и устранению (ограничению некоторыми пределами) неуравновешенности вращающихся деталей и узлов машин или приборов относительно оси их подшипников. Причинами, вызывающими несбалансированность (дисбаланс), являются отклонения вращающейся детали от

правильной геометрической формы, неоднородность материала, отступления соосности, недостатки сборки и др.

Если распределение массы детали относительно оси подшипников симметрично, то равнодействующая силовой системы обращается в ноль – это показывает, что деталь уравновешена. При этом подшипники вращающейся детали испытывают такое же давление, как и в состоянии ее покоя.

Любая вращающаяся деталь (узел) может иметь статическую или динамическую неуравновешенность или и ту, и другую одновременно. Статической неуравновешенностью принято называть несовпадение центра тяжести детали узла с осью вращения (рис. 4.1).

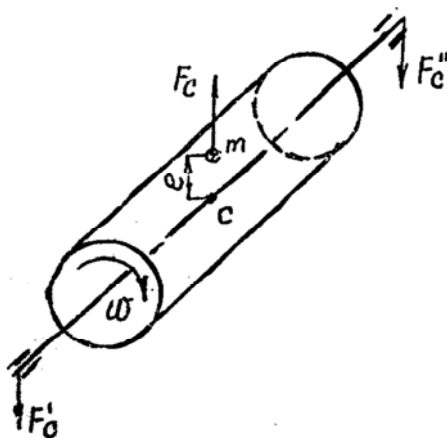


Рис. 4.1. Статическая неуравновешенность:

F_c – центробежная сила; e – смещение центра тяжести оси вращения;

ω – угловая скорость вращения ротора;

F'_c и F''_c – реакция в опорах; m – центр тяжести.

Определение места расположения лишней массы m и приведения центра тяжести детали на ось вращения называется *статическим уравновешиванием*.

Неуравновешенность, характеризующаяся неравенством нулю центробежных моментов инерции в осевой плоскости или поворотом главной центральной оси инерции относительно оси подшипников ротора, называется *динамической* (рис. 4.2).

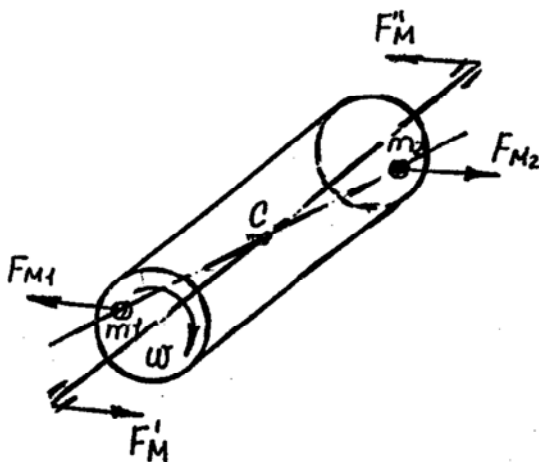


Рис. 4.2. Динамическая неуравновешенность:

F_{M1} и F_{M2} – центробежные силы;

m_1 и m_2 – неуравновешенные массы; ω – угловая скорость вращения ротора;

F_{M1}' и F_{M2}' – реакции в опорах; прямая, на которой расположены

точки m_1 и m_2 , – главная центральная ось инерции; C – центр тяжести

Такой вид неуравновешенности (рис. 4.2), не обнаруживаемый статическим способом, проявляется в виде силового момента только при большой скорости вращения ротора, т. е. в динамике.

Одновременная статическая и динамическая неуравновешенность детали или узла в общем случае может быть представлена, как результат смещения центра тяжести от оси вращения и поворота главной центральной оси инерции относительно оси подшипников (рис. 4.3).

Если деталь или узел в процессе работы вращается медленно, то выполняют только статическую балансировку; если они имеют большую скорость вращения, то производят только динамическую уравнивание, в процессе которого устраняется и статическая неуравновешенность.

Неуравновешенность ротора удобно представить в виде системы двух центробежных сил. Вставить формулу в двух заданных плоскостях, перпендикулярных к оси вращения и равнодействующей элементарных центробежных сил форм (рис. 4.4).

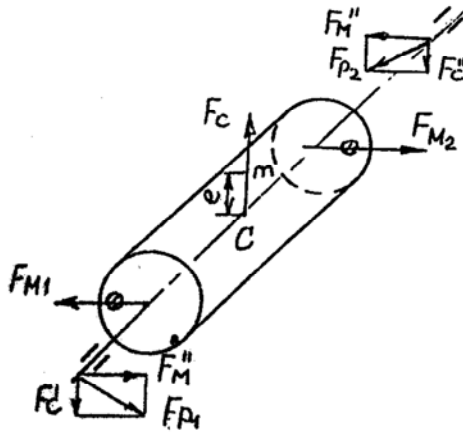


Рис. 4.3. Статическая и динамическая неуравновешенность:
 F_c – центробежная сила от статической неуравновешенности;
 F_{M1} и F_{M2} – центробежные силы в плоскостях исправления;
 F_{P1} и F_{P2} – результирующие реакции в опорах.

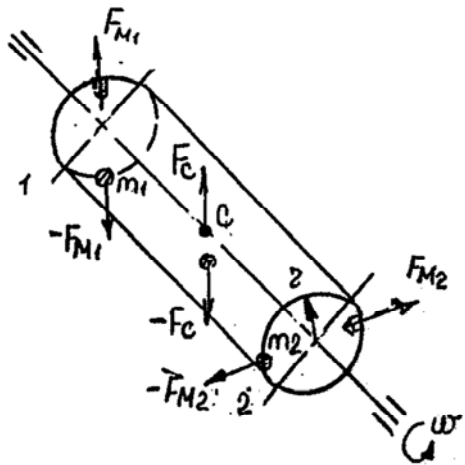


Рис. 4.4. Схема расположения сил в неуравновешенном роторе:
 $1, 2$ – плоскости исправления;
 F_{M1} и F_{M2} – центробежные силы в плоскостях исправления;
 m_1 и m_2 – неуравновешенные массы; r – радиус;
 ω – угловая скорость вращения ротора

Плоскости размещения этих сил принято называть плоскостями исправления. Устранение центробежных сил в обеих плоскостях исправления достигается уравниванием ротора, т. к. при этом исключаются причины возникновения дополнительных динамических нагрузок на подшипники.

Центробежную силу можно определить по формуле

$$F_M = \omega^2 r m,$$

где ω – угловая скорость вращения балансируемой детали;

r – радиус окружности, на которой расположены неуравновешенные массы;

m – неуравновешенная масса.

В практике балансировки за меру неуравновешенности детали или узла принимают статический момент массы, выраженный в грамм-сантиметрах (Гсм) и называемый дисбалансом d .

Дисбаланс d , отнесенный к весу G в кг уравниваемой детали, дает условное смещение центра ее массы p , выраженное в микронах:

$$p = 10 \frac{d}{G} \text{ Мк.}$$

Такой способ определения неуравновешенности позволяет сравнивать относительные величины неуравновешенности в различных деталях, а также систематизировать их по этому признаку.

Точность статического уравнивания определяется моментом трения в опорах, на которых выполняется балансировка. Точность динамического уравнивания в основном зависит от точности балансировочной машины и качества подшипников, на которых выполняют операцию уравнивания.

Статическое уравнивание

Плоскостями исправления называют плоскости перпендикулярные оси вращения, в которых путем добавления или удаления массы осуществляется компенсация неуравновешенности. При этом в качестве имеющих другие функции (нажимные шайбы, вентиляторы, коллекторы) или плоскости исправления могут создаваться специальными балансировочными кольцами.

При одной плоскости исправления ротор можно балансировать статически или динамически. При двух плоскостях исправления роторы должны балансировать только динамически. Сказанное здесь и далее о балансировке роторов в полной мере относится к якорям.

Порядок назначения меры остаточной неуравновешенности следующий. Конструктор назначает класс точности неуравновешенности в зависимости от условий работы машины. Далее, зная массу ротора (якоря), частоту вращения и назначенный класс точности по ГОСТ 12327-79, находят значение удельной неуравновешенности мкм (10^{-5} мм). Мету остаточной неуравновешенности определяют как

$$\Delta = eM = mr,$$

где Δ – мера неуравновешенности ротора;

e – удельная неуравновешенность;

M – масса ротора;

m – неуравновешенная масса;

r – радиус расположения неуравновешенной массы.

Выбирая плоскости исправления и радиус, на котором будут располагаться балансировочные грузы, следует учитывать, что при одном и том же значении mr масса груза на большем радиусе будет меньше. При двух плоскостях исправления необходимо определить допустимые остаточные неуравновешенности в плоскостях исправления I (Δ_1) и II (Δ_2), расположенных между опорами по разные стороны от центра тяжести ротора (рис. 4.5).

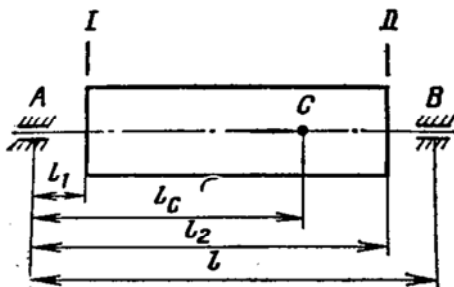


Рис. 4.5. Схема расположения плоскостей исправления ротора:

l_1 и l_2 – расстояния от левой опоры A до плоскостей исправления I и II, м;

l_c – расстояние от левой опоры A до центра тяжести ротора C, м

При симметричном расположении плоскостей исправления относительно центра тяжести $\Delta_1 = \Delta_2 = 0,5 M_e$, а при одной плоскости исправления $\Delta = M_e$.

Технология статической балансировки

Статическая составляющая неуравновешенности ротора (или какой-либо другой детали) наиболее просто выявляется и устраняется с помощью статической балансировки, для чего ротор устанавливается на стальные параллельные призмы (рис. 4.6, а) или ролики (рис. 4.6, б), поверхность которых должна иметь шероховатость не выше $R_a = 0,5$ мкм. Ширина рабочей поверхности призмы определяется по формуле:

$$A = (M / 2)d,$$

где A – ширина призмы, м;

M – масса ротора, кг;

d – диаметр шейки вала ротора, м.

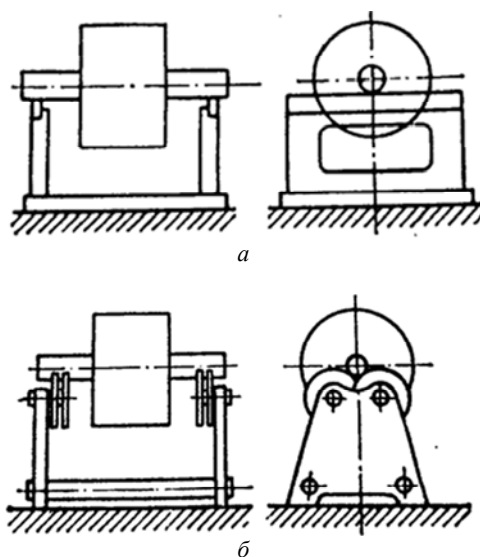


Рис. 4.6. Методы статической балансировки на стальных параллельных призмах (а) и роликах (б)

Отклонение плоскости призмы от горизонтальной плоскости не должно превышать 0,1 мм на один метр длины призмы. Если установленный на призмы ротор вывести из равновесия и предоставить ему возможность самоустановиться, то после нескольких качаний он становится «тяжелым» местом вниз. Установка уравнивающего груза должна производиться в «легком» месте, т. е. в верхней части. Масса уравнивающего груза обычно определяется опытным путем. Ротор считается отбалансированным, если он находится в состоянии безразличного равновесия.

Массу требуемого уравнивающего груза $m_{гр}$ также можно определить простым расчетом. Для этого фиксируют два положения ротора после установки его на призмах:

- 1) под действием силы тяжести неуравновешенной массы $m_{рр}$ (рис. 4.7, а);
- 2) с пробной корректирующей массой $m_{пр}$, установленной на ротор под углом 90° к легкому месту ЛМ (рис. 4.7, б). Расчет производят по формуле:

$$M_{гр} = m_{пр} / \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ – угол смещения легкого места от вертикальной оси при установке на ротор корректирующей массы $\operatorname{tg} \varphi = a / b$ (рис. 4.7, б).

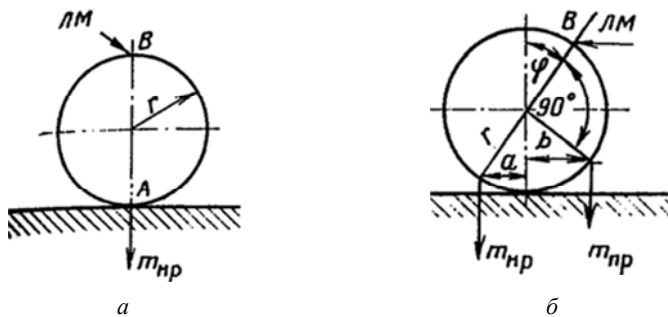


Рис. 4.7. Определение требуемой корректирующей массы при статической балансировке.

При хорошем состоянии параллельных призм может быть достигнута точность статической балансировки не более 5–10 мкм остаточного смещения центра тяжести ротора.

Технология динамической балансировки

Динамическая составляющая неуравновешенности может быть обнаружена и устранена только при вращении ротора, т. е. динамической балансировкой.

Динамическая балансировка производится на специальных балансировочных станках. В процессе ее выполнения обе стороны ротора уравниваются поочередно в указанных на чертеже плоскостях исправления. На рис. 4.8 показана простейшая схема станка для динамической балансировки.

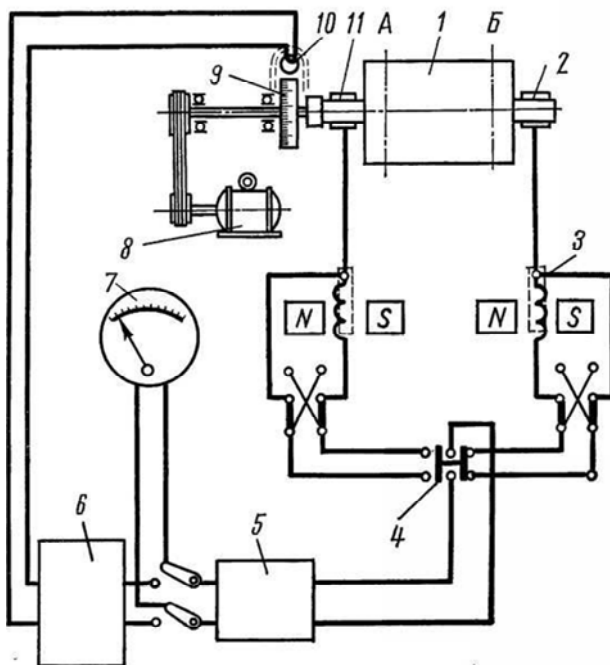


Рис. 4.8. Схема станка для динамической балансировки:

- A, B* – плоскости исправления; *1* – ротор; *2, 11* – опоры; *3* – катушки;
- 4* – переключатель; *5* – усилитель; *6* – цепь стробоскопа; *7* – стрелочный прибор;
- 8* – электродвигатель; *9* – шкала; *10* – лампочка стробоскопа

Подлежащий балансировке ротор *1* устанавливается на опоры *2* и *11*, которые могут совершать колебательное движение в плоскости, перпендикулярной оси балансируемого ротора. Ротор на опо-

рах представляет собой колебательную систему с двумя степенями свободы, имеющую два резонансных состояния: первое – ось колеблющегося ротора остается параллельной самой себе (рис. 4.9, *a*), и второе – ось ротора совершает вращательные колебания вокруг центра тяжести (рис. 4.9, *б*).

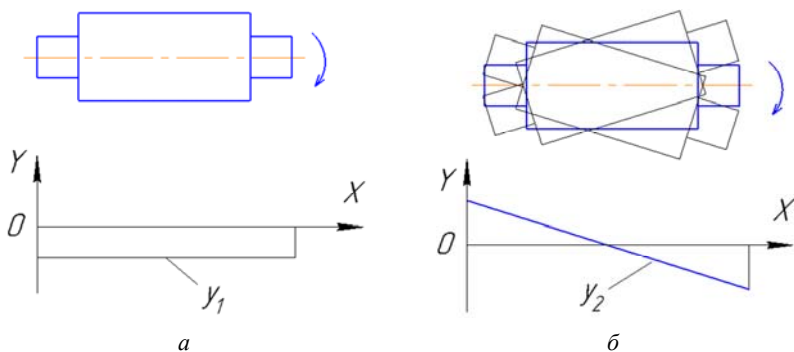


Рис. 4.9. Формы колебаний ротора в резонансном режиме:

a – ось ротора остается параллельной самой себе;

б – ось ротора совершает вращательные колебания вокруг центра тяжести

Податливость опор выбирается такой, чтобы в диапазоне масс роторов, на которые рассчитан станок, резонансные частоты вращения их составляли не более половины рабочей частоты вращения станка. Частота вращения станка обычно $500\text{--}1000 \text{ мин}^{-1}$, в зависимости от типоразмера станка, тогда как номинальная частота вращения балансируемых роторов в несколько раз больше. Так как при пониженной частоте вращения ротора центробежные силы от неуравновешенности снижаются, для того, чтобы скомпенсировать уменьшение чувствительности станка, податливость опор сильно увеличивают. Опора заметно перемещается от легкого нажатия.

Неуравновешенный ротор, приведенный во вращение от электродвигателя 8 (рис. 4.8), вызывает колебание опор. Колебания опор через тяги передаются катушкам 3 датчиков, которые перемещаются в магнитном поле. В катушках наводится ЭДС, которая пропорциональна частоте и амплитуде колебаний. Неуравновешенность ротора определяется по стрелочному прибору 7, на который через усилитель 5 подается напряжение. Это напряжение питает также цепь стробоскопа 6, лампочка 10 которого вспыхивает при каждом

обороте ротора в момент наибольшей амплитуды колебания опор. Лампа стробоскопа освещает шкалу шпинделя станка. Так как шкала освещается пульсирующим светом, частота пульсаций которого равна частоте вращения станка, создается впечатление, что шкала неподвижна относительно указателя. Записав показания стрелочного прибора и шкалы шпинделя, станок останавливают и в плоскости исправления ротора под углом, в соответствии с показаниями шкалы 9, прикрепляют корректирующий груз. Затем приводят ротор во вращение. Если остаточная неуравновешенность получается менее заданной, балансировку прекращают.

Балансируют каждую сторону отдельно. Закрепление грузов или снятие металла производят в плоскостях исправления *A* и *B*. Переключение стрелочного прибора 7 для измерения колебаний каждой из опор осуществляют переключателем 4. Высокая точность измерений, обеспечиваемая аппаратурой, и свободный допуск к любому месту ротора позволяют проводить уравнивание на станке быстро и с большой точностью, которая составляет 0,5–1 мкм остаточного смещения центра тяжести.

Определение угловой координаты дисбаланса

Наиболее распространенными методами определения угловой координаты дисбаланса являются амплитудный метод, или круговой обход пробным грузом, стробоскопический и координатный.

Амплитудный метод (круговой обход пробным грузом). Плоскости исправления выбирают на торцах ротора. Для определения угловой координаты дисбаланса в выбранных плоскостях исправления последовательно перемещают пробный груз (пластилин) по окружности ротора до получения минимальной амплитуды колебаний, возникающих в опорах, что показывает точки неуравновешенных масс. В этих точках прикрепляют груз для уравнивания. Эту операцию проводят в обеих плоскостях исправления. Указанный метод применяют при ручной балансировке и несложной механизации.

Стробоскопический метод определения угловой координаты дисбаланса ротора основан на использовании сигналов, возникающих в электромеханических датчиках под действием колебаний вращающегося ротора. Для определения местоположения дисбаланса торцовую поверхность ротора делят на 6–12 частей, обозначая их по порядку 1, 2, 3 и т. д.

При вращении балансируемого ротора в датчиках возникает гармоника напряжения, усиливающаяся в электронном усилителе. В результате получаются кратковременные периодические импульсы напряжения, повторяющиеся с частотой вращения ротора. Эти импульсы напряжения попадают на неоновую лампу, которая вспыхивает каждый раз, когда напряжение, генерируемое в катушку датчика, меняет свой знак и освещает одну и ту же точку на торце ротора. Таким образом, вспышки лампы согласованы по времени с колебаниями, вызываемыми дисбалансом ротора. Вследствие вспышек лампы одно нумерованное деление на торце ротора можно легко прочитать, т. к. оно будет казаться неподвижным и укажет угловое положение дисбаланса. Этот метод применяют при уравнивании сравнительно больших роторов.

Координатный метод. Теория динамического уравнивания жесткого ротора на машине с неподвижными опорами впервые разработана академиком А. Н. Крыловым. Он предложил координатный метод непосредственного определения места расположения дисбаланса и его величины.

Метод основан на применении фотоэлемента. В произвольном месте на торце или ободе ротора черным нитролаком наносят одну или две (под углом 90°) координатные черты (в зависимости от конструкции балансировочной машины). При вращении ротора эти метки попадают в луч света, направляемый от источника света на ротор. Отраженный световой пучок попадает на фотоэлемент, в котором возникает импульс фототока, соответствующий такому положению ротора, когда перед световым пучком проходит черная черта. В это время ток в фотоэлементе прерывается и на синусоиде появляется светящаяся координатная точка. Угол, отсчитанный от той точки до вершины синусоиды, равен углу, отсчитанному от черной точки на роторе (против направления вращения) до искомого местоположения дисбаланса. Координатный метод широко применяют в приборостроении.

Измерение величины дисбаланса

Резонансный метод основан на измерении максимальной амплитуды колебаний оси ротора, когда скорость его вращения близка или равна резонансной частоте колебаний подвижной системы балансировочной машины, т. е.

$$\Omega = \omega_{\text{рез.}}$$

Увеличение амплитуды колебаний при резонансе позволяет получить относительно высокую чувствительность даже при использовании механических и оптических измерительных устройств. Применение резонансной системы позволяет устранить вредные посторонние колебания, т. к. такая система не чувствительна к другой частоте, отличной от резонансной, т. е. является своеобразным фильтром. Отсчет производят только в момент резонанса, когда скорость вращения ротора близка к резонансной частоте колебаний подвижной системы или равна ей. Для измерения амплитуды резонанса применяют оптические и электромеханические индикаторы.

Зарезонансный метод. Соответствующий датчик колебаний, связанный с подвижной системой балансировочной машины, выдает при вращении ротора переменное напряжение, которое усиливается и подается на измерительное устройство. Колебания измеряются при зарезонансной частоте вращения ротора или, для большей чувствительности, электронный усилитель настраивают в резонанс с частотой сигнала датчика.

Этот метод является наиболее точным, т. к. дает возможность уравнивать ротор при рабочей скорости вращения и обеспечивает высокую производительность труда. Для измерения амплитуды колебаний оси ротора применяют осциллограф или электроизмерительные приборы.

Способы устранения неуравновешенности

Основными способами устранения неуравновешенности ротора являются съем лишнего материала в «тяжелом» месте и добавление груза в «легком». Съем металла можно производить фрезерованием или сверлением.

На рис. 4.10, *а, б* показаны способы фрезерования роторов вогнутой и дисковой фрезами. При фрезеровании дисковыми фрезами не всегда можно снять металл в тяжелом месте, поэтому вектор неуравновешенности раскладывается на две составляющие по заранее определенным осям исправления. При этом длина фрезерования всегда постоянна, а масса снимаемого металла определяется глубиной фрезерования.

На рисунке 4.10, *в, г* показан способ съема металла сверлением. В этом случае «лишний» металл можно снять в любой точке балансировочного кольца или тела ротора.

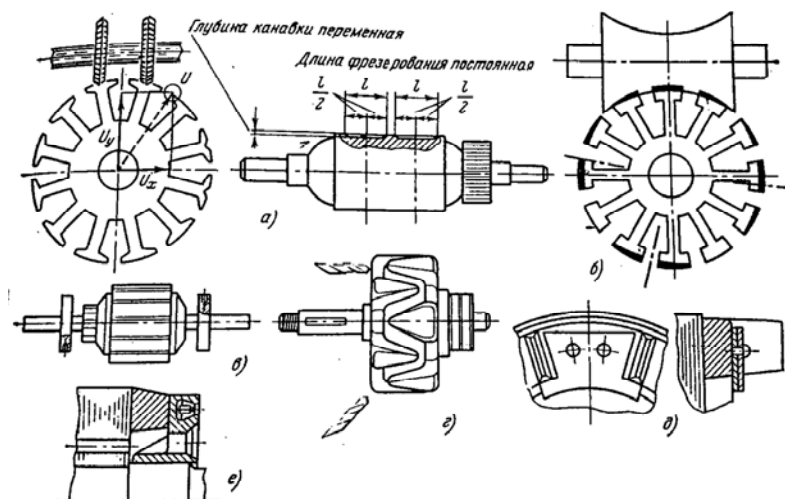


Рис. 4.10. Способы устранения неуравновешенности ротора:
а – фрезерованием дисковыми фрезами; *б* – фрезерованием вогнутой фрезой;
в – сверлением в балансировочных кольцах; *г* – сверлением в торцах ротора;
д – креплением пластин; *е* – установкой балансировочных грузов

Добавление груза в «легком» месте может выполняться различными способами. В асинхронном двигателе при отливке короткозамкнутой клетки между лопатками отливают по два выступа. На них (рис. 4.10, *д*) надевают груз-пластину с двумя отверстиями и расклепывают оси. Груз также можно крепить болтом и гайкой к вентиляционной лопатке.

В некоторых случаях (рис. 4.10, *е*) делают круговую выточку в виде ласточкиного хвоста, куда закладывается груз. После балансировки груз фиксируется винтом, который также крепится для предотвращения самоотвинчивания.

Как правило, в легких малогабаритных роторах используют способ съема металла, а в тяжелых крупногабаритных роторах – способ добавления груза. При автоматизации прессы балансировки роторов предпочтение отдают способу снятия металла.

Контроль точности уравнивания

При динамическом уравнивании ротора и устранении дисбаланса возникают как систематические, так и случайные погрешности. Систематические погрешности зависят, в основном, от точности настройки балансировочной машины и точности устранения дисбаланса. Случайные погрешности являются следствием воздействия посторонних помех, несовершенства устройства для точного отсчета величины и места дисбаланса, а также средств устранения дисбаланса.

В ряде случаев динамическое уравнивание роторов необходимо выполнять в собранных узлах. Такое уравнивание повышает точность балансировки, т. к. при этом учитываются погрешности изготовления корпуса (кожуха) и сборки рабочих подшипников, нагрев ротора, прогиб оси и т. п. Установлено, что смена шарикоподшипников после балансировки вносит новый дисбаланс. Даже снятие и установка одних и тех же шарикоподшипников после балансировки может вызвать дисбаланс, выходящий за допустимые пределы, поскольку при повторном монтаже почти невозможно установить подшипники с необходимой точностью и той же посадкой.

При динамическом уравнивании роторов в собранных узлах не нужно применять специальное приводное устройство для вращения ротора, что уменьшает погрешности, вносимые приводом.

В серийном производстве балансировка роторов в корпусах дает возможность устранять погрешности предыдущих операций, а также осуществлять контроль качества балансировки в условиях, близких к эксплуатационным.

Для определения места расположения дисбаланса в закрытых роторах, осуществления уравнивания и устранения дисбаланса в корпусах должны быть технологические отверстия. При удалении лишнего металла высверливанием необходимо применять стружкоотсасывающее устройство. Неуравновешенность роторов, отбалансированных в закрытом корпусе, часто устраняют ввинчиванием или вывинчиванием балансировочных винтов, расположенных в соответствующих местах на торце ротора.

Динамическое уравнивание роторов, имеющих большую скорость вращения, осуществляется в два этапа:

- 1) предварительное динамическое уравнивание при пониженных числах оборотов;

2) окончательное уравнивание в собранном узле при рабочей скорости вращения.

Такая балансировка повышает точность уравнивания роторов и предотвращает повреждение роторных подшипников в процессе уравнивания. Балансировка ротора при высокой скорости вращения на рабочих подшипниках, в случае большого дисбаланса, может привести к повреждению подшипников. Для достижения более высокой точности динамического уравнивания роторов приборов и машин и повышения производительности труда применяют автоматические балансировочные машины. В этих машинах автоматически измеряются величины дисбаланса и его угловые координаты, последовательно или параллельно устраняется дисбаланс. При последовательном проведении процесса уравнивания излишний металл удаляется после срабатывания измерительных устройств; при параллельном – на одной позиции балансировочной машины измеряются величины и определяются места расположения дисбаланса, а на второй позиции в это время устраняется дисбаланс импульсным электроискровым методом. Частота импульсов равна частоте вращения ротора. На рис. 4.11 дана схема устройства для автоматического уравнивания роторов.

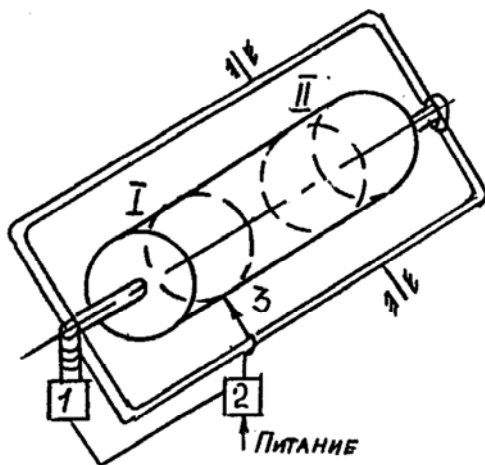


Рис. 4.11. Схема устройства для автоматического уравнивания роторов:
1 – чувствительный элемент; 2 – электронный преобразователь;
3 – рабочий электрод

Сигнал, снимаемый с чувствительного элемента 1 электромеханического датчика, усиливается и формируется в электронном преобразователе 2, а затем подается в виде импульсов напряжения на рабочий электрод 3, установленный против плоскости исправления *I*. В соответствии с этим при вращении ротора лишний металл с его поверхности удаляется импульсами. Т. к. частота импульсов равна частоте вращения ротора, то металл удаляется из одной определенной точки поверхности ротора.

Описание экспериментальных установок

Установка динамической балансировки якоря электродвигателя

На рис. 4.12 приведена фотография общего вида установки, предназначенной для динамической балансировки якоря электродвигателя.

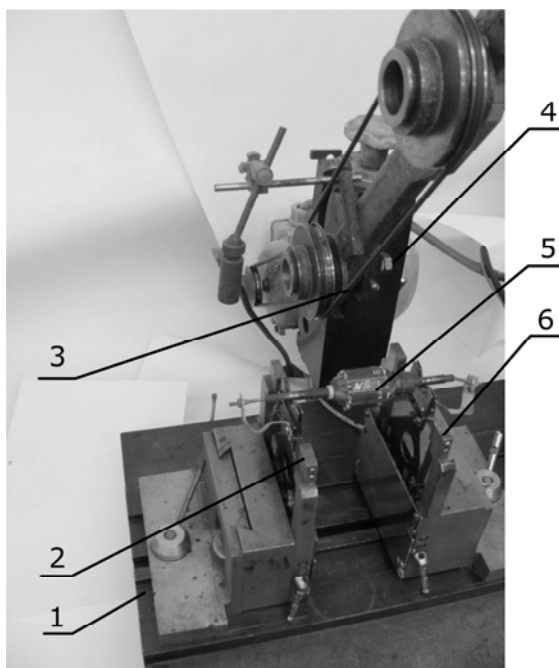


Рис. 4.12. Фотография общего вида установки для динамической балансировки якоря электродвигателя:

1 – основание; 2, 6 – опоры; 3 – смычковый привод; 4 – стойка; 5 – якорь

Принцип ее работы аналогичен установке, схема которой приведена на рис. 4.8. Она состоит из массивного основания 1, на котором смонтированы неподвижные опоры 2, 6 с призматическими установочными элементами. На эти элементы устанавливается испытуемый якорь 5 (рис. 4.13) и приводится во вращение с помощью смычкового привода 3, смонтированного на стойке 4.



Рис. 4.13. Фотография испытуемого якоря электродвигателя

Вращение неуравновешенного ротора вызывает колебания опор, которые через тяги передаются катушкам, помещенным в магнитное поле. В катушках наводится ЭДС, которая пропорциональна частоте и амплитуде этих колебаний. Неуравновешенность ротора определяется по приборам, установленным на пульте управления (рис. 4.14).

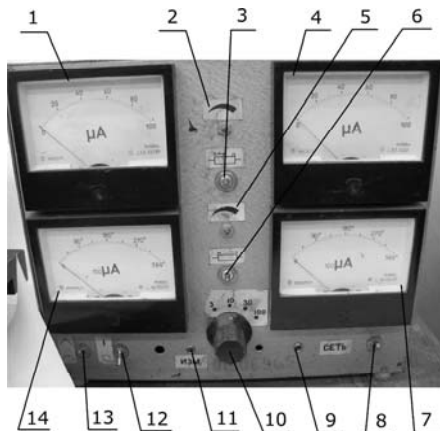


Рис. 4.14. Фотография панели пульта управления установкой:
 1, 4, 7, 14 – измерительные приборы; 2, 5 – ручки потенциометров чувствительности; 3, 6 – ручки потенциометров разделения плоскостей коррекции; 8 – тумблер включения сети; 9 – светодиод включения сети; 10 – переключатель чувствительности; 11 – светодиод измерения; 12 – тумблер цвета метки; 13 – тумблер

Приспособление для статической балансировки шлифовального круга

На рис. 4.15 приведена фотография общего вида приспособления, предназначенного для статической балансировки шлифовального круга.



Рис. 4.15. Фотография общего вида приспособления для статической балансировки шлифовального круга:

1 – основание; 2 – неподвижные опоры; 3 – призматические установочные элементы; 4 – испытуемый шлифовальный круг

Приспособление состоит из массивного основания 1, на котором смонтированы неподвижные опоры 2 с призматическими установочными элементами 3. На эти элементы устанавливается оправка с испытуемым шлифовальным кругом 4. На шлифовальный круг наклеивается градуированная круговая шкала 5, а на основание приспособления неподвижно устанавливается указатель 6 (рис. 4.16).



Рис. 4.16. Фотография зоны фиксирования положения шлифовального круга:
4 – испытуемый шлифовальный круг; 5 – градуированная круговая шкала;
6 – указатель

Порядок выполнения работы

Динамическая балансировка якоря электродвигателя

1. Установить якорь на призму основания.
2. Включить пульт тумблером «Сеть». При этом должен загораться светодиод. Включить автомат питания двигателя на станине станка.
3. Опустить рычаг смычкового привода и привести якорь во вращение.
4. Снять показания индикаторов величин дисбаланса.
5. Поднять рычаг смычкового привода после окончания режима «измерения» и снять якорь.
6. По показаниям индикаторов величин и углов дисбаланса определить место установки груза и их примерную массу. Отсчет углов на якоре производить от метки против часовой стрелки, располагая якорь вентилятора к себе.
7. Нанести балансировочный пластилин на место, определенное в предыдущем пункте. Пластилин тщательно прижать к обмотке якоря.
8. Повторить изменения по пп. 2, 3, 4.
9. Если показания индикаторов величины дисбаланса превышают допустимые значения $U_{\text{доп1,2}}$, балансировку повторить. При прежних углах дисбаланса пластилин добавить на те же места; при изменении угла дисбаланса на противоположный количество пластилина уменьшится. Якорь считается сбалансированным, когда показания величины дисбаланса меньше допустимой. При значительном дисбалансе (более 90 делений при крайнем правом положении переключателя «Чувствительность») необходима шлифовка пакета якоря.

Статическая балансировка шлифовального круга

Статическая балансировка может осуществляться двумя способами:

- по принципу принудительного вращения;
- по принципу гравитационной устойчивости тела качения.

Статическая балансировка по принципу принудительного вращения:

1. Закрепить шлифовальный круг на оправке (рис. 4.17).



Рис. 4.17. Фотография шлифовального круга на оправке

2. В учебных целях прикрепить груз к наружной поверхности шлифовального круга, т. е. искусственно придать ему неуравновешенность (рис. 4.18).



Рис. 4.18. Фотография круга с искусственно созданной неуравновешенностью

3. Оправку с кругом установить на призмы и вручную придать кругу вращение. В конечном итоге круг займет положение «тяжелой» точкой вниз (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Фотография приспособления для статической балансировки круга

4. В месте, противоположном изначально установленному грузу, прикрепить пластилин.

5. На пластилин установить второй груз, приблизительно равный первоначальному (рис. 4.20).

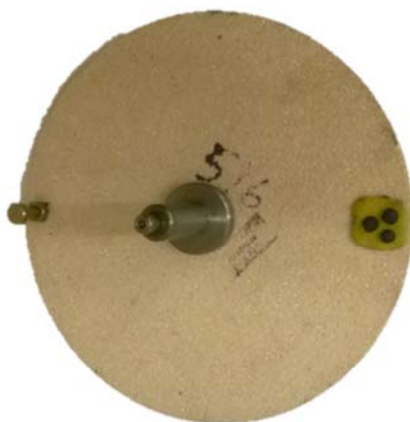


Рис. 4.20. Фотография с установленным вторым грузом

6. Произвести ряд вращений круга вручную и убедиться, что оправка со шлифовальным кругом останавливается в различных положениях, что свидетельствует об уравновешенности круга (рис. 4.21).

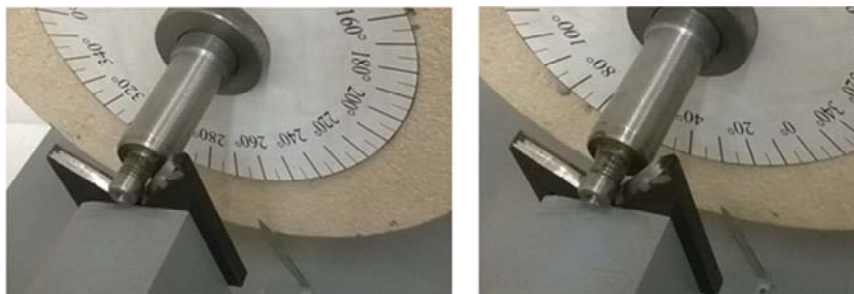


Рис. 4.21. Фотографии различных положений круга, что говорит о его уравновешенности

Статическая балансировка по принципу гравитационной устойчивости тела качения:

1. Закрепить шлифовальный круг на оправке (рис. 4.22).



Рис. 4.22. Фотография шлифовального круга на оправке

2. В учебных целях прикрепить груз к наружной поверхности шлифовального круга, т. е. придать ему искусственно неуравновешенность (рис. 4.23).



Рис. 4.23. Фотография круга с искусственно созданной неуравновешенностью

3. Оправку с кругом установить на направляющие станка, после чего с помощью ручки опустить направляющие в нижнее положение (рис. 4.24). В результате гравитационной неуравновешенности круг начнет поворачиваться и в конечном итоге займет положение «тяжелой» точкой вниз.

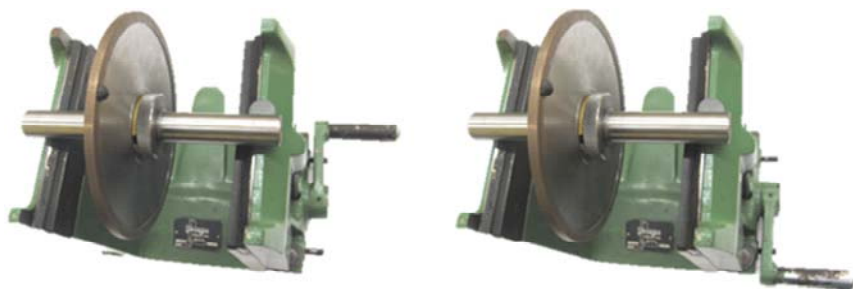


Рис. 4.24. Приспособление для статической балансировки кругов

4. Установить второй груз приблизительно равной массы в месте противоположном изначально установленному грузу (рис. 4.25).

5. Произвести ряд легких толчков и убедиться, что оправка со шлифовальным кругом останавливается в различных положениях, что свидетельствует об уравновешенности круга (рис. 4.26).



Рис. 4.25. Фотография с установленным вторым грузом

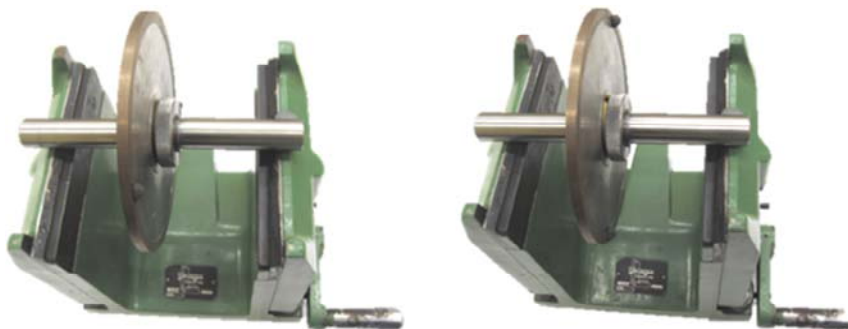


Рис. 4.26. Фотографии различных положений круга

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Схема установки динамической балансировки якоря электродвигателя. Результаты выполненной работы.
 - 4.2. Схемы приспособлений статической балансировки шлифовального круга. Результаты выполненной работы.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение статической и динамической неуравновешенности.
2. Какие детали и узлы уравнивают статическим методом? Какие динамическим?
3. Какие плоскости называют плоскостями исправления?
4. Каким образом выполняется статическая балансировка?
5. Каким образом осуществляется динамическая балансировка?
6. Назовите методы определения угловой координаты дисбаланса.
7. Какие методы используются для измерения величины дисбаланса?
8. Какие способы применяются для устранения неуравновешенности?
9. Каким образом работает устройство для автоматического уравнивания роторов?

Лабораторная работа № 5

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МЕДИЦИНСКИХ ЭНДОСКОПАХ

Цель работы

1. Изучить устройство и принцип работы медицинских эндоскопов с волоконной оптикой.
2. Изучить механические системы управления эндоскопом.
3. Изучить способы изготовления стеклянных и полимерных световодов, а также волоконно-оптических жгутов.
4. Получить практические навыки применения эндоскопов с волоконной оптикой для исследования состояния внутренних полостей.

Инструмент и принадлежности

1. Эндоскоп с волоконной оптикой.
2. Макет исследуемой внутренней полости.
3. Набор объектов исследования.

Теоретическая часть

Основные сведения о медицинских эндоскопах с волоконной оптикой

Одним из важнейших методов диагностики и лечения различных заболеваний является *эндоскопия*. С помощью эндоскопической техники проводятся визуальный осмотр внутренних полостей организма человека, биопсия, хирургическое и терапевтическое воздействие на биологические ткани лазерным излучением, промывание полости и наполнение ее воздухом или жидкостью, введение лекарственных растворов, удаление новообразований и инородных тел и т. д. Кроме визуального наблюдения, может проводиться фото- и ТВ-документирование отдельных этапов эндоскопии.

В общем случае *эндоскопом* (от греч. “endon” – внутри и “skopeo” – смотрю, рассматриваю, наблюдаю) называется устройство, имеющее осветительную, наблюдательную системы и приспособления.

Это устройство предназначено для введения во внутренние полости тела человека машин и механизмов с целью осмотра и проведения различных манипуляций.

Все эндоскопы делятся на два больших класса: технические и медицинские. *Медицинским* эндоскопом называется эндоскоп, вводимый во внутренние полости и органы человека через естественные каналы или хирургическим путем.

Несмотря на разнообразие гибких медицинских эндоскопов большинство из них строятся по типовой схеме, представленной на рис. 5.1, с разделением оптического канала передачи изображения на компоненты 4, 5, 6 и осветительного канала на компоненты 2, 3.

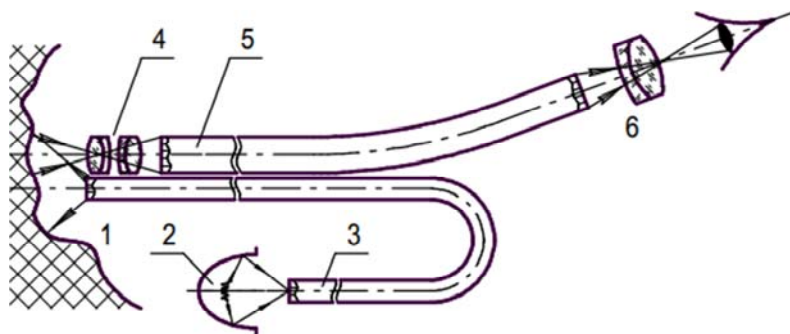


Рис. 5.1. Типовая схема гибкого медицинского эндоскопа:
1 – исследуемый объект; 2 – источник света; 3 – волоконный осветительный световод; 4 – объектив эндоскопа; 5 – гибкий волоконный световод для передачи изображения; 6 – окуляр

Исследуемый объект 1 освещается источником света 2 при помощи гибкого осветительного световода 3. Объектив 4 эндоскопа строит изображение исследуемого объекта на входном торце волоконного жгута с регулярной укладкой волокон 5, который переносит изображение на выходной торец. Изображение рассматривается при помощи окуляра 6.

В общем виде гибкий эндоскоп (рис. 5.2) представляет собой гибкую протяженную трубку I, соединенную с корпусом II, который служит рукояткой для удержания прибора при эксплуатации; на корпусе установлен окуляр III. Гибкий кабель IV через разъем V соединяет эндоскоп с внешним источником света, воздуха и воды.

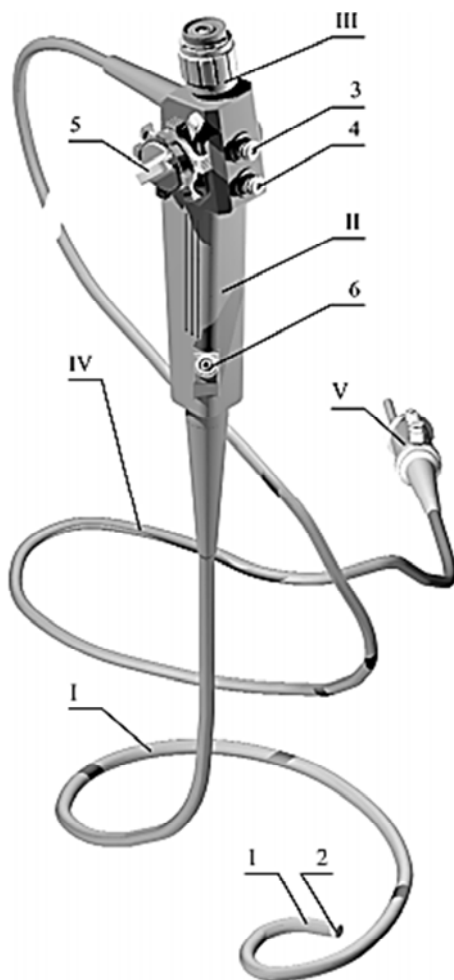


Рис. 5.2. Общий вид гибкого медицинского эндоскопа с волоконной оптикой:

- I* – гибкая рабочая часть; *II* – корпус; *III* – окуляр;
- IV* – соединительный кабель; *V* – разъем осветителя;
- 1* – управляемый дистальный конец; *2* – головка; *3* – кнопка подачи воды и воздуха; *4* – кнопка управления аспирацией; *5* – ручки управления дистальной частью; *6* – вход инструментального канала

Дистальный конец *I* рабочей части *I* при помощи ручек управления *5* может принудительно изгибаться под разными углами в одной

или двух плоскостях, благодаря чему осуществляются введение прибора и последовательный осмотр участков исследуемой полости.

Внутри гибкой рабочей части расположены основные функциональные системы прибора: каналы передачи изображения и света, воздуха и воды, канал *б* для проведения гибких инструментов, который используется также для аспирации содержимого полости при исследовании. Каналы имеют выход через головку *2* дистальной управляемой части *I*.

В корпусе *II* монтируются механические системы управления изгибом дистальной части, подачей воздуха, воды и аспирацией.

Рабочая часть снаружи покрыта эластичными оболочками, обеспечивающими нетравматичное проведение прибора по анатомическому каналу и защищающими от попадания влаги во внутренние коммуникации эндоскопа.

Основой гибкого эндоскопа является оптическая система передачи изображения, состоящая из установленного в головке *2* объектива и гибкого жгута из регулярно уложенных стеклянных нитей, проложенного внутри гибкой части *I*, а также окуляра *III*, с помощью которого рассматривается получаемое после оптического жгута изображение с некоторым увеличением.

Необходимый для осмотра внутренней полости уровень освещения обеспечивается передачей света через гибкий стекловолоконный световод, проложенный внутри гибкой части эндоскопа и переходящий в кабель *IV*; последний с помощью стандартного разъема *V* присоединяется к внешнему источнику света. Через кабель от источника также подаются необходимые для проведения исследования воздух и вода, переключение которых производится с помощью установленной на корпусе кнопки *3*; аналогичная кнопка *4* служит для управления аспирацией содержимого полости.

Механические системы управления эндоскопом

Для расширения функциональных возможностей эндоскопа и улучшения его оптико-механических характеристик в нем используются различные механизмы управления, основными из которых являются (рис. 5.3):

– механизм ориентации, предназначенный для управления направлением наблюдения за счет изгиба дистального конца эндоскопа при помощи рукояток управления; в зависимости от модели эндо-

скопа, обзор может осуществляться в одной плоскости (вверх – вниз) либо в двух (вверх – вниз, вправо – влево);

- окуляр эндоскопа, имеющий механизм диоптрийной регулировки;

- механизм юстировки входного торца осветительного жгута эндоскопа относительно оси оптической системы осветителя, предназначенный для обеспечения максимальной освещенности исследуемого объекта.

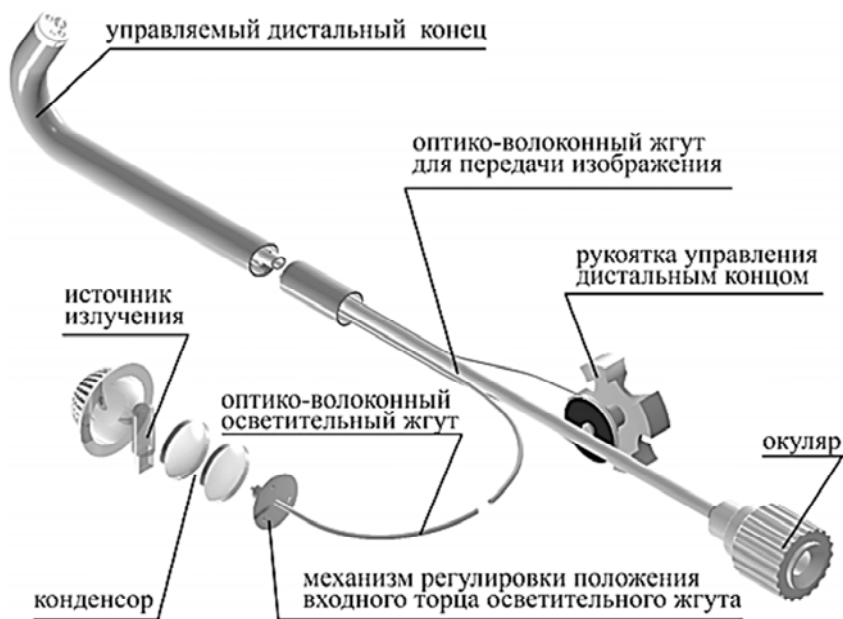


Рис. 5.3. Оптико-механическая схема эндоскопа

Конструкции гибкой части эндоскопа

Для обеспечения возможности изменить направление наблюдения в процессе исследования гибкие эндоскопы имеют управляемый дистальный конец, который может изгибаться от своего первоначального положения на некоторый угол (рис. 5.4). В некоторых моделях угол изгиба может превышать 200° .

Необходимо обеспечить плавную и легкую управляемость дистального конца эндоскопа (рис. 5.5).

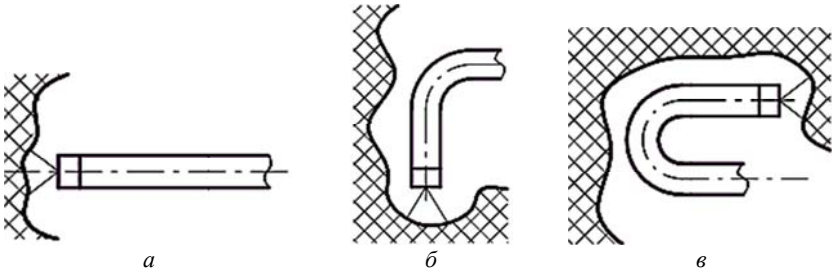


Рис. 5.4. Положение дистального конца эндоскопа в процессе исследований:
a – исходное положение дистального конца эндоскопа;
б – дистальный конец эндоскопа изогнут вниз на 90°;
в – дистальный конец эндоскопа изогнут вверх на 180°

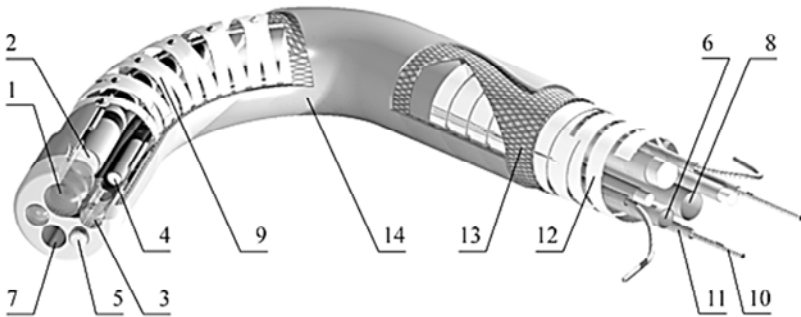


Рис. 5.5. Дистальный конец гибкого эндоскопа:
 1 – объектив; 2 – регулярный жгут для передачи изображения;
 3 – линза осветительного канала; 4 – осветительный жгут; 5 – форсунка;
 6 – полимерная трубка для подачи жидкости или воздуха;
 7 – канал для введения хирургического инструмента; 8 – полимерная трубка;
 9 – гибкие сочленения; 10 – тонкие металлические тросы управления;
 11 – боудены (спиральные пружины из проволоки, навитые вплотную)

Дистальный управляемый конец эндоскопа крепится к тубусу.

Тубусы современных гибких медицинских эндоскопов представляют собой многослойную конструкцию, состоящую из одной (рис. 5.6) или нескольких (до трех) спиральных ленточных пружин 1, поверх которых надета металлическая плетенка 2, соединенная с наружной пластмассовой оболочкой 3. Такая конструкция позволяет получить тубусы высокой степени прочности на поперечное сжатие и смятие при необходимой жесткости на изгиб и кручение.

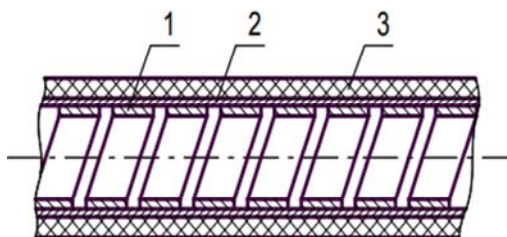


Рис. 5.6. Продольный разрез наружной оболочки (тубуса) гибкого медицинского эндоскопа:

- 1 – спиральная ленточная пружина; 2 – металлическая плетенка;
3 – пластмассовая оболочка

При эндоскопии различных органов человека большое значение имеют оптимальные жесткостные характеристики тубусов гибких эндоскопов, так как от них в определенной степени зависит возможность проведения эндоскопического исследования. Малая жесткость на изгиб может не позволить ввести эндоскоп в физиологический канал или затруднит проведение исследований в связи с плохой управляемостью. Изображение объекта, наблюдаемого через гибкий эндоскоп, не должно быть повернуто относительно объекта более чем на $\pm 15^\circ$, что обеспечивается требуемой жесткостью на кручение.

Тубусы медицинских эндоскопов имеют два типа конструкции: с пластмассовой оболочкой, насаженной на металлическую плетенку, в свою очередь, надетую на одинарную (тип I), двухслойную или трехслойную спиральную металлическую оболочку (тип II).

Тубусы с одинарной спиральной оболочкой широко распространены в гибких эндоскопах для исследования верхних отделов пищеварительного тракта человека. Для исследования нижних отделов пищеварительного тракта применяются в основном тубусы с трехслойной спиральной оболочкой, что обусловлено повышенными требованиями по жесткости тубуса колоноскопов на кручение. Эти повышенные требования обеспечиваются с помощью тройной спиральной оболочки, составленной из спиралей с разным направлением навивки. В настоящее время существует множество вариантов гибких сочленений управляемой части эндоскопа:

I способ. Пластмассовая оболочка раздувается воздухом и надевается на металлическую плетенку, внутрь которой вставлена оболочка из спиральной пружины с натягом по диаметру.

II способ. Пластмассовая оболочка наносится на металлическую плетенку методом экструзии. При этом материал оболочки проникает в промежутки между элементами металлической плетенки и тем самым обеспечивает их хорошее сцепление.

III способ. Пластмассовая оболочка раздувается воздухом и надевается на металлическую плетенку со спиральной оболочкой с небольшим натягом, а затем внутрь оболочки, установленной вертикально, свободным истечением проливают растворитель в количестве, равном внутреннему объему тубуса. В процессе испарения растворителя происходят усадки набухшего полимера оболочки и снятие внутренних напряжений, возникающих в оболочке при ее экструзии. Это приводит к плотному облепанию металлической плетенки и проникновению полимера в ее ячейки.

Механизм управления гибкой частью эндоскопа

Для управления гибкой частью эндоскопа используются различные механизмы, наиболее распространенные из которых представлены на рис. 5.7.

Для отклонения дистального конца *1* в нужном направлении (рис. 5.7, *а*) вращательное движение рукоятки *2* с зубчатым колесом *3* преобразовывается в поступательное перемещение зубчатых реек *4*, с которыми связаны гибкие тяги-тросы *5*. Эти тяги проходят через гибкие оболочки *6*, сочленение *7* и другим концом крепятся к объективной части. При вращении рукоятки *2* с зубчатым колесом *3* зубчатые рейки *4* перемещаются в противоположные стороны, натягивая одну и отпуская другую тягу *5*. За счет разности усилий дистальный конец с гибким сочленением поворачивается в сторону с большим усилием тяги.

В ряде современных гибких эндоскопов вращательное движение зубчатого колеса преобразовывается в поступательное движение тяг-тросов при помощи цепной передачи *8* (рис. 5.7, *б*).

В эндоскопах с малогабаритными механизмами управления на одной оси с рукояткой (рис. 5.7, *в*) устанавливается шкив *9*. Для задания пространственного положения гибкого сочленения одна группа тяг с помощью рукоятки наматывается на шкив, а другая с него сматывается. За счет изменения длины тяг гибкое сочленение изменяет свою траекторию независимо от длины гибкой части и кривизны ее изгиба.

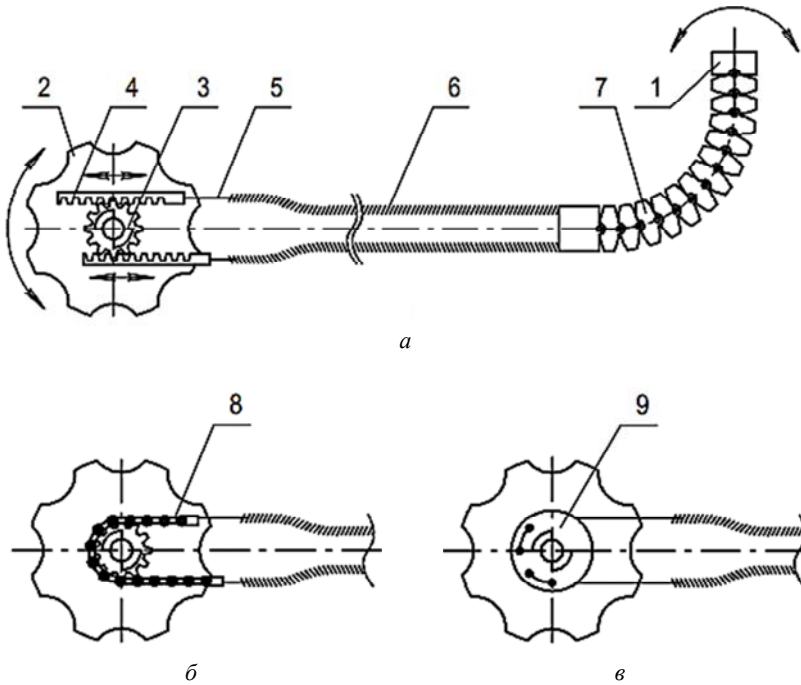


Рис. 5.7. Схемы управления дистальным концом эндоскопа:

- a* – с реечной передачей; *б* – с цепной передачей; *в* – со шкивом;
 1 – дистальный конец; 2 – рукоятка; 3 – зубчатое колесо; 4 – зубчатые рейки;
 5 – тяги-тросы; 6 – гибкие оболочки; 7 – сочленение;
 8 – цепная передача; 9 – шкив

При необходимости отклонения дистального конца не в одной, а в разных плоскостях требуется усложнение механизма управления, который содержит не одну рукоятку управления, а две соосно расположенные. Каждая из рукояток управляет натяжением своей пары тросов, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, тем самым обеспечивая отклонение дистального конца в различных направлениях.

Распространение света в оптических волокнах и волоконно-оптических пучках

Распространение света в оптических волокнах основано на явлении полного внутреннего отражения, которое состоит в том, что

луч, распространяющийся в среде и падающий на границу ее раздела с оптически менее плотной средой, частично проходит в эту среду (испытывает преломление) лишь при углах падения меньших критического, называемого *углом полного внутреннего отражения*. Для углов падения больших критического преломление не наблюдается, а происходит внутреннее отражение луча. В случае оптического волокна луч испытывает многократное внутреннее отражение на границе раздела сердцевины волокна с показателем преломления n_c и его оболочки, имеющей меньший показатель преломления $n_o < n_c$, благодаря этому луч не выходит за пределы сердцевины (рис. 5.8).

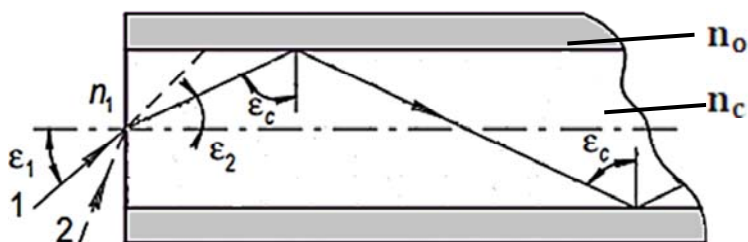


Рис. 5.8. Прохождение луча вдоль прозрачного цилиндра с плоским торцом

Совокупность волокон образует волоконно-оптические пучки или жгуты, которые могут иметь регулярную (когерентную) и нерегулярную укладку. Пучки с регулярной укладкой используются для передачи изображения, а с нерегулярной – для освещения. Важной характеристикой пучков с регулярной укладкой является их разрешающая способность, которая зависит от диаметра волокон и способа их укладки. Возможны квадратная и гексагональная укладки волокон (рис. 5.9).

Гексагональная укладка является более плотной, поэтому обеспечивает более высокую разрешающую способность. Так как единичное волокно дает на своем выходе равномерное распределение интенсивности света, независимо от характера распределения интенсивности на входе, то волоконно-оптический пучок производит дискретизацию изображения с периодом дискретизации, равным шагу Ш укладки волокон. Если рассматривать через волоконно-оптический пучок тестовое изображение, состоящее из параллельных линий, максимальное количество линий на единицу длины

(пространственная частота) v_{\max} , при котором линии на выходе пучка будут различимы, будет представлять собой разрешающую способность пучка, выраженную в линиях на единицу длины.

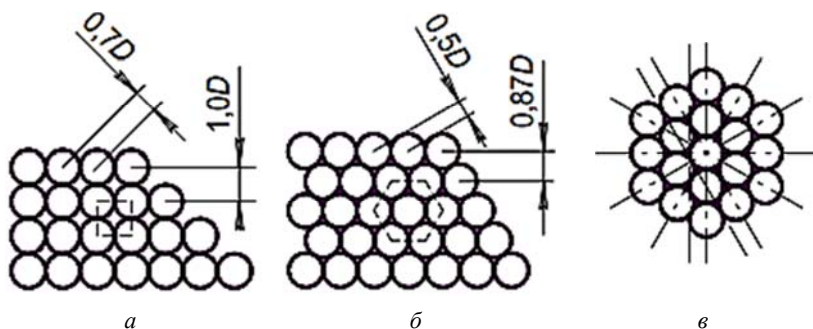


Рис. 5.9. Элементарные периоды для трех топологий укладки волокон в пучке:
a – квадратная; *б* – гексагональная горизонтальная;
в – гексагональная вертикальная

Основные элементы эндоскопов с волоконной оптикой. Волоконно-оптические жгуты

Волоконно-оптические жгуты, наиболее часто используемые в приборостроении, имеют диаметры от 0,5 до 400 мм и длину от 0,5 до 4000 м и более.

В зависимости от способа изготовления жгуты с регулярной укладкой могут иметь площадь дефектов от 0,001 до 1 %. Эти жгуты допускают многократный изгиб с радиусом, равным 5–8 диаметрам жгута. Общее число жил в жгуте составляет 14 000–25 000.

Обычно осветительный жгут, применяемый в эндоскопах, раздваивается на два жгута, дистальные концы которых располагаются симметрично относительно жгута, передающего изображение (рис. 5.10, *a*). Однако миниатюризация эндоскопов, используемых, например, в офтальмологии, вызвала разработку системы «осветительный жгут–разрешающий жгут» в виде коаксиальных кольца и цилиндра (рис. 5.10, *б*).

Диаметр разрешающего жгута с регулярной укладкой волокон может достигать 0,3–0,5 мм, а длина жесткой спеченной части (как кольца, так и цилиндра) – от нескольких миллиметров до десятков сантиметров.

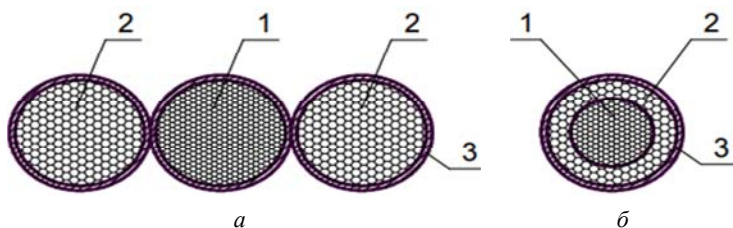


Рис. 5.10. Расположение осветительного и передающего изображение жгутов в эндоскопах:
a – традиционное; *б* – коаксиальное;
 1 – жгут, передающий изображение; 2 – осветительный жгут;
 3 – металлические втулки

Осветительный жгут, применяемый в жестких эндоскопах, обычно имеет разъем у эндоскопа. В гибких эндоскопах и, особенно, в фото-, кино- и телеэндоскопах осветительный жгут представляет неразрывное целое с эндоскопом и не имеет разъемов. Обычно длина жгута от осветительного блока до эндоскопа лежит в пределах от 1,4 до 1,8 м, а общая длина жгута больше на длину самого эндоскопа. Над производством осветительных жгутов работает более 40 фирм, выпускающих почти 2000 различных типов жгутов, отличающихся длиной, сечением, оболочкой и наконечниками. Выпускаются жгуты и с разветвлением на входе, подключаемые к двум конденсорам с целью максимального использования светового потока от источника излучения. Осветительные жгуты имеют круглую или прямоугольную форму сечения входного торца, что дает возможность обеспечить соответствие сечения жгута форме тела накала источника света. На промежуточных разъемах торцы жгутов круглые, что упрощает конструкцию разъема, исключая закручивание жгута.

Либо выходной торец жгута размещается сбоку объектива, а ось выхода жгута направлена на центр рассматриваемого объекта, либо выходной конец объектива делится на две части (рис. 5.10, *a*), либо волокна жгута располагаются кольцом вокруг объектива (рис. 5.10, *б*). Первый способ освещения обеспечивает лучшее наблюдение рельефа, так как создает тени и блики от неровностей поверхностей, последний же создает равномерное освещение, но изображение менее рельефно.

Защитные оболочки жгутов предназначены для предохранения волокон от разрушения при перегибах, закручивании, сплющивании, от разрыва и проникновения влаги. Кроме того, оболочка

должна обладать высокой гибкостью, быть достаточно легкой, чтобы жгут не оттягивал руку врача, удерживающего эндоскоп. Существует множество конструкций оболочек, например, металлические спирали (плоские и фасонные), для предотвращения закручивания одеты в металлическую сетку, а для герметичности – в наружную резиновую или латексную оболочку и др.

Наконечники служат для соединения жгута с осветительным блоком и со световодом эндоскопа. Известно более 80 типов наконечников жгутов и почти столько же типов гнезд к ним. Разнообразие типов наконечников пока не обеспечивает взаимозаменяемость жгутов, выпускаемых различными фирмами. Наконечники обеспечивают прочность соединения, точность совпадения торцов жгута с изображением тела накала источника света и с торцом световода эндоскопа. Через наконечник жгут своими концами соединен с гибкой оболочкой. Для предотвращения облома волокон в месте перехода жесткого наконечника к гибкой части применяются смягчители (обычно резиновые или пластмассовые трубки, охватывающие оболочку и утончающиеся с удалением от наконечника).

Изготовление волоконно-оптических жгутов. Материал для изготовления световодов

Световоды изготавливают из оптического стекла и полимерных материалов. Наибольшее распространение получили световоды из оптического стекла, так как они имеют высокую оптическую однородность и механическую прочность.

Процесс изготовления световодов связан с одновременным формированием жилы и оболочки из разогретой до пластического состояния стекломассы. Поэтому стекло, используемое для жилы, и стекло для оболочки должны быть химически и технологически совместимы.

Химически совместимыми считаются стекла, у которых на поверхности спекания при температуре выработки не образуются кристаллы, не нарушается поверхность раздела при появлении пузырьков и диффузии ионов. Отмеченные дефекты приводят к резкому увеличению рассеяния света и уменьшению отражательной способности на границе жила-оболочка.

Технологически совместимыми являются стекла, имеющие в диапазоне температур от 20 °С до температуры спекания близкие значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР),

а также одинаковые вязкости при температуре выработки. Увеличение разности ТКЛР у пары стекол жила-оболочка выше $(2-3) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ приводит к появлению в пограничном слое натяжений, трещин и отслоений, в процессе как изготовления, так и эксплуатации световодов.

Технологический процесс варки стекол для световодов волоконной оптики принципиально не отличается от процессов варки бесцветных оптических стекол. Его особенностями являются применение для составления шихты особо чистых материалов и создание условий, не допускающих попадание в стекло загрязнений из окружающей среды и аппаратуры варочных устройств.

В качестве материала жилы волоконных элементов, работающих в инфракрасной области спектра, используют бескислородные стекла.

Световоды без оболочки хорошо вытягиваются из кварца. Они имеют высокую однородность и прозрачность в видимой и ультрафиолетовой частях спектра, высокую механическую прочность. Однако применение кварца для световодов с оболочкой связано с определенными технологическими трудностями, что объясняется высокой температурой размягчения кварца, его химической активностью при температурах плавления и технологической несовместимостью с большинством пригодных для оболочек материалов, имеющих низкий показатель преломления.

Для изготовления оптического волокна применяют также высокопрозрачные полимерные материалы: сополимеры метилметакрилата и метилакрилата. Полимерные волокна термостойки до $80 \text{ }^\circ\text{C}$, гибки, допускают без разрушения многократный изгиб. В отличие от большинства стекол, используемых для изготовления оптического волокна, полимеры радиационно-стойки при воздействии γ -излучения до 10^4 Р и не уменьшают светопропускание вследствие появления окраски после облучения.

Способы изготовления одножильных световодов

Одножильные жесткие и гибкие стеклянные световоды с оболочкой изготавливают вытягиванием из расплава пары стекол или вытягиванием из размягченного конца комплекта, состоящего из трубки-оболочки и штобика-жилы.

Вытягивание из расплава пары стекол (рис. 5.11) осуществляется из платинового тигля, помещенного в камерную печь δ с силовыми нагревателями δ .

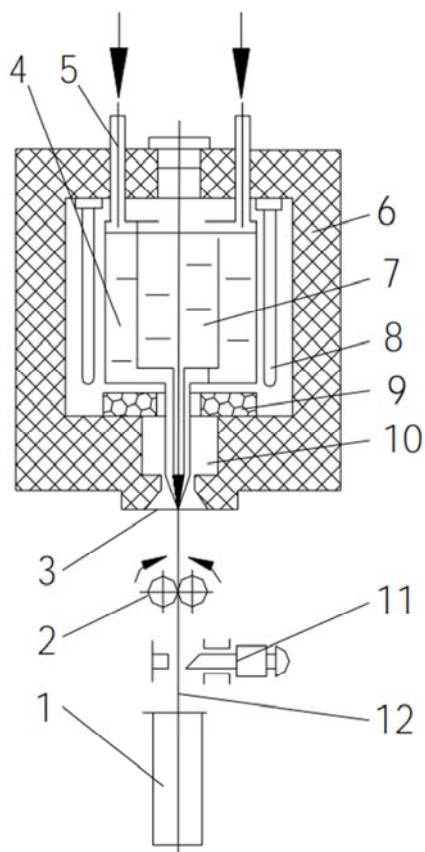


Рис. 5.11. Схема установки для вытягивания жестких световодов:
 1 – бункер-накопитель; 2 – вращающиеся ролики; 3 – образованная «луковица»;
 4 – кольцевое пространство; 5 – загрузочные отверстия; 6 – каменная печь;
 7 – цилиндрическая часть тигля; 8 – силитовые нагреватели;
 9, 10 – нагреватели; 11 – устройство для отрезания; 12 – световод

Тигель имеет цилиндрическую часть 7, окруженную кольцевым пространством 4, которое разделено радиально направленными перегородками на секцию для стекол жилы, которая соединена с цилиндрической частью тигля протокой.

Каждая секция делится на камеры перегородками, образующими систему сообщающихся сосудов. Расплавленное стекло перетекает тонким слоем через лабиринт перегородок, что обеспечивает хоро-

шее осветление стекла. Дно тигля подогревается нагревателем 9. В дне имеются коаксиально расположенные патрубки, соединенные с выпускными камерами секций. Сечение этих патрубков может быть круглым, квадратным, шестигранным. После включения нагревателя 10 стекло вытекает из патрубков, образуя «луковицу» 3. Из нее с помощью вращающихся роликов 2 непрерывно вытягивают световод 12 заданного диаметра. Заготовки длиной 1,0–1,2 м отрезаются устройством 11 и падают в бункер-накопитель 1. По мере выработки стекломассы по команде уровнемера через загрузочные отверстия 5 в тигель добавляют новые порции стекла в виде кубиков с размером сторон ~15 мм. Диаметр световодов регулируется скоростью вытягивания и изменением температуры в зоне выработки.

На рис. 5.12 представлена схема установки для вытягивания световодов из комплекта штабик-трубка.

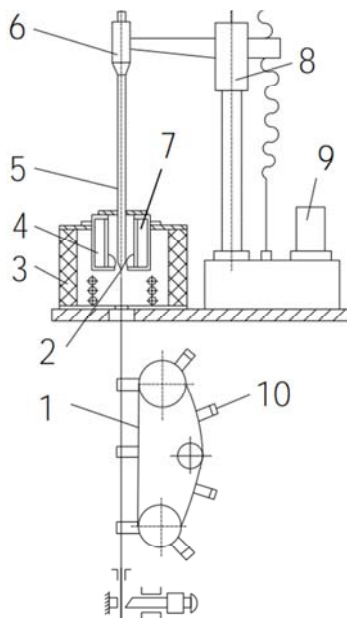


Рис. 5.12. Схема установки для вытягивания световодов из комплекта штабик-трубка:

- 1 – вытягивающее устройство; 2 – размягченный конец комплекта; 3 – печь;
- 4 – фильера; 5 – комплект; 6 – цанга; 7 – катушка; 8 – подвижная каретка;
- 9 – механизм подачи; 10 – подвижные захваты

Комплект 5 закрепляется в цанге 6 подвижной каретки 8 механизма подачи 9 и вводится в печь 3 через сменную фильеру 4. Размягченный конец комплекта 2, постоянно находящийся в зоне нагрева, спекается и вытягивается в световод с помощью устройства 1. Оно представляет собой непрерывную цепь с закрепленными на ней подвижными захватами 10. Фильера закреплена в стакане.

Выработка волокна диаметром 10–50 мкм из расплава выполняется на установке, схема которой представлена на рис. 5.13.

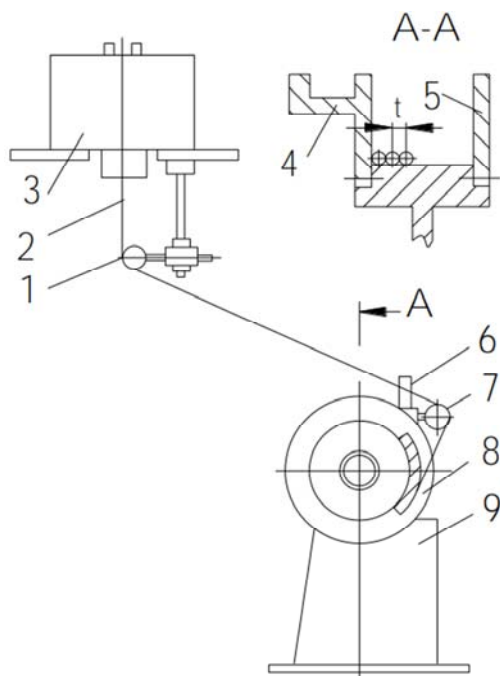


Рис. 5.13. Схема установки для выработки гибкого волокна:
 1 – отклоняющий ролик; 2 – стеклянная нить; 3 – тигель;
 4 – боковая канавка бобины; 5 – щетки; 6 – вращающийся копир;
 7 – раскладчик; 8 – бобина; 9 – намоточный станок

Стеклянная нить 2 вытягивается из тигля 3, перебрасывается через отклоняющий ролик 1 и с помощью раскладчика 7 послойно с шагом t наматывается на вращающуюся бобину 8 намоточного станка 9.

При пуске намоточного станка или обрыве нить закрепляется в боковую канавку бобины 4. После того, как процесс вытягивания стабилизируется и обеспечивается необходимый диаметр волокна, последнее вручную переводится в ролик раскладчика 7 для намотки на бобину. Перемещение раскладчика происходит от вращающегося копира 6. Процесс намотки считается законченным, когда волокно послонно заполнит полость между щечками 5, после чего бобину снимают с намоточного станка.

Для получения однородного оптического волокна необходимо управлять двумя основными параметрами: скоростью намотки световода и скоростью подачи заготовки. Если рассмотреть достаточно длинный период времени протягивания волокна, то при усреднении по времени протягивания материал не будет накапливаться в области «луковицы» в горячей зоне печи. Математически это выражается тем, что усредненные за время протягивания произведения квадрата радиуса на скорость протягивания для заготовки и волокна должны быть равны. Однако, для коротких по времени интервалов приведенное соотношение не будет выполняться в силу того, что наложение «луковицы» флуктуирует (колеблется) по вертикали относительно источника нагрева. Это неизбежно приводит к колебаниям диаметра волокна, что особенно проявляется в самом начале подачи заготовки.

«Луковица» сохраняется в результате баланса натяжения, создаваемого вытяжным устройством, поверхностного натяжения стекла (для различных марок стекол с различными добавками коэффициент поверхностного натяжения различен), веса и степени вязкости стекла. При этом на условия поддержания этого баланса существенное влияние оказывает постоянство распределения температуры в зоне нагрева «луковицы».

В идеале зона нагревания должна быть минимальна по размерам и хорошо контролируема. Наилучшим образом этим требованиям удовлетворяет способ лазерного плавления, схема которого представлена на рис. 5.14.

Лазерный луч падает на вращающийся зеркальный перископ таким образом, что выходящий луч сканирует по образующей цилиндра диаметром несколько сантиметров, попадает на наклонное зеркало с отверстием в центре, через которое пропускается световодное волокно. Затем сканирующий пучок с помощью вогнутого

зеркала сводится во вращающееся фокальное пятно в фиксированной точке у конца заготовки, где образуется «луковица». При условии, что заготовка точно отцентрирована относительно фокальной точки оптической системы, «луковица» однородно нагревается со всех сторон и существенно уменьшается, благодаря тому, что сфокусированный пучок очень узок. При этом мощностью лазерного луча можно достаточно легко управлять. Подобная вытяжная установка позволяет справиться с переходными флуктуациями диаметра волоконного световода, возникающими из-за механического дрейфа положения «луковицы», характерными для вытяжных установок с протяженной горячей зоной.

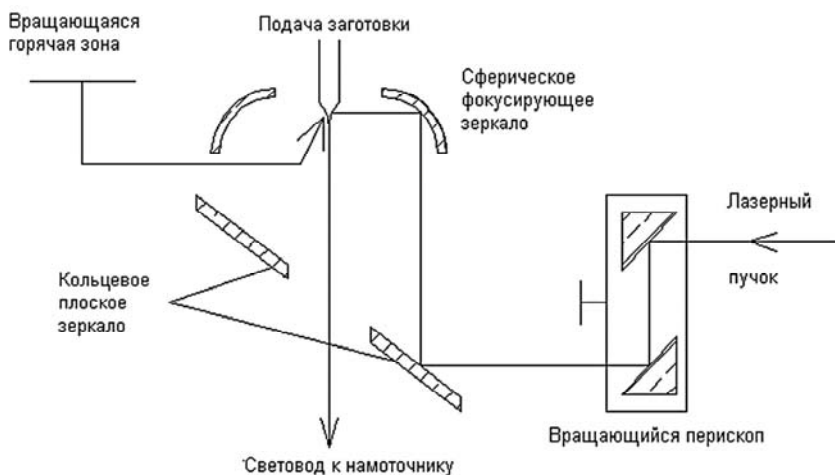


Рис. 5.14. Схема, поясняющая способ зонного лазерного плавления стеклянной заготовки при вытягивании волокна

Формование полимерного волокна осуществляется методом экструзии. На рис. 5.15 показана схема применяемой экструзионной головки.

Полимер из расплава 2 через центральную фильеру 1 выдавливается под давлением в виде нити 4, которая обволакивается материалом оболочки 3, поступающим через кольцевую фильеру 5. Полуценное волокно наматывается на бобину намоточного станка.

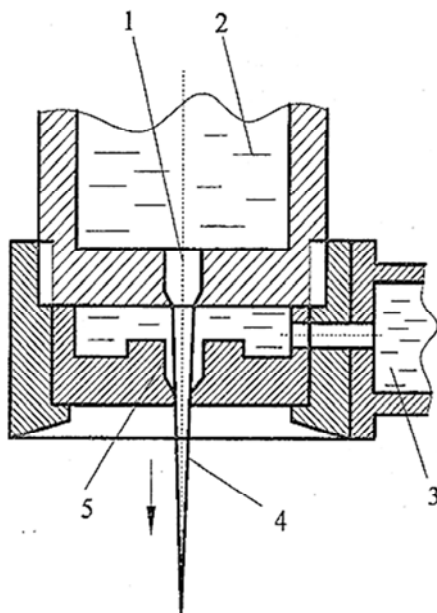


Рис. 5.15. Схема экструзионной головки для формования полимерного волокна:

1 – полимер из расплава; 2 – центральна фильера; 3 – материал оболочки; 4 – нить из расплава; 5 – кольцевая фильера

Многожильные световоды, которые обеспечивают высокую разрешающую способность, изготавливают перетяжкой пакета одножильных световодов в один многожильный при температуре пластической деформации стекла. Для этого одножильные световоды длиной 1200 мм, проконтролированные по геометрическим размерам и тщательно очищенные от загрязнений и жировых пятен, укладывают на приспособлении в пакет, по форме сечения, соответствующей будущему световоду (круглому, квадратному, шестигранному) с размером пакета 50–75 мм.

Затем пакет, скрепленный обжимками, переносится на установку для протяжки, которая по конструкции аналогична установке для вытяжки жестких световодов (см. рис. 5.11). Один конец пакета закрепляется в цанге каретки механизма подачи, другой через направляющую втулку, которая по форме и размерам соответствует сечению пакета, вводится в зону разогрева печи. После оплавления

нижнего конца осуществляют перетяжку пакета на световоды диаметром 0,8–2 мм или волокно диаметром 50–70 мкм.

Изготовление гибких волоконных жгутов

В зависимости от назначения гибкие жгуты разделяются на осветительные из нерегулярно уложенных волокон и для передачи изображения из регулярно уложенных волокон. Жгуты выпускают в различных вариантах исполнения в зависимости от формы торца, вида оболочки и наконечников.

На рис. 5.16 представлены основные элементы гибкого волоконного жгута 4 с круглыми торцами 1 диаметром d , заделанного в поливинилхлоридную оболочку 3 с фасонными наконечниками 2 на концах.

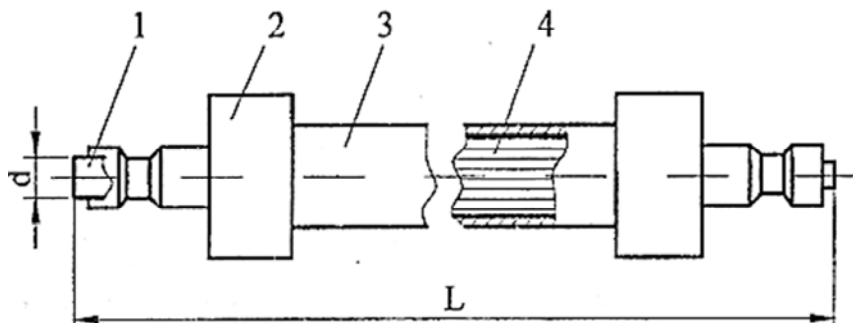


Рис. 5.16. Основные элементы гибкого волоконного жгута:
1 – круглые торцы; 2 – фасонные наконечники; 3 – поливинилхлоридная оболочка;
4 – гибкий волоконный жгут диаметром d и длиной L

Стандартные жгуты выпускают длиной L до 1500 мм и с наибольшим диаметром d или стороной прямоугольника до 15 мм.

Гибкие жгуты для передачи света и изображения с невысокой разрешающей способностью $10\text{--}15\text{ мм}^{-1}$ изготавливают в такой последовательности.

Намотанное на бобину волокно через пазы на цилиндрической поверхности корпуса бобины скрепляется струбцинами и разрезается на жгуты. Наибольшая длина жгута равна длине образующей бобины, а сечение имеет квадратную форму с размерами не более 100×100 мм. Полученный жгут находится в скрученном состоянии,

поэтому его необходимо выпрямить. Для этого жгут нагревают до температуры, при которой короткие волокна, лежащие ближе к центру бобины, вытянутся под действием собственного веса или небольших добавочных грузов.

После этого осуществляют виброукладку с целью удаления поломанных волокон и получения идентичности расположения волокон на торцах. Для этого распрямленный жгут одним концом закрепляют в обжимку 3 установки для виброукладки гибкого жгута (рис. 5.17).

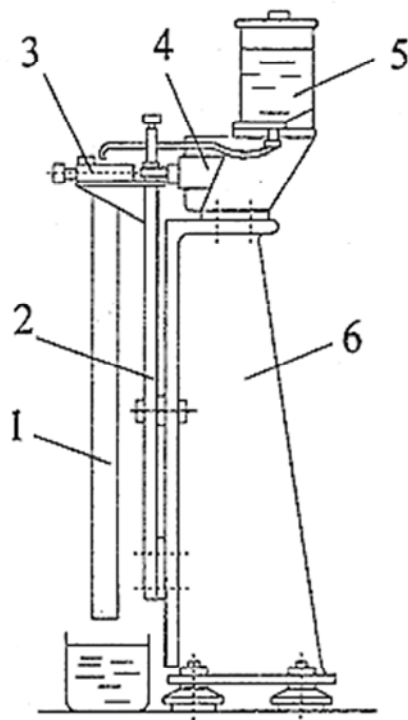


Рис. 5.17. Схема установки для виброукладки гибкого жгута:
1 – жгут; 2 – резонансная балка; 3 – обжимка; 4 – электромагнитный вибратор;
5 – бачок с дистиллированной подмыленной водой; 6 – основание

В процессе виброукладки жгут 1, подвешенный в вертикальном положении подвергают воздействию вибраций, создаваемых систе-

мой, состоящей из электромагнитного вибратора 4 и резонансной балки 2, закрепленных на основании 6. Одновременно на верхний конец жгута из бачка 5 подается дистиллированная подмыленная вода. С незафиксированного конца жгута выпадают поломанные в процессе намотки волокна. В конце виброукладки жгут промывается чистой дистиллированной водой и просушивается. После сушки торцы жгута закрепляют клеящим составом, обычно композицией на основе эпоксидной смолы, и выдерживают в вакууме при нормальной температуре до отвердевания. Затем торцы шлифуют и полируют. Проклеенные квадратные жгуты с отполированными торцами контролируют и после разметки разделяют на заготовки меньшего сечения путем раскалывания ножом по торцам. На окончательно подогнанные по размерам сечения волоконные жгуты надевают оболочки и приклеивают наконечники. Торцы собранных жгутов, выступающие из наконечников на 0,5–1,5 мм, шлифуют и полируют с применением абразивной и полирующей суспензии.

Жгуты с высокой разрешающей способностью (более 30 мм^{-1}) изготавливают из многожильного волокна обычно с гексагональной формой сечения. Волокна после вытяжки в холодном состоянии перематывают в один слой на цилиндрический барабан с плотной упаковкой. Получившуюся кольцевую полосу приклеивают и снимают с барабана. Полосы набирают в пакет и спекают под давлением в форме. Далее технологический процесс аналогичен описанному для жгутов с малой разрешающей способностью.

Описание экспериментальных установок

С целью приобретения практических навыков по использованию эндоскопов с волоконной оптикой (для исследования состояния внутренних полостей) в лабораторной работе используется технический эндоскоп BS-150 и макет полости.

Эндоскоп (рис. 5.18) состоит из панели управления 1, зонда 2, камеры 3.

Макет исследуемой полости (рис. 5.19) представляет собой цилиндрический пластмассовый тубус 1, неподвижно закрепленный на деревянном основании 2. На одном его конце выполнено отверстие диаметром 20 мм, через которое зонд эндоскопа вводится внутрь полости тубуса, а на втором устанавливается съемная крыш-

ка 3, на внутренней торцевой поверхности которой закрепляется подлежащий исследованию объект.



Рис. 5.18. Фотография общего вида эндоскопа:
1 – панель управления; 2 – зонд; 3 – камера



Рис. 5.19. Макет исследуемой полости:
1 – цилиндрический пластмассовый тубус; 2 – деревянное основание;
3 – съемная крышка

Порядок выполнения работы

Приобретение навыков использования эндоскопов с волоконной оптикой

1. Удерживать нажатой кнопку питания «вкл / выкл» на панели управления (рис. 5.20) в течение 3 секунд, чтобы включить режим съемки камерой.

2. Ввести зонд эндоскопа внутрь полости тубуса до момента получения изображения исследуемой области. При необходимости можно регулировать яркость подсветки: для увеличения яркости

подсветки нажать кнопку «BRIGHT+» на панели управления; для снижения уровня яркости нажать «BRIGHT-».



Рис. 5.20. Фотография панели управления

3. В режиме съемки камерой нажимать кнопки «вверх / вниз» для регулировки угла поворота экрана. Изображение можно повернуть на угол 180° с помощью кнопок «вверх / вниз», что облегчает процесс обследования.

4. Нажать кнопку «SNAP» на рукоятке панели управления рис. 5.21, что приведет к сохранению снимка.

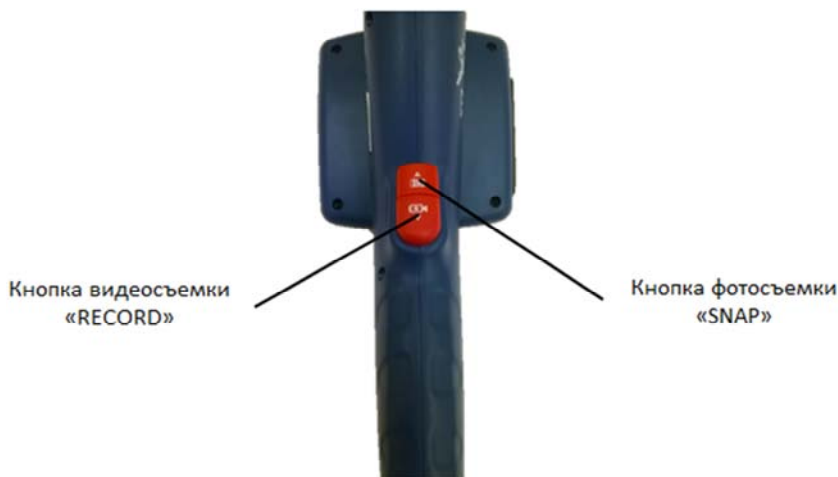


Рис. 5.21. Фотография рукоятки панели управления

Для просмотра сохраненного снимка необходимо:

1. Нажать кнопку «ОК».
2. В появившемся меню выбрать «Yes» и нажать «ОК».
3. С помощью кнопок «вверх / вниз» на панели управления выбрать вкладку «Explorer» и нажать «ОК».
4. Выбрать вкладку «Picture View», нажать «ОК».
5. Выбрать свою картинку, нажать «ОК».
6. Для возврата в режим съемки нажать несколько раз кнопку «ESC».
7. Удерживая нажатой кнопку питания, выключить режим съемки камерой.

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть (обязательно в отчет добавить фотографию исследуемого объекта).
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое эндоскоп и для чего он предназначен?
2. Типовая схема медицинского эндоскопа.
3. Что представляет собой в общем виде гибкий эндоскоп?
4. Механические системы управления эндоскопом?
5. Из каких частей состоит дистальный конец гибкого эндоскопа?
6. Что представляет собой тубус медицинских эндоскопов?
7. Какие механизмы используют для управления гибкой частью эндоскопа?
8. На каком явлении основано распространение света в оптических волокнах?
9. Перечислить способы укладки волокон в пучке.
10. Из какого материала изготавливают световоды?
11. Пояснить схему установки для вытягивания жестких световодов.
12. Пояснить схему установки для вытягивания световодов из комплекта штабик-трубка.

13. Пояснить схему установки для выработки гибкого волокна.
14. Пояснить способ лазерного плавления.
15. Пояснить схему экструзионной головки для формирования полимерного волокна.
16. Назвать основные элементы гибкого волоконного жгута.
17. Пояснить схему установки для виброукладки гибкого жгута.

Литература

1. Мухин, С. В., Пизурян, А. Л. Эндоскопическая хирургия. История развития эндоскопической урологии // Эндоскоп. хирургия и дистанц. литотрипсия : сб. науч. тр. / Рос. гос. мед. ун-т НИИ урологии. – М., 1992. – 231 с.
2. Федоров, И. В., Сигал, Е. И., Одинцов, В. В. Эндоскопическая хирургия. – М. : ГЭОТАР Медицина, 1998. – 351 с.
3. Дьяконов, С. Ю., Кац, А. И., Ремизов, Н. В. Роль кооперации малых предприятий в производстве жестких медицинских эндоскопов // Мед. техника. – 1998. – 358 с.

Лабораторная работа № 6

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

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 типа ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу равной 0,05 мм.
4. Микроскоп МИМ-5.

Теоретическая часть

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 потоком

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 какого-то центрального иона (рис. 6.1).

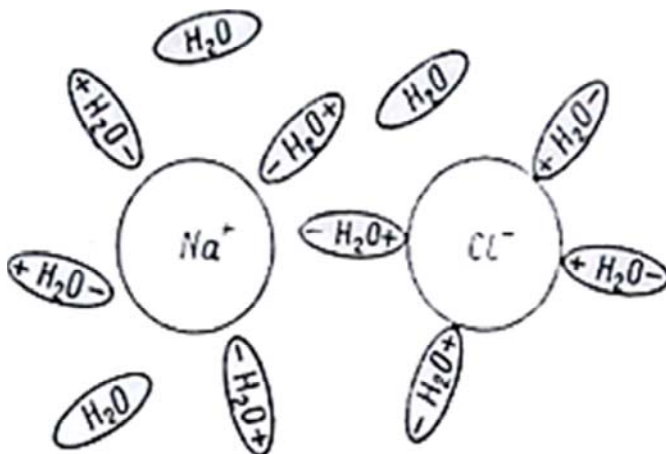


Рис. 6.1. Схема поляризации молекул воды при растворении в ней соли NaCl

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. 6.2), подобный тому, какой возникает на

обкладках конденсатора. Один слой представляет 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.

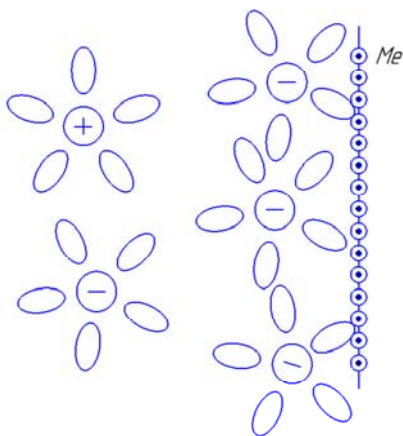
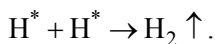
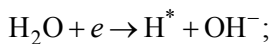


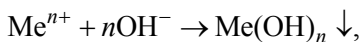
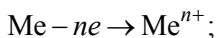
Рис. 6.2. Схема образования двойного электрического слоя на границе электролита с металлом

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

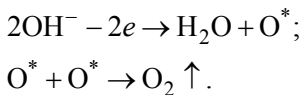
На катоде происходит ускоренное разложение молекул воды с выделением молекулярного водорода:



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 с 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

$$m = \varepsilon Q, \tag{6.1}$$

где m – масса материала, растворенного с анода;

Q – количество электричества, пропущенное через электролит;

ε – коэффициент пропорциональности.

При постоянном токе

$$Q = It,$$

где I – сила тока;

t – время его прохождения.

Тогда зависимость (6.1) можно записать в виде

$$m = \varepsilon I t. \tag{6.2}$$

Коэффициент ε называется электрохимическим эквивалентом:

$$\varepsilon = An / FP,$$

где A – атомная масса;

n – валентность;

$F = 96\,500$ – число Фарадея.

Здесь ε выражается в килограммах на ампер-секунду.

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

$$e_c = 100 \sum_i (k_i / \varepsilon_i).$$

Ниже, в табл. 6.1, приведены расчетные значения электрохимических эквивалентов некоторых сплавов.

Таблица 6.1

Значение электрохимического эквивалента
для различных материалов

Материал	ε_c , мг/(А·с)
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 (6.2) 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: $I = JS$. Тогда уравнение (6.2) примет вид

$$Sl\rho = EJS\tau. \quad (6.3)$$

Если левую и правую части выражения (1.3) разделить на время τ , то отношение l / τ называется скоростью линейного растворения материала анода:

$$V = J\varepsilon / \rho. \quad (6.4)$$

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:

$$J = U\chi / s. \quad (6.5)$$

С учетом формул (6.4) и (6.5), закон анодного растворения может быть записан в виде

$$V = \varepsilon\chi U / (\rho s). \quad (6.6)$$

Если зазор s не изменяется в процессе анодного растворения, то режим ЭХО *стационарный*, в случае переменного, неустановившегося зазора – *нестационарный*. В зависимости (6.6) учитывается действие только электрического поля. Однако, как следует из определения процесса, необходимым условием его осуществления является удаление продукта обработки и 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 (6.2). Это объясняется тем, что часть количества электричества тратится

на побочные реакции на электродах, образование газов, вторичные реакции. Эти потери можно учесть, введя коэффициент, который называют выходом по току. Выход по току представляет отношение действительного и теоретически ожидаемого количества растворенного вещества и характеризует долю полезного использования тока. Тогда закон анодного растворения (6.6) может быть записан в виде

$$V = \eta \epsilon \chi U / (\rho s). \quad (6.7)$$

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 реакция необходимо обеспечить интенсивный вынос продуктов обработки из электродных промежутков, 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. 6.3 схематически показана зависимость силы тока от напряжения при постоянной площади обрабатываемой поверхности. На участке *АВ* с возрастанием напряжения ток увеличивается.

Это так называемая активная область. Участок *АВ* 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 *ВВ* возрастание напряжения вызывает снижение силы тока. Наступает пассивация обрабатываемой поверхности, т. е. на ней образуется оксидная пленка. 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.

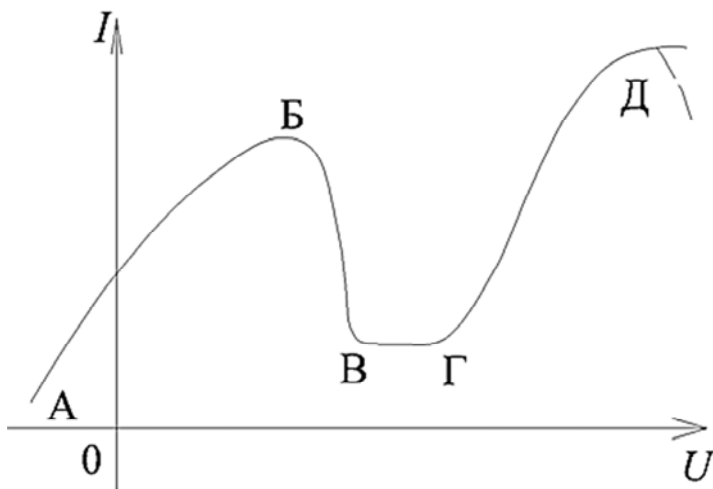


Рис. 6.3. Характер зависимости силы тока от напряжения при достаточной площади обрабатываемой поверхности

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. 6.4) 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.

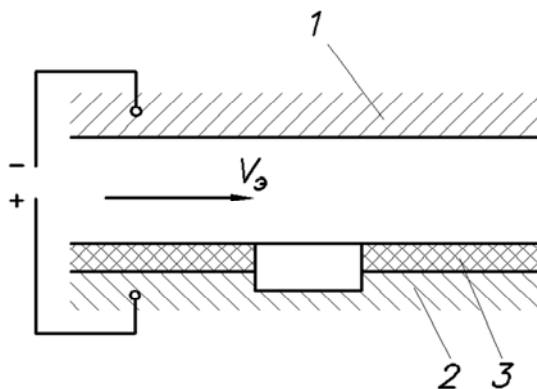


Рис. 6.4. Схема анодного растворения с неподвижными электродами:
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – диэлектрик

Электрод-инструмент 1 не перемещается к обрабатываемой поверхности – межэлектродный зазор по мере съема металла с заготовки 2 возрастает, а скорость $V_э$ 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. 6.5, а). При такой схеме электрод-инструмент 1 имеет одно рабочее движение – поступательное перемещение со скоростью $V_{и}$ 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, прессформ, прошивают отверстия, пазы, перья лопаток турбин, вырезают заготовки различного профиля.

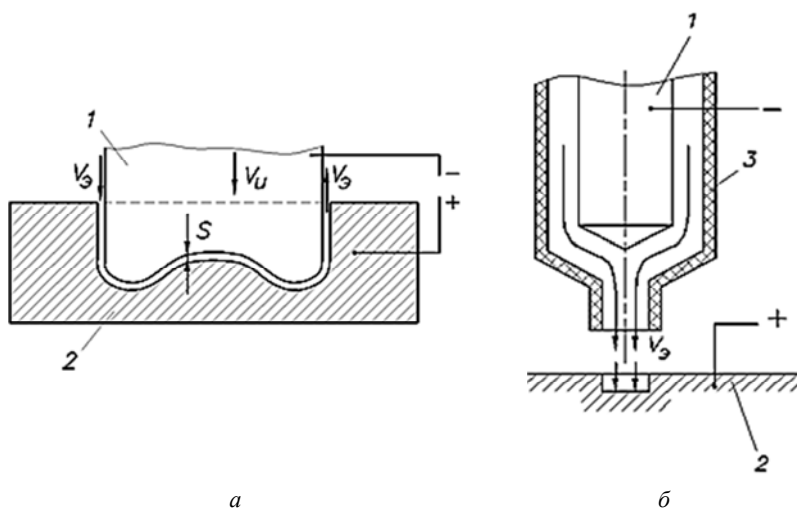


Рис. 6.5. Схема обработки при постоянной скорости подачи инструмента:

а – прошивание углублений, полостей, отверстий:

1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка;

б – получение отверстий струйным методом:

1 – токоподвод; 2 – заготовка; 3 – корпус из изоляционного материала

К такой схеме относят и получение отверстий струйным методом. Электрод-инструмент состоит из токоподвода 1 (рис. 6.5, б), омываемого потоком электролита. Токоподвод находится внутри корпуса 3 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.

3. *Точение* наружных и внутренних поверхностей (рис. 6.6). 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 $V_{и}$ (рис. 6.6, а), так и вдоль нее со скоростью $V_{и}'$ (рис. 6.6, б). Межэлектродный зазор s может поддерживаться диэлектрическими прокладками 3.

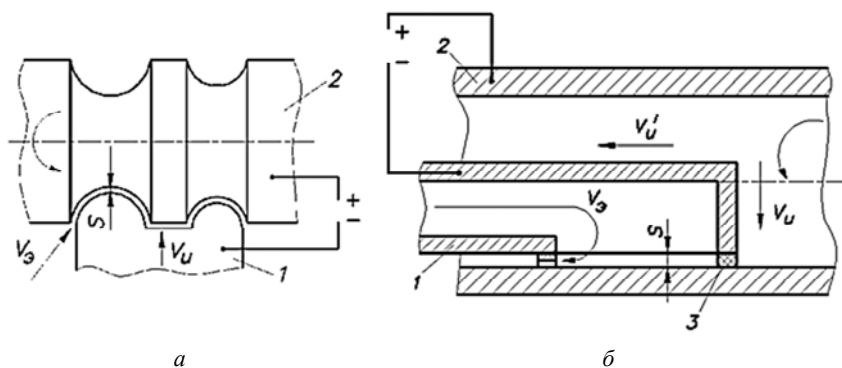


Рис. 6.6. Схема точения наружных и внутренних поверхностей:
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – диэлектрические прокладки

4. *Протягивание* наружных и внутренних поверхностей (рис. 6.7) 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 $V_{и}$. По такой схеме выполняют чистовую обработку цилиндрических отверстий, нарезание резьбы, шлицев, винтовых канавок.

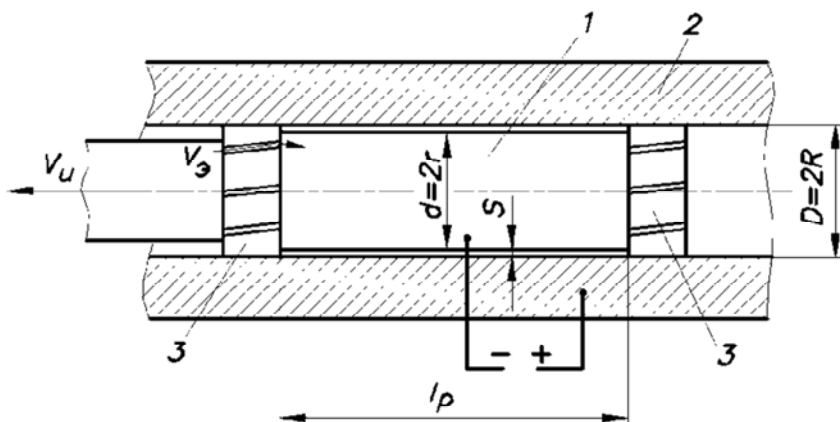


Рис. 6.7. Схема протягивания наружных и внутренних поверхностей:
 1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – диэлектрические элементы

5. *Разрезание заготовок.* Инструментом может быть вращающийся диск (рис. 6.8, а) или проволока 1 (рис. 6.8, б). Инструменты подают к заготовке 2 со скоростью V_u . При этом необходимо сохранять постоянным зазор s . По этой схеме выполняют пазы, щели, подрезку нежестких деталей, например, пружин.

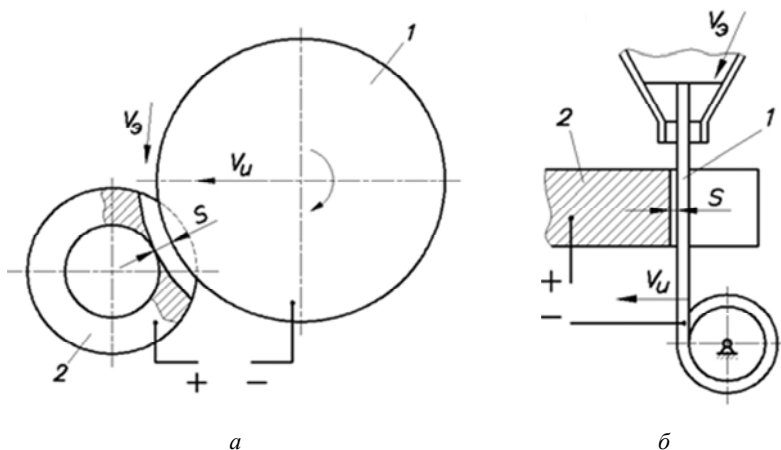


Рис. 6.8. Схема разрезания заготовок:
 1 – вращающийся элемент; 2 – заготовка

6. При шлифовании (рис. 6.9) используют вращающийся металлический инструмент 1 цилиндрической формы, который поступательно движется вдоль заготовки 2 со скоростью $V_{и}$. Электрохимическое шлифование используют в качестве окончательной операции при изготовлении пакетов пластин из магнитомягких материалов, когда при обработке недопустимы механические усилия, а также для изготовления деталей из вязких и прочных сплавов.

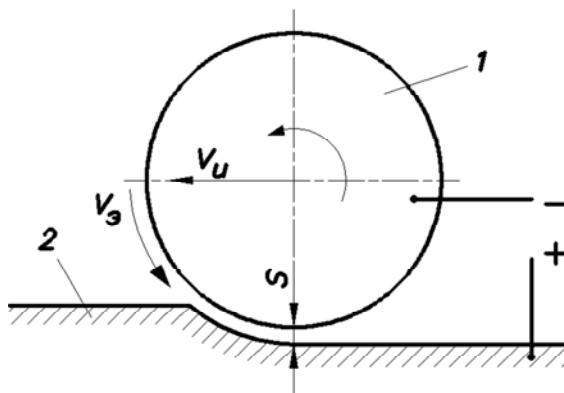


Рис. 6.9. Схема шлифования поверхностей:
1 – вращающийся металлический инструмент; 2 – заготовка

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. 6.10 приведена схема копирования знаков, с помощью которых на деталь наносят цифры. При этом знаки 1, 4 на инструменте выполнены в зеркальном отображе-

нии 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 6 обеспечиваются диэлектрическими прокладками 5. В тех случаях, когда глубина нанесения информации невелика (0,01–0,02 мм), то 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 растворения металла под знаками образуются углубления, повторяющие отображение профиля знаков, как показано в нижней части рис. 6.10. 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.

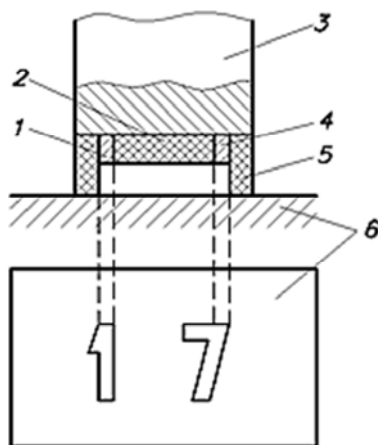


Рис. 6.10. Схема маркирования с нанесением диэлектрика на электрод-инструмент:

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. 6.11) наносимая информация имеет форму просечек 1, 2. Трафарет 4 накладывают на деталь 3 и прижимают электродом-инструментом 5. Процесс анодного растворения протекает в элек-

тролите, который заранее нанесен на поверхность детали. Если необходима прокачка электролита, то трафарет прижимают по контуру, оставляя зазор между ним и электродом-инструментом, или выполняют прорези в самом трафарете для прохода электролита. В ряде случаев роль трафарета может выполнять слой фотоэмульсии, наносимый на деталь.

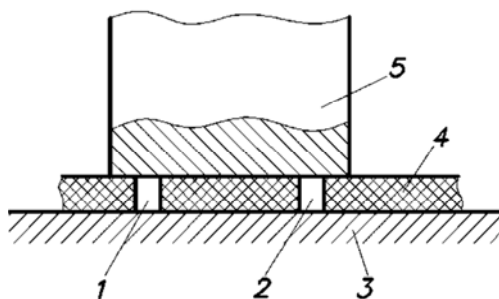


Рис. 6.11. Схема маркирования с использованием диэлектрических трафаретов:

- 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 $Ra = 2,5-3$ мкм.

При обработке по схеме с неподвижными электродами можно легко *удалять заусеницы* в труднодоступных для подвода инструмента местах, в частности, в сообщающихся каналах топливо распределительной аппаратуры. В изделиях такого назначения после механической обработки на кромках отверстий неизбежно образуются заусеницы 4 (рис. 6.12), 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 и скругления кромок занимает доли минуты. Помимо этого снижается шероховатость поверхности, благодаря чему снижаются гидравлические потери в системе.

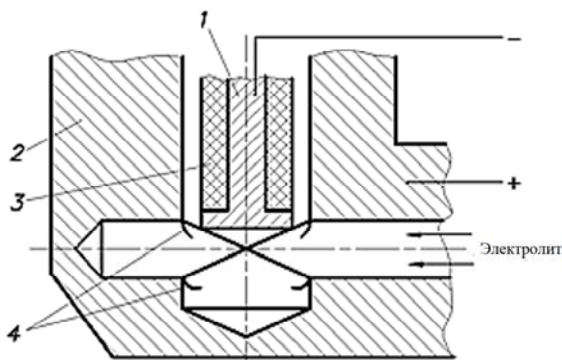


Рис. 6.12. Схема удаления заусенцев в труднодоступных местах:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка;
3 – слой изоляции; 4 – заусенцы на кромках отверстий

В технике находят применение детали с внутренними полостями, изготовленные из труднодеформируемых сплавов (рис. 6.13). При этом диаметр рабочей части у них в несколько раз превышает диаметр 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 рис. 6.13 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 .

Схему точения можно эффективно использовать при обработке части нежесткой заготовки. В качестве примера на рис. 6.14 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 обра-

ботки. 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 до нескольких метров при толщине стенки, измеряемой долями миллиметра, с погрешностью не более 0,03–0,05 мм.

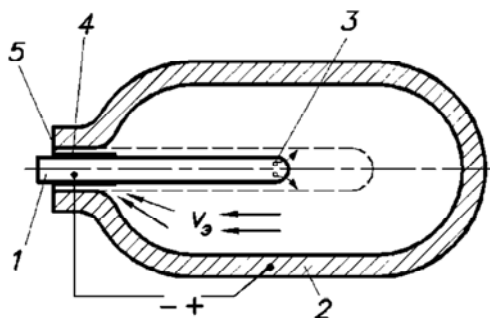


Рис. 6.13. Схема обработки внутренней полости в заготовках, изготовленных из трудно деформируемых сплавов:

- 1 – электрод-инструмент в виде трубки; 2 – обрабатываемая заготовка;
 3 – отверстие в электроде-инструменте; 4 – слой изоляционного материала;
 5 – предварительно просверленное отверстие

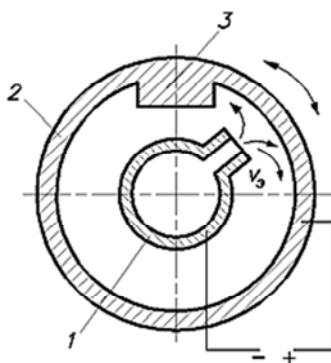


Рис. 6.14. Схема точения при обработке части нежесткой заготовки:

- 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. 6.15. В этом случае можно обеспечить точное взаимное расположение всех участков без применения копировальных устройств. При ЭХО таких поверхностей электрод-инструмент 1 имеет одно поступательное движение $V_{\text{и}}$ к заготовке 2 независимо от формы обрабатываемой поверхности. Электролит поступает в межэлектродный зазор через систему отверстий и щелей в электроде-инструменте.

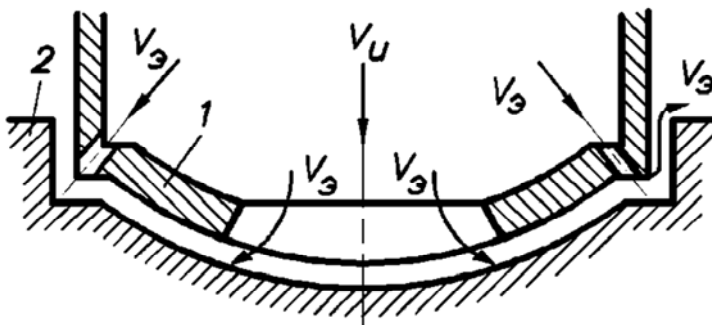


Рис. 6.15. Схема обработки нескольких плавно сопряженных между собой поверхностей сложной формы:

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. 6.16). 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.

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. 6.17.

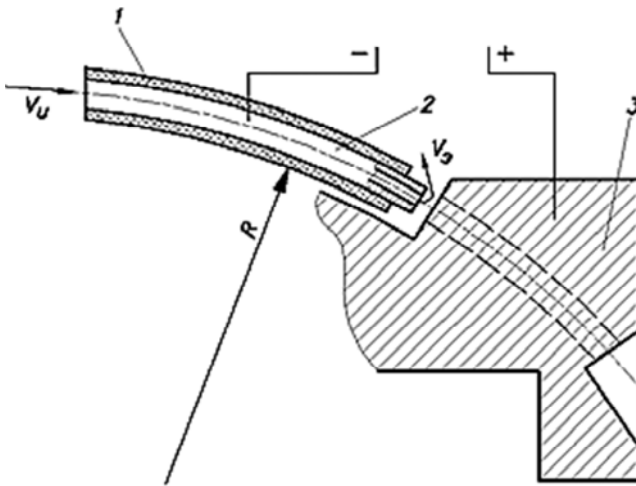


Рис. 6.16. Схема обработки канала с криволинейной осью:
 1 – слой изоляции; 2 – электрод-инструмент; 3 – обрабатываемая заготовка

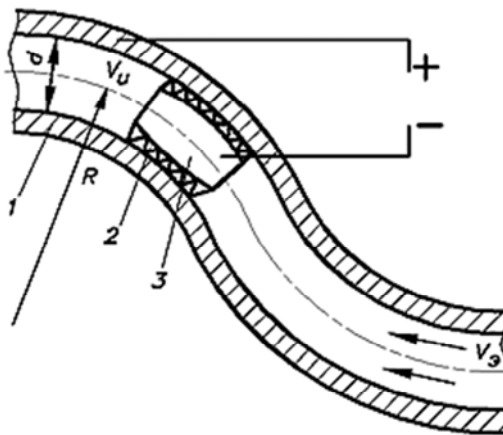


Рис. 6.17. Схема обработки протягиванием внутренней поверхности трубы:
 1 – обрабатываемая труба; 2 – выступы из диэлектрического материала;
 3 – электрод-инструмент

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 $V_{н.}$

Внутри трубной заготовки со скоростью V , прокачивается электролит. При диаметре отверстия $d \geq 7-8$ 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 $V_{и} = 0,3-1$ мм/с. Шероховатость обработанной поверхности $Ra \leq 0,6-2$ мкм, а погрешность не превышает 0,1–0,2 мм.

Описание экспериментальных установок

Лабораторная установка для прошивания отверстий электрохимическим методом

Для проведения опытов по электрохимической обработке металлов используется экспериментальная установка, схема и фотография общего вида которой приведены на рис. 6.18.

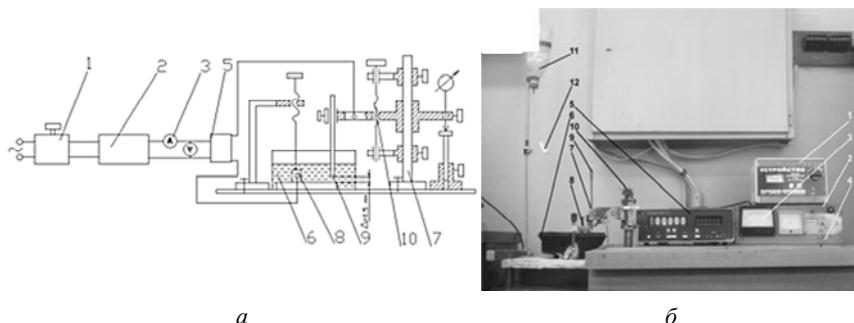


Рис. 6.18. Лабораторная установка для прошивания отверстий электрохимическим методом:

- a* – схема; *б* – фотография общего вида;
 1 – источник постоянного тока; 2 – блок контрольных приборов; 3 – амперметр;
 4 – тумблер включения установки; 5 – счетчик продолжительности обработки;
 6 – ванночка для сбора электролита в процессе обработки; 7 – стойка;
 8 – анод; 9 – катод; 10 – система регулирования межэлектродного зазора;
 11 – система подачи электролита в зону обработки; 12 – регулятор расхода

Порядок выполнения работы

1. Получить металлический образец (рис. 6.19), предназначенный для обработки. Для увеличения электропроводности образца очистить его поверхность от окалины и механических загрязнений с помощью наждачной бумаги.



Рис. 6.19. Фотография образцов, предназначенных для обработки

2. С помощью штангенциркуля измерить толщину образцов и полученные данные занести в соответствующую графу (h_3) табл. 6.3.

3. Подготовить раствор электролита, путем растворения в водопроводной воде объемом около 400 мл поваренной соли в количестве 50 г.

4. В ванне установки для электрохимического прошивания отверстий поместить образец, как показано на рис. 6.20. Для этого поместить образец *1* между упором *2* и планкой *3*, на который подается положительное напряжение через контакт *4*. Заполнить приготовленным раствором систему подачи *11* (рис. 6.18, б) электролита в зону обработки.

5. Катод (отрицательный электрический контакт) *9* (рис. 6.18, б) в виде медной трубки ввести в соприкосновение с деталью, затем отвести его от заготовки с помощью системы регулирования зазора *10* (рис. 6.18, б) на расстояние равное 0,5 мм.

6. Обеспечить подачу электролита в зону обработки. Подать напряжение на электроды установки, путем включения тумблера *4* (рис. 6.18, б), включающего источник питания *1*, и счетчика времени *5*, фиксирующего начало обработки. При этом занести в соответствующую графу табл. 6.3 значение силы тока *I*, сняв показания с амперметра *3* (рис. 6.18, б).

7. Производить обработку, контролируя показания амперметра *3* (рис. 6.18, б) до момента начала уменьшения силы тока до значения, равного 10–20 % от первоначального, что соответствует прошива-

нию отверстия в образце, зафиксировав при этом по счетчику 5 продолжительность обработки. Значение продолжительности занести в графу ($t_{обр}$) табл. 6.3.



Рис. 6.20. Фотография установленной на экспериментальной установке заготовки:

1 – образец; 2 – упор; 3 – планка; 4 – контакт

8. Выключит экспериментальную установку тумблером 4 (рис. 6.18, б). Извлечь деталь из установки. На образце должно наблюдаться отверстие, аналогичное отверстию, приведенному на рис. 6.21.



Рис. 6.21. Фотография образца с полученным путем электрохимической обработки отверстием

9. С помощью штангенциркуля определить диаметр полученного в образце отверстия и данные занести в соответствующую графу (d_3) табл. 6.3.

10. Рассчитать значение электрохимического эквивалента по формуле

$$\varepsilon = \frac{\pi \rho h_3 d_3^2}{4It_{\text{обр}}},$$

где ρ – плотность материала образца (табл. 6.2).

Сравнить рассчитанное значение электрохимического эквивалента со справочным, приведенным в табл. 6.1.

Таблица 6.2

Значение плотности для различных материалов

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³
Сталь 45	7800
Бронза	8150
Латунь	8400
Титановые сплавы	4500
Алюминиевые сплавы	2700

Таблица 6.3

Результаты измерений и вычислений
при электрохимической обработке отверстий

Толщина заготовки h_3 , мм	Диаметр отверстия в заготовке d_3 , мм	Продолжительность обработки $t_{\text{обр}}$, с	Сила тока I , А	Плотность материала ρ , г/см ³	Значение электрохимического эквивалента ε , мг/Ас	
					расчетное	справочное

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Схема установки, используемой в данной лабораторной работе.
 - 4.2. Полученные результаты измерений и вычислений электрохимического эквивалента.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы происходят в электролите при электрохимической обработке без и в случае подачи на электроды напряжения?
2. Назовите первый закон Фарадея.
3. В чем заключается явление пассивации анода?
4. Какие требования предъявляются при выборе электролита?
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. Киселёв, 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.

Лабораторная работа № 7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ

Цель работы

1. Изучить классификацию протезов зубов и особенности их функционирования в полости рта.
2. Изучить требования, предъявляемые к материалам зубных протезов.
3. Изучить основные этапы изготовления зубных протезов.
4. Изучить последовательность получения слепка зубного ряда и его модели.
5. Изучить технологию изготовления деталей протезов литьем по выплавляемым моделям.
6. Изучить технологию изготовления резиновой пресс-формы для восковой модели.
7. Получить практические навыки получения слепка зубного ряда и его гипсовой модели.
8. Получить практические навыки изготовления резиновой пресс-формы для восковой модели.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Слепочные ложки.
2. Материал для оттисков (слепочный материал).
3. Медицинский гипс.
4. Протезы челюсти.
5. Емкости и деревянные шпатели для приготовления необходимых смесей.
6. Инструменты для обработки гипсовой модели.
7. Металлические коронки зубов.
8. Сырая резина.
9. Вулканизатор.

Теоретическая часть

Основные сведения о зубных протезах. Классификация протезов зубов

Все применяемые протезы зубов можно разделить на три следующие группы:

- протезы, восстанавливающие коронки зуба (вкладки, полукоронки, коронки, штифтовые зубы);
- протезы, восстанавливающие зубные ряды (мостовидные, пластиночные, бюгельные);
- протезы, применяемые при отсутствии всех зубов.

Вкладка – протез, применяемый для восстановления частично нарушенных тканей естественного зуба и в качестве опорной части мостовидного протеза. Вкладки изготавливают из металла и пластмассы, металла и фарфора.

Полукоронка представляет собой несъемную конструкцию протеза, покрывающую естественный зуб с оральной, боковых и жевательных поверхностей. Полукоронка может применяться и как опорная часть мостовидного протеза для хорошего косметического эффекта. Изготавливают полукоронки из золотоплатинового сплава или нержавеющей стали.

Искусственная коронка – протез для восстановления разрушенной естественной коронки зуба. Искусственной коронкой часто покрывают и здоровые зубы, если в зубном ряду имеется дефект и его устраняют с помощью мостовидного протеза. Изготавливают искусственные коронки из сплавов металлов, пластмассы, фарфора или комбинации этих материалов.

Протезы мостовидные передающую на них жевательную нагрузку передают опорным зубам физиологическим путем. В этом случае акт обработки пищи схож с обработкой ее естественными зубами как во времени, так и по возможности дробления пищи с различными физическими свойствами. Протезы занимают мало места во рту, не больше, чем имевшиеся в этих местах естественные зубы. Благодаря этому клиенты (пациенты) их быстро осваивают.

Протезы пластиночные покрывают небо, альвеолярные отростки и тело челюсти. Падающее на них жевательное давление передают на ткани, не приспособленные к нагрузке. Поэтому в первое время их пользования нарушается речь, обработка пищи во рту удает-

ся с трудом, происходит усиленное отделение слюны, то есть много дискомфортных факторов. Только после привыкания протезы помогают обрабатывать пищу, а указанные осложнения исчезают.

Протезы бюгельные передают давление смешанным путем и на ткани, не приспособленные к нагрузке. Поэтому они имеют положительные и отрицательные качества, свойственные мостовидным и пластинчатым протезам. Протезы, применяемые при отсутствии всех зубов, но конструкции пластиночные.

Материалы, применяемые в ортопедической технологии

Многообразие конструкций протезов и специфические условия их назначения требуют применения специальных материалов. Зубные протезы изготавливают из пластмасс, сплавов металла на основе золота, серебра и палладия, хромоникелевых нержавеющей сталей, хромокобальтовых сплавов и фарфора. Широкое применение получили протезы, изготовленные из какого-либо сплава металла, облицованного пластмассой (металлопластмассовые конструкции), или фарфора (металлокерамические конструкции).

В полости рта зубной протез подвергается воздействию сил жевательного давления, а также химическому воздействию слюны и различных пищевых продуктов.

Механические процессы обработки пищи во рту весьма сложны и изменяются при поражении зубочелюстной системы. Механическая работа зубочелюстной системы осуществляется сокращением жевательной мускулатуры и сопровождается определенным напряжением в тканях пародонта. При наличии в полости рта зубных протезов в процессе обработки пищи в них также возникают напряжения, характер и величина которых находятся в прямой зависимости от степени сокращения жевательной мускулатуры и взаимоотношений между зубными рядами верхней и нижней челюсти.

Нагрузка на различные участки протезов так же, как и на естественные зубные ряды, возникает при дроблении различной пищи, для чего иногда требуется усилие, достигающее 1200 Н. Если при этом учесть, что человек совершает 500 000–550 000 жевательных движений в год, то есть около 1400 в день, то совершенно ясно в каких условиях и при какой нагрузке работают протезы. Поэтому материалы, применяемые для изготовления протезов должны обладать высокой циклической (усталостной) прочностью и прочностью на ударные нагрузки.

На поверхностные слои протеза действуют пищевые комки различной твердости. Поэтому, если материал протеза будет иметь меньшую твердость, чем пища, то произойдет ее внедрение в протез (шаржирование) и наступит нарушение поверхностной целостности.

Из выше сказанного следует, что материалы, идущие на изготовление протезов, должны обладать определенным комплексом свойств:

- абсолютная безвредность для организма;
- химическая стойкость к средам полости рта;
- высокие физико-механические свойства (прочность, твердость, усталостная прочность, упругость, теплостойкость);
- хорошие технологические свойства (хорошая текучесть и малая усадка);
- иметь цвет, соответствующий замещаемым тканям.

Технологические свойства материалов.

Текучесть – это способность материала в жидком пластифицированном или расплавленном состоянии заполнять тонкие места литьевой или прессовочной формы. В ортопедической стоматологии это свойство материалов чрезвычайно важно при получении литых деталей. Текучесть металлов определяют по полноте заполнения спиралеобразного витка литьевой формы.

Усадка – это уменьшение объема отливки или отпрессованной детали при охлаждении материала или затвердения его при переходе из одного состояния в другое. Усадка характеризуется процентом уменьшения объема изделия по отношению к модели. Она зависит от свойств материалов, степени их нагрева и охлаждения. Понятно, что усадку необходимо учитывать в процессе изготовления зубных протезов.

Тепловое расширение материалов – это способность тел расширяться при их нагревании. Для количественной оценки этого свойства используются коэффициенты линейного и объемного расширения. Коэффициент линейного расширения определяется как удлинение, приходящееся на 1 мм длины при изменении температуры на 1 °С. Коэффициент объемного расширения равен утроенному коэффициенту линейного расширения.

Значение этих величин очень важно при выборе материалов протеза. Так, например, если коэффициент теплового расширения тканей коронки зуба в среднем равен $8 \cdot 10^{-6}$, золота – $14 \cdot 10^{-6}$, стали –

$11 \cdot 10^{-6}$, то коэффициент теплового расширения акриловой пластмассы равен $81 \cdot 10^{-6}$, то есть в 10 раз больше, чем у тканей зуба и в 6 раз больше, чем у золота. Поэтому при воздействии и быстрой смене температур протезы и ткани зуба могут повреждаться из-за сил, возникающих при расширении.

Химические свойства

Под этими свойствами материалов понимают их отношение к другим химическим веществам и, в частности, их поведение в различных средах: кислотах, щелочах, растворах солей, воде и на воздухе.

Если материал протеза будет вступать во взаимодействие с жидкостями полости рта, то они будут разрушаться, образующиеся в результате реакции вещества, попадая в организм, могут оказывать на него вредное взаимодействие. Поэтому основным требованием, предъявляемым к материалам протеза, является его абсолютная стойкость к средам, идентичным средам полости рта.

Наибольшей химической стойкостью в полости рта обладают сплавы благородных металлов, нержавеющая сталь, пластмассы на основе акрилов.

Разрушение металлов может наступить в результате электрохимической коррозии. Каждый металл посылает в раствор положительно заряженные ионы, заряжаясь при этом отрицательно. Причем все металлы выделяют в раствор различное количество ионов, в результате чего при помещении в электролит приобретают различные потенциалы. Поэтому при соединении разнородных металлов и наличии электролита образуются гальванические пары. В этих парах металл с низким электрическим потенциалом является анодом и разрушается, переходя в раствор. Это свойство металлов необходимо учитывать при составлении сплавов, так как структурные составляющие сплавов замкнуты через всю массу металла и образуют таким образом большое количество микроэлементов. При этом, чем выше кислотность слюны (рН), тем больше ЭДС гальванического элемента.

Слабые гальванические токи порядка 40–70 мкА не только вызывают электрохимическую коррозию, но обуславливают хроническое раздражение слизистой оболочки полости рта. На коррозионную стойкость существенное влияние оказывает шероховатость обработанной поверхности, с уменьшением которой стойкость возрастает.

В процессе изготовления протезов используется много вспомогательных материалов: слепочные материалы, гипс, воски, пластмассы, легкоплавкие сплавы, цементы, огнеупорные массы, абразивные и полировочные материалы, кислоты и паяльные средства.

Получение слепка и модели зубного ряда

Для изготовления зубного протеза необходимо получить с тканей будущего протезного ложа (под тканями протезного ложа, или поля, следует понимать те участки слизистой оболочки и костного остова полости рта и челюстно-лицевой области, которые будут покрыты протезом или же соприкоснуться с его краями) точный слепок и по нему создать рабочие модели.

Слепок – это негативное изображение рельефа тканей протезного ложа и прилежащих к нему участков полости рта.

Модель – это позитивное изображение рельефа тканей протезного ложа и прилежающих участков полости рта, воспроизведенных по слепкам.

В зависимости от конструкции протеза для его изготовления получают слепки с зуба, зубного ряда и альвеолярного отростка, отдельных участков мягких тканей полости рта и челюстно-лицевой области.

Для получения слепка с тканей протезного ложа применяют слепочные материалы – медицинский гипс и различные пластические массы. Слепок может быть получен при помощи одного из слепочных материалов или их сочетания, например, гипса и пластмассы. Для введения слепочных масс в полость рта используют специальные слепочные ложки. Жесткое ложе ложек позволяет точно сохранить форму затвердевшего слепочного материала или собрать части слепка после его выведения из полости рта.

Слепочные ложки бывают стандартные и индивидуальные. Стандартные ложки изготавливают из различных металлов (алюминий, сталь), пластмассы. Ложки выпускаются различных размеров (№ 1, 2, 3, 4 и 5), отдельно для верхней и нижней челюсти.

Слепочная ложка (рис. 7.1) состоит из ручки 1, бортов 2, ложа для зубов 4, свода у ложки для верхней челюсти 5 и выреза для языка у ложки для нижней челюсти 3.

Выпускают стандартные ложки различных форм и размеров (№ 7, 8, 9, 10) для получения слепков с беззубых челюстей. Эти

ложки отличаются тем, что имеют суженное, округлой формы ложе для альвеолярного отростка.

Для получения слепков с помощью эластических масс выпускают ложки, имеющие на поверхности отверстия, способствующие закреплению массы в ложке при выведении слепка. Для этих целей наиболее удобны ложки из пластмасс. Если использовать обычные ложки, то края ее бортов должны быть предварительно обклеены неширокой лентой липкого пластыря.



Рис. 7.1. Фотография слепочных ложек:
а – для нижней челюсти; *б* – для верхней челюсти;
в – для получения слепков с беззубых челюстей;
1 – ручка; *2* – борта; *3* – ложе для зубов; *4* – свод; *5* – вырез для языка

Получение слепка с челюстей состоит из следующих действий:

- подбор ложки;
- приготовление слепочной массы;
- наложение слепочной массы на ложку;
- введение ложки в полость рта;
- формирование краев будущего слепка;
- выведение ложки и слепка из полости рта.

На рис. 7.2 представлена фотография слепка зубного ряда, полученного с использованием эластичной массы.

Отливка моделей гипсом. Подготовленные гипсовые слепки, полученные термопластическими и эластичными массами, стряхивают для удаления излишков воды и заливают негусто размешанным гипсом. Слепки из эластических масс (рис. 7.2) необходимо предварительно промыть под струей холодной воды.



Рис. 7.2. Фотография слепка зубного ряда, полученного с использованием эластичной массы

Гипс для получения модели замешивают без добавления соли. Хорошо размешав гипс, накладывают небольшую порцию на выступающую часть (отпечаток свода неба, переходной складки с язычной стороны). Легким постукиванием слепка о край резиновой чашки перемещают эту порцию гипса в углубленные места (отпечатки зубов и альвеолярного отростка). Такое перемещение гипса обеспечивает медленное затекание в углубленные места и предотвращает образование в них воздушных раковин. Затем добавляют новую порцию гипса и опять распределяют по всей поверхности слепка.

Заполнив с некоторым излишком весь слепок, накладывают горкой оставшийся гипс на стеклянную или кафельную плитку, переворачивают ложку и прижимают ее к столу так, чтобы поверхность

ложки была параллельна поверхности стола. При этом следят, чтобы высота модели не была меньше 1,5–2 см. Шпателем сравнивают гипс вровень с краями слепка. К освобождению модели приступают после полного затвердения гипса.

При достаточном навыке одновременно можно отливать несколько моделей. В этом случае у всех слепков заполняют гипсом отпечатки зубов и альвеолярного отростка приемом, описанным выше. Затем последовательно в каждый слепок добавляют гипс, переворачивают и прижимают к столу и ориентировочно шпателем сравнивают края. Окончательную обработку краев модели ведут после того, как все слепки полностью заполнены гипсом.

Освобождение модели от слепка. Когда гипс модели полностью затвердел, спустя 1–2 часа после отливки от слепка отделяют ложку, срезают неровности гипса до обнаружения края слепка и начала рабочей части модели. Чтобы хорошо отличить гипс модели от гипса слепка, рекомендуется в клинке гипс для слепка замешивать на 1 % водном растворе фуксина. Для облегчения отделения кусков слепка от модели их погружают на 3–5 минут в кипящую воду. При этом за счет различной степени теплового расширения различных по толщине и объему масс слепка и модели происходит разделение этих двух слоев.

Освобождение модели начинают во всех случаях с вестибулярной стороны с самого маленького куска, который определяется по видимым линиям соприкосновения кусков. Удерживая в правой руке шпатель так, чтобы из-под большого пальца выступало 3–4 мм острия, вкалывают его в границу между моделью и слепком. Несколько продвинув скальпель вглубь (под контролем большого пальца), рычагообразным движением от модели отделяют кусок слепка. Таким образом освобождают всю вестибулярную часть слепка. Если на слепке имеется во фронтальном участке линия разреза, то в эту линию необходимо ввести брюшко шпателя, прижать большим пальцем левой руки и, повернув шпатель вокруг длинной оси, отколоть еще один кусок. Последовательно удаляя кусок за куском, освобождают всю вестибулярную часть модели.

Перед удалением кусков в области отпечатка небного свода верхней челюсти или язычной поверхности нижней челюсти необходимо удалить участки, охватывающие с боков гипсовые зубы. Затем крупные куски следует разделить на более мелкие, нанеся на поверхности клиновидные вырезки. Эти вырезки наносят в области

клыков, а на модели верхней челюсти при высоком своде неба эту вырезку дополнительно соединяют поперечной вырезкой. Сделав вырезку, наносят легкие удары молоточком по свободному краю куска по направлению от зубов внутрь. Молоточком постукивают до тех пор, пока кусок не начнет отходить от модели. В этом случае, если кусок не отходит, делают дополнительные вырезки или углубляют и расширяют прежние.

Освобожденную модель аккуратно обрезают по краям, не нарушая целостности переходной складки. В последнее время этот трудоемкий процесс значительно облегчен применением моторов для обрезки моделей. У модели нижней челюсти выемки с язычной стороны делать не следует, чтобы не ослабить ее.

Освобождение модели беззубой челюсти после помещения в кипящую воду следует начинать с легкого постукивания по поверхности слепка. При этом гипс дает трещины и его легко удалить. Те куски, которые не отошли от модели при постукивании, удаляют шпателем приемом, указанным выше. При освобождении модели с беззубой челюсти следует помнить, что гипс слепка имеет очень небольшую толщину, разную на отдельных участках. Поэтому действия шпателем должны быть очень легкими, чтобы не повредить поверхность модели.

Освобождение модели от слепка из термопластических масс не представляет трудностей. Слепок и модель помещают в теплую воду (не выше 60°) и держат 5–7 минут. За это время масса прогреется, станет пластичной. В более горячую воду помещать не следует, так как масса расплавится и часть ее может впитаться в гипс. Поддев край ложки шпателем, приподнимают массу сначала с одной, потом другой стороны. Если масса сильно разогрелась, ее можно слегка охладить.

Для того чтобы очистить модель от остатков массы, к ним прижимают кусочек размягченной массы и отрывают ее от модели. Очень гонкие слои массы хорошо смываются эфиром или бензином.

Отделение слепка из эластичных масс сводится к медленному стягиванию его с модели. Это легко удаётся, так как масса имеет резиноподобные свойства, которые сохраняются при хранении на воздухе до 2 часов. Поэтому слепок из эластичных масс рекомендуется отделять от модели через 30–40 минут после ее отлития. Если это время упущено, рекомендуется отделение слепка проводить постепенно, разрезая массу на куски.

После освобождения модели от слепочного материала производят ее оценку. Если при отделении слепка от модели отламывается гипсовый зуб, его можно приклеить к модели с помощью клея: насыщенного раствора целлулоида в ацетоне. Цементом склеивать не рекомендуется.

К другим недостаткам при получении модели следует отнести наличие воздушных раковин, посторонних включений в гипсе, повреждения поверхности модели шпателем, недостаточная толщина модели и, наконец, отлом альвеолярного отростка, а иногда и перелом модели.

В этих случаях рекомендуется вновь переснять слепок и изготовить новую модель.

Гипсовые модели имеют недостаточную прочность – они хрупки и легко поддаются истиранию. Поэтому для упрочнения гипсовой модели ее кипятят 5–10 минут в 20–30 % водном растворе буры. Для упрочнения поверхности модели достаточно смочить ее 2–3 раза горячим насыщенным раствором буры, нанося этот раствор на поверхность модели ватным тампоном.

Гипсовую модель повышенной прочности можно получить, отливая слепок мраморным гипсом.

Изготовление деталей протезов литьем

В настоящее время для изготовления деталей протезов из сплавов металлов, как правило, применяется метод литья по выплавляемым моделям, который имеет две разновидности:

- метод литья по выплавляемым моделям моделированного воска в формах из огнеупорного материала;
- метод литья по выплавляемым моделям на огнеупорных моделях, помещенных в формы из огнеупорного материала.

Процесс литья включает в себя ряд следующих последовательных операций:

- изготовление восковых моделей деталей (в случае литья на огнеупорных моделях предварительное получение таковых);
- установка литникообразующих штифтов и создание литниковой системы;
- покрытие моделей огнеупорным облицовочным слоем;
- формовка модели огнеупорной массой в муффеле;
- плавление воска;

- сушка и обжиг формы;
- плавка сплава;
- освобождение деталей от огнеупорной массы и литниковой системы.

Самым важным вопросом при литье зубопротезных деталей является борьба с усадкой сплавов и восковых композиций. У восковых композиций она составляет 0,5–2 %, у нержавеющей стали – 1,1–1,25 %, у золотых сплавов – 1,25 %.

Усадка восковых композиций уменьшается путем создания новых смесей, а также моделировкой деталей не из расплавленной смеси, а из размягченной.

Усадку сплавов компенсируют с помощью специальных формовочных масс, которые имеют двойной коэффициент расширения в процессе затвердевания (0,8–1 %) и свойственное всем телам тепловое расширение при нагревании (0,6–0,75 %). Чем больше удастся уравновесить процент усадки восковых смесей и сплавов металлов расширением формовочных масс, тем точнее и качественнее получается литье.

Изготовление восковых моделей производится на основе получения вначале слепка, затем модели зубного ряда или зуба (гипсовые модели). На гипсовой модели воспроизводят восковые модели требуемых элементов зубного протеза.

Установка литникообразующих штифтов и создание литниковой системы

Литниковая система представляет собой каналы, по которым жидкий металл подводится к отливке. Она создается путем подвода к восковой модели литникообразующих штифтов. Эти штифты могут быть металлические и восковые или их сочетание.

Построение литниковой системы в точном литье по выплавляемым моделям определяется следующими принципами:

- все участки отливки должны находиться в равных условиях при литье;
- все толстостенные участки отливки должны иметь дополнительные депо жидкого металла для устранения усадочной раковины, рыхлости и пористости в металле;
- к тонким участкам отливок должен быть подведен наиболее горячий металл.

Направление литьевых каналов должно соответствовать направлению полого пространства, чтобы расплавленному металлу не приходилось менять направление, а применяемая при литье центробежная сила способствовала уплотнению металла. На рис. 7.3 показано расположение и ширина литьевых каналов при литье коронок (а) и при литье тела мостовидного протеза (б).

Расплавленный металл по возможности должен течь от толсто-стенных участков к тонким. Если деталь имеет несколько толсто-стенных участков, связанных посредством тонкостенных, то каждый толстостенный участок должен иметь свой литьевой канал (литник, образующий штифт).

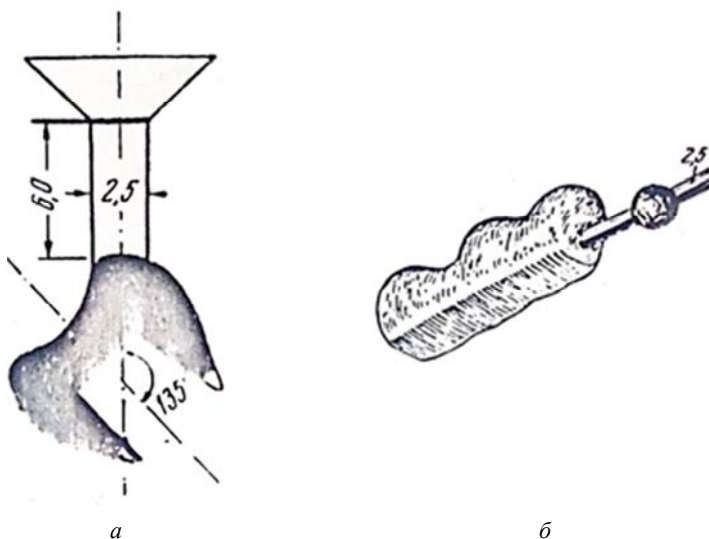


Рис. 7.3. Расположение и ширина литьевых каналов (а) и тело мостовидного протеза (б)

Толщина литникообразующего штифта даже у маленькой отливочной детали должна быть не 0,5 мм. При этом, чем толще или чем больше ее протяженность, тем большее количество литников с большим диаметром должно быть к ней установлено.

Когда приходится отливать сразу много деталей приблизительно одного и того же объема, штифты устанавливают следующим образом (рис. 7.4).

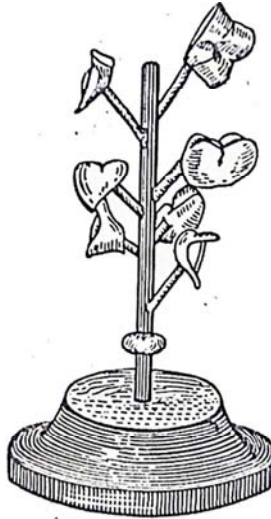


Рис. 7.4. Установка литникообразующих штифтов при одновременной отливке большого количества заготовок

На центральный металлический штифт диаметром 3–4 мм в разных направлениях «елочкой» приклеивают восковые штифты диаметром 1,5–2 мм и длиной 5–6 мм. Затем к каждому восковому штифту подводят смоделированную деталь и слабо разогретым шпателем, расплавляя воск штифта (а не модели), приклеивают к восковому штифту.

Качество деталей может существенно пострадать из-за образования усадочных раковин. Дело в том, что отлитый в форму металл начинает затвердевать с наружных слоев и некоторое время поверхность отливки представляет собой как бы твердую кору, под которой имеется жидкий металл. При этом раньше затвердевает остаток металла, находящийся над поверхностью формы. Сокращаясь при охлаждении, он втягивает в себя частицу еще расплавленного металла, находящегося в глубине, или, уменьшаясь в объеме, не заполняет целиком всего пространства формы.

Чтобы избежать образования усадочных раковин и снизить степень усадки детали, создают депо металла вне пределов детали, так называемые «муфты». Усадочные раковины как бы перемещаются в эти «муфты», так как они дольше всего являются резервуаром

расплавленного металла, и застывающее изделие и остаток металла на поверхности словно втягивают из «муфты» в себя застывший металл. На рис. 7.5, а показана отливка без компенсирующей «муфты».

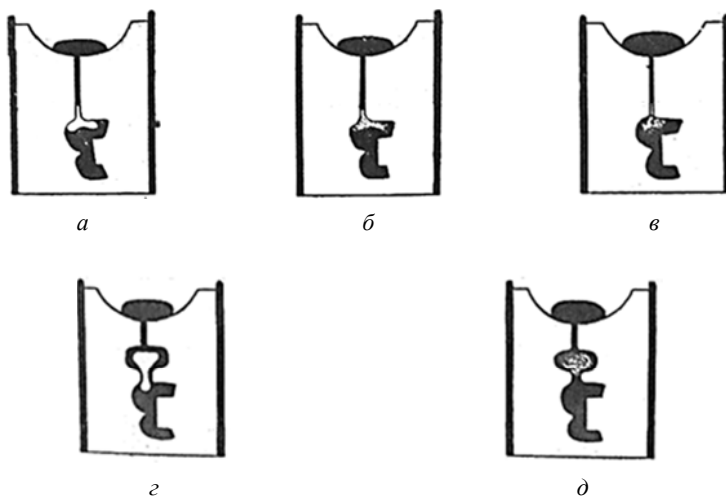


Рис. 7.5. Схемы, поясняющие принцип устранения усадочных раковин на отливке, путем создания депо металла вне пределов детали (муфты)

Светлая часть отливки под литником – участок незатвердевшего металла. По мере дальнейшего затвердевания в этом участке концентрируется усадка, выявляемая после извлечения детали в виде углубления на поверхности (рис. 7.5, б, в). На рис. 7.5, г, д показано, как с помощью муфты компенсируется усадка. Внутренняя часть «муфты» и прилегающей к ней части отливки еще не затвердела. При дальнейшем охлаждении отливка втягивает еще не затвердевший металл из «муфты» и тем самым усадка как бы перемещается в «муфту». «Муфта» обязательно должна быть нанесена на каждый литникообразующий штифт. Это делается либо путем постепенного наложения по каплям расплавленного воска и применения штифта с предварительно изготовленной муфтой.

После установки литникообразующих штифтов приступают к созданию литейной формы.

Изготовление облицовочного слоя литейной формы

Литейные формы изготавливают из формовочных смесей, в состав которых входят гипс, огнеупорные (корунд, кварц) и связующие материалы. Смесь должна обладать следующими свойствами: быть пластичной, прочной, газопроницаемой и огнеупорной.

Формы в точном литье делают двухслойными. Внутренний слой формы, называемый облицовочным, который непосредственно соприкасается с расплавленным металлом и поэтому должен быть высокоогнеупорным, прочным и газопроницаемым, должен точно копировать модель. Назначение другой части формы – упрочнение облицовочного слоя, и она также должна быть газопроницаемой, достаточно прочной и огнеупорной.

Все облицовочные материалы в точном литье по выплавляемым моделям состоят из порошка-наполнителя и жидкости – склеивающего, связующего вещества. В качестве наполнителя для облицовочного слоя формы применяют огнеупорные материалы, представляющие собой мелкодисперсный порошок: маршаллит (мелкий помол природного кварцита – SiO_2 или чистого кварцевого песка), корунд (окись алюминия), электрокорунд. Все эти материалы не обладают пластичностью, потому в состав облицовочных масс вводят связующие вещества – высокомолекулярные кремнистые соединения – этилсиликат и жидкое стекло.

Облицовочный слой со связующим жидким стеклом имеет следующий состав: 50–60 % маршаллита, 40–50 % жидкого стекла. Процесс его нанесения на модель состоит в следующем. Модель или блок моделей из воска погружают в подготовленную смесь наполнителя и связующего. Для нанесения первого слоя их погружают в смесь 3–6 раз. После последнего погружения излишкам смеси дают стечь и модель обсыпается сухим кварцевым песком, чтобы закрепить нанесенную облицовку.

Сушка облицовочного слоя может осуществляться при температуре 20–22 °С в течение 1,5–2 часов.

Формовка выплавляемых моделей

При заливке формы жидким металлом, стенки формы испытывают большое давление струи металла, поэтому необходимо облицовочный слой упрочнить огнеупорными наполнительными смесями. Для этого подготовленную форму и опору устанавливают на

вибратор, заполняют почти на всю высоту формовочной массой, после чего включают вибратор и уплотняют смесь. В качестве формовочной смеси служит смесь речного песка с борной кислотой (90 частей песка и 10 частей борной кислоты) и гипсом в соотношении один к одному.

Выплавление модельной массы

После того как формовочная масса затвердеет осуществляется выплавление модельной массы. Эта операция может осуществляться в муфельных печах при температуре 40–60 °С, которая поднимается в течение часа до 150–200 °С. При этом воск расплавляется и вытекает через литниковые отверстия, которые должны быть установлены вниз или наклонны.

Выплавку модельной массы можно вести горячей водой. Для этого в проволочной сетке заформованную деталь помещают в ванну с горячей водой и кипятят 5–10 минут. Воск расплавляется, вытекает из формы и всплывает на поверхность воды. После этого форму подсушивают на воздухе 20–30 минут.

Сушка и обжиг формы

Так как форма содержит около 30–40 % влаги, процессу обжига предшествует сушка для удаления влаги. Сушку необходимо проводить медленно во избежание образования большого количества пара. В начале поддерживают температуру меньше 100 °С, затем ее медленно поднимают и доводят до 900–950 °С, проводя обжиг формы. Обжиг необходим для выжигания остатков воска, повышения газопроницаемости формы и создания высокой температуры внутри формы и литниковой системы, для лучшей текучести металла и заполнения тонкостенных участков формы. Обжиг формы ведут до тех пор, пока стенки литниковых каналов не станут красными. Затем осуществляют заливку расплавленного металла.

После охлаждения и затвердения металла изготовленную деталь протеза освобождают от формы, путем разрушения последней. Обработку полученных отливок начинают с удаления литников, а затем осуществляют обработку по контуру.

Технология изготовления несъемных протезов зуба

К несъемным протезам зуба и зубного ряда относятся протезы, которые фиксируются на коронках естественных зубов или их корнях с помощью специальных цементов. При изготовлении несъемных протезов во всех случаях приходится сошлифовать (препарировать) твердые ткани естественного зуба.

Вкладка – протез, применяемый для восстановления частично нарушенных тканей естественного зуба и в качестве опорной части мостовидного протеза. Вкладки изготавливают из металла и пластмассы, металла и фарфора.

Протезирование зубов вкладками состоит из ряда клинических и лабораторных этапов.

Последовательность изготовления вкладок

1. Формирование полости в зубе.
2. Получение слепка и затем модели зуба и зубного ряда.
3. Получение восковой репродукции вкладки.
4. Перевод репродукции из воска в металл, в случаях изготовления вкладки из фарфора – обжиг фарфоровой массы.
5. Проверка точности изготовления вкладки и фиксация ее в полости зуба.

Полукоронка – представляет собой несъемную конструкцию протеза, покрывающую естественный зуб с оральной боковых и жевательных поверхностей. Полукоронка может применяться и как опорная часть мостовидного протеза для хорошего косметического эффекта. Изготавливают полукоронки из золотоплатинового сплава или нержавеющей стали.

Последовательность изготовления полукоронки

1. Подготовка естественного зуба.
 2. Получение слепка с зуба и зубного ряда.
 3. Получение модели и обработка модели зуба.
 4. Моделирование восковой репродукции полукоронки.
 5. Замена репродукции из воска металлом.
- Подготавливая под зуб полукоронку, врач препарировывает боковые, язычную и жевательные поверхности. Затем создает на боковых поверхностях строго параллельные пазы. Фиксация полукоронки обеспечивается этими пазами и точностью ее изготовления.

Искусственная коронка – протез для восстановления разрушенной естественной коронки зуба. Искусственной коронкой часто покрывают и здоровые зубы, если в зубном ряду имеется дефект и его устраняют положением мостовидного протеза. Изготавливают искусственные коронки из сплавов металлов, пластмассы, фарфора или комбинации этих материалов.

Последовательность изготовления коронок

1. Получение моделей зубов и челюстей и фиксация их в окклюдаторе.
2. Моделирование зубов.
3. Получение восковой композиции коронок.
4. Отливка коронок.
6. Шлифовка и полировка коронок.

Моделирование воском формы коронок зуба на моделях осуществляется следующим образом. Во-первых, задачей моделирования на культе зуба модели является восстановление анатомической формы, которая была нарушена не только патологическим процессом в твердых тканях зуба, но и препарированием зуба под коронку.

Чтобы выполнить одно из основных требований, предъявляемых к коронке, именно плотно охватит шейку зуба, врач путем препарирования придает коронковой части цилиндрическую форму как показано на рис. 7.6.



Рис. 7.6. Формы зубов до (а) и после (б) препарирования под искусственные коронки

Моделируют форму зуба на модели с помощью моделировочного воска путем постепенного наслаивания его на гипсовую культю

зуба и последовательного восстановления всего рельефа и формы коронковой части зуба, начиная с вестибулярной, затем язычной, жевательной и боковых поверхностей.

При этом смоделированный зуб по объему должен быть меньше восстановленного на толщину металла (0,2–0,3 мм). Для этого, получив модель гипса, а также с целью компенсации усадки металла эти модели покрывают слоем лака или нитрокраски. Затем производят моделирование анатомической формы зуба постепенным наслаиванием воска. После чего в каждую смоделированную коронку устанавливают литникообразующий штафт или несколько штафтов. Затем взявшись за штафт или штафты восковую заготовку осторожно снимают с модели. Для снятия внутренних напряжений в восковой композиции возможно загрузить ее в воду температурой 45–40 °С. После этого получают форму и льют коронку. После литья ее подгоняют по модели, обрабатывают и передают на установку. Окончательное закрепление коронки или мостовидного протеза в полости рта осуществляют с помощью специальных цементов.

Технология изготовления съемных протезов

Съемные протезы применяются при любых дефектах зубных рядов и при наличии единственного зуба на челюсти.

Съемные пластиночные протезы, замещающие дефекты зубных рядов, состоят из базиса 1 (основания), опирающегося на альвеолярный отросток и тело челюсти, а на верхней челюсти и на твердое небо, искусственных зубов 2, восполняющих дефекты зубного ряда, и приспособлений 3 (кламмеров) для удержания протезов во рту. На рис. 7.7, а показаны дефекты зубного ряда на челюсти, а на рис. 7.7, б – конструкция съемного протеза, восполняющего эти дефекты.

К таким приспособлениям относятся кламмеры, балки с фиксаторами.

Базис протеза изготавливают из пластмассы или металла и через него жевательное давление от искусственных зубов передается на слизистую оболочку альвеолярного отростка и твердого неба, а через них на надкостницу и челюстную кость.

Изготовление пластиночных протезов для замещения дефектов зубных рядов включает в себя следующие основные этапы:

1. Отливка моделей из гипса и изготовление восковых базисов.

2. Укрепление гипсовых моделей в окклюдаторе, изготовление кламмеров или других приспособлений для удержания протеза и постановка искусственных зубов на восковом базисе.

3. Окончательное моделирование базисов протеза, гипсовка протезов, замена воска пластмассой, полимеризация, шлифовка и полировка протеза.

4. Окончательная обработка протеза и установка его в полости рта.

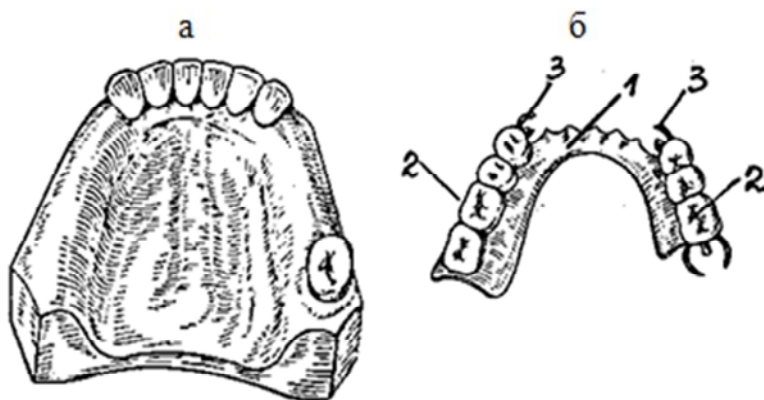


Рис. 7.7. Съёмный пластиночный протез с указанием его элементов:
1 – базис; 2 – искусственные зубы;
3 – приспособления для закрепления протеза во рту

Наиболее распространенными процессами для фиксации и стабилизации протезов в полости рта являются кламмеры. Под фиксацией протеза понимают его удержание в полости рта в состоянии покоя, при разговоре, а под стабилизацией – удержание протезов в полости рта во время жевания.

Кламмер – слово немецкого происхождения, означающее крючок. Кламмеры различают (рис. 7.8):

- по материалу: металлические, пластмассовые или их сочетание;
- по методу прилегания: зубные, десневые (килоты) и зубодесневые;
- по форме: круглые, полукруглые и ленточные;
- по методу изготовления: штампованные, гнутые и литые;
- по функции: удерживающие, опорные и опорноудерживающие;
- по охвату зуба: одноплечие, двухплечие, кольцеобразные и много звеньевые.



Рис. 7.8. Фотография съемных протезов

Кламмеры изготавливают их хромоникелевых, хромокобальтовых и золотоплатиновых сплавов путем выгибания или литья. Фиксация и особенно стабилизация съемных протезов зависят от количества опорных зубов, расположение кламмеров в протезе и топографии дефектов зубного ряда.

Медицинская промышленность выпускает стандартные заготовки для проволочных кламмеров диаметров от 0,5 до 1,2 мм. При этом один конец кламмеров расплюснут и имеет насечки для фиксации в пластмассе базиса. Кроме того, может применяться проволока из золота 750 пробы или сплава золота и платины.

Кламмеры выгибают при помощи круглогубцев, фасонных щипцов по зубу гипсовой модели.

Технология изготовления бюгельных протезов

Они также относятся к группе съемных протезов. Их конструкция позволяет восстанавливать откусывание и разжевывание пищи. При этом давление распределяется между оставшимися зубами и слизистой оболочкой с подлежащей костной тканью беззубых участков альвеолярного отростка.

Вариантов бюгельных протезов очень много, и они зависят от топографии дефектов зубных рядов. Основной особенностью этих видов протезов является металлический каркас и базис с искусственными зубами, выполненный из пластмассы. Металлический каркас состоит из дуги (дуга по-немецки – бюгель), участков для фиксации базиса и кламмеров опорноудерживающего типов рис. 7.7.

Цельнолитой каркас, как правило, изготавливается по технологии по выплавляемым моделям. Последовательность изготовления бюгельного процесса включает в себя следующие операции:

1. Получение рабочей модели из гипса.

2. Разметка рисунка кламмеров на опорные зубы.
3. Нанесение рисунка дуги, удерживающей части каркасного базиса.
4. Моделировка из стандартных восковых заготовок каркаса протеза.
5. Установка литниковых штифтов.
6. Снятие восковой репродукции с модели.
7. Нанесение облицовочного слоя литейной формы.
8. Формовка выплавленной модели огнеупорными наполнительными массами.
9. Выплавление воска, сушка и обжиг формы.
10. Процесс литья.
11. Удаление литниковой системы и обработка каркаса.
12. Наложение каркаса на рабочую модель, уточняющая обработка и полировка.
13. Изготовление из воска седловидной части базиса и постановка искусственных зубов.
14. Замена воска пластмассой, полимеризация и обработка пластмассы.
15. Установка протезов в полости рта.

Порядок выполнения работы

Получение модели зубного ряда

1. Получить у преподавателя или инженера слепочные ложки, деревянные шпатели, столовую ложку слепочной массы, медицинский гипс и емкости для разведения водой слепочной массы и гипса, съемный протез, керамическую плиту и нож.
2. Насыпать в емкость (стакан) 3–4 столовые ложки слепочной массы и, постепенно добавляя в нее воду и постоянно перемешивая, получить консистенцию раствора, близкую к консистенции сметаны.
3. Положить слепочную ложку на керамическую подставку и с помощью деревянного шпателя заполнить ее полученным раствором, как показано на рис. 7.9.
4. После этого, если студент желает получить слепок со своего зубного ряда, аккуратно ввести ложку в полость рта и сжать челюсти (рис. 7.10). Если такого желания у студента нет, то взять протез и приложить его рабочей стороной к слепочной массе в ложке.



Рис. 7.9. Положение слепочной ложки с заполненным слепочным материалом



Рис. 7.10. Процедура снятия слепка с верхней челюсти

5. По истечении 3–4 минут, необходимых для полимеризации слепочного материала, извлечь ложку из полости рта или аккуратно отделить протез от слепочного материала в ложке.

6. Исследовать состояние полученного слепка, обратив внимание на его четкость и отсутствие дефектов, рис. 7.11.



Рис. 7.11. Слпок зубного ряда

7. Смочить полученный слепок водой и установить его на керамическую подставку.

8. Насыпать в емкость медицинский гипс (0,5 стакана) и добавляя воду и постепенно перемешивая получить раствор, соответствующий консистенции жидкой сметаны.

9. Нанести первый жидкий слой раствора гипса на слепок и при этом, для удаления пузырьков и получения качественной модели, легко постукивать ложкой о край плиты (рис. 7.12).



Рис. 7.12. Первый слой гипса

10. После этого нанести следующий слой гипсового раствора, постукивая ложкой о край плиты.

11. После заполнения гипсовым раствором слепка до края бортов ложки сделать паузу на 3–4 минуты, необходимую для частичного застывания гипсового раствора.

12. Затем нанести несколько слоев гипсового раствора до получения высоты модели, превышающей край борта ложки на 15–20 мм (рис. 7.13).



Рис. 7.13. Заполненная гипсом модель

13. После этого ложку перевернуть и прижать слой гипса к поверхности керамической плиты, для получения плотного основания будущей модели зубного ряда.

14. По мере затвердевания гипса с помощью ножа (скальпеля) удалить излишки гипса, выходящие за контур слепочной ложки.

15. По истечении 20–30 минут, необходимых для затвердевания гипса, аккуратно отделить гипсовую модель от слепочного материала.

16. Исследовать состояние полученной модели и сделать ее фотографию (рис. 7.14).



Рис. 7.14. Полученная гипсовая модель

Получение восковой модели

1. Получить у инженера форму и резиновую пресс-форму и аккуратно наметить на ней контур модели. Резина является идеальным материалом для воспроизведения оригинальной модели. Она поставляется в сыром (невулканизированном) состоянии в виде листов от 5 до 30 мм, от которых отрезают куски нужного размера. От сортности и качества резины зависит коэффициент усадки: чем резина плотнее, тем меньше она сжимается при вулканизации.

2. Разрезать резину по контуру и разделить на 2 части (рис. 7.15).



Рис. 7.15. Контур вырезанной резины

3. Модель с припаянным литником помещается в рамку, поверх слоев резины так, чтобы конец литника касался внутренней стенки рамки. Затем рамку плотно заполняют листами резины так, чтобы количество слоев резины сверху и снизу рамки было одинаковым. Теперь резину, 1–2 слоя которой находятся выше уровня рамки, можно вулканизировать.

Вулканизатор – это электроприбор с двумя нагревательными плитами, прижимаемыми друг к другу с помощью винтового пресса (рис. 7.16).



Рис. 7.16. Форма и литниковый штифт

Алюминиевая рамка с упакованной в резину моделью (рис. 7.17) ставится между двумя алюминиевыми пластинами (резина, как и воск, к алюминию не прилипает) так, чтобы верхняя пластина едва касалась верхнего слоя резины. Затем прибор включают, и пластины начинают нагреваться и плавить резину. Когда резина начинает течь, винт подкручивают, сводя пластины ближе друг к другу, полностью сжимая уже вязкую резину вокруг модели и заполняя ей все пустоты и воздушные карманы внутри рамки. И так до тех пор, пока практически вся резина не уйдет в форму, а пластины не сомкнутся рамкой. После этого пресс-форма готова и представляет собой цельный кусок резины с запеченной внутри металлической мастер-моделью.

4. Готовность определяем следующим образом: если резина стала жесткой и не протыкается, то она готова. Вынимаем форму и даем остыть. После остывания аккуратно достаем резину из формы.



Рис. 7.17. Резина, уложенная в форму

5. Используя тиски и острый скальпель разрезаем модель на 2 части (рис. 7.18), обязательно совершая при этом зигзагообразные движения (это нужно для того, чтобы при заливке воска в форму она не проскальзывала). Достаем литниковый штифт. При разрезании скальпель обязательно должен касаться коронки. Берем мини плоскогубцы и достаем нашу металлическую коронку.



Рис. 7.18. Извлечение восковой модели

6. Для изготовления выплавляемых моделей используется специальный инжектор, который предназначен для расплавления воска, поддержания его температуры и подачи воска в пресс-форму передавливанием сжатым воздухом от встроенного насоса.

7. Соедините 2 части модели и аккуратно наденьте на инжектор воскоплавильной машины. Легко надавливая, заполните модель.

8. После остывания воска аккуратно открываем форму и достаем восковую модель.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Результаты получения гипсовой модели. Исследование ее состояния.
 - 4.2. Результаты получения восковой модели.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Классификация протезов зубов.
2. Материалы, применяемые в ортопедической технологии.
3. Технологические и химические свойства материалов.
4. Из каких действий состоит получение слепка с челюстей?
5. Как происходит изготовление деталей протезов литьем?
6. Как происходит установка литникообразующих штифтов и создание литниковой системы?
7. Как изготавливают облицовочный слой литейной формы?
8. Пояснить технологию изготовления несъемных протезов зубов.
9. Пояснить технологию изготовления съемных протезов.
10. Пояснить технологию изготовления бюгельных протезов.

Литература

1. Абакаров, С. И. Современные конструкции несъемных зубных протезов. – М. : Высшая школа, 1994.
2. Наумович, С. А. Ортопедическая стоматология. Протезирование съемными пластиночными и бюгельными протезами. – Минск : БГМУ, 2009. – 212 с.
3. Лукиных, Л. М., Жулев, Е. Н., Чупрунова, И. Н. Основы технологии зубного протезирования. – Н. Новгород : Изд-во НГМА, 2005.

Лабораторная работа № 8

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ЛИНЗ

Цель работы

1. Изучить назначение и геометрические параметры контактных линз.
2. Изучить материалы для изготовления контактных линз и предъявляемые к ним требования.
3. Изучить методы изготовления жестких и мягких контактных линз.
4. Провести эксперименты по получению макета линзы из парафина методом центробежного формования.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Образцы жестких и мягких контактных линз.
2. Устройство получения макетов контактных линз из парафина методом центробежного формования.
3. Измельченный парафин.
4. Отвертка.
5. Консистентная смазка и тампон для ее нанесения.
6. Емкость для заполнения горячей водой.

Теоретическая часть

Общие сведения о контактных линзах

Контактные линзы, которые непосредственно надеваются на глазные яблоки под веки, получили в последнее время широкое распространение для коррекции зрения при близорукости, дальнозоркости и астигматизме. Основное отличие зрения в контактных линзах, по сравнению с очками, состоит в отсутствии так называемого вертексного расстояния (расстоянием между линзой и глазом), которое для очков составляет порядка 12 мм (рис. 8.1).

Благодаря этому, размер изображения на сетчатке глаза при использовании контактных линз, в отличие от очков, не меняется, что делает возможным их применение при большой разнице в оптической силе обоих глаз. Кроме того, отличается от очков требуемая

для достижения оптической коррекции сила контактной линзы. Она меньше при использовании минусовых линз (при близорукости) и больше при использовании плюсовых линз (при дальнозоркости). Преимуществом контактных линз также является отсутствие ограничения поля зрения из-за очковой оправы.

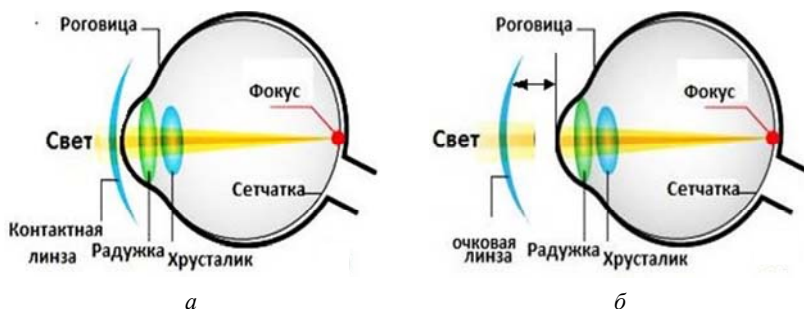


Рис. 8.1. Преломление света через контактную линзу (а) и через очковую линзу (б)

На рис. 8.2 показано сечение контактной линзы и приведены ее геометрические параметры.

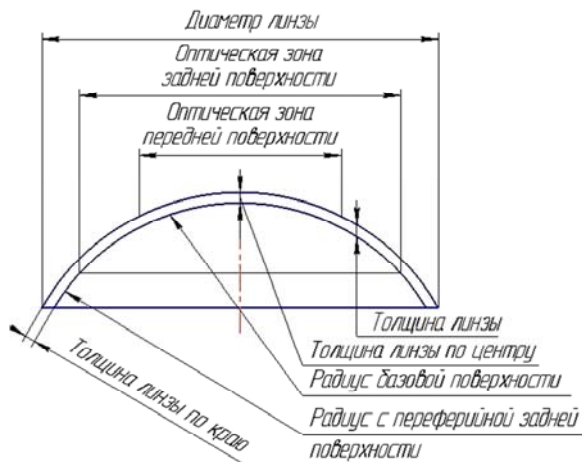


Рис. 8.2. Сечение контактной линзы и ее основные геометрические параметры

Геометрия задней поверхности линзы в значительной степени влияет на характер посадки на роговицу. В связи с тем, что роговица постепенно уплощается к периферии, для достижения оптимального соответствия между линзой и роговицей в линзе следует делать постепенный переход к более плоской форме. Как правило, это достигается созданием конструкций с одной или несколькими более плоскими периферическими поверхностями.

Оптическая зона задней поверхности – это центральная часть задней поверхности линзы, которая имеет форму круга, а ее размер определяет величину части линзы, используемой для получения изображения. Оптическая зона должна быть больше зрачка глаза. Так размер оптической зоны для типичной твердой линзы находится в пределах 7–9 мм, а для типичной мягкой – 7–13,5 мм.

Оптическая зона передней поверхности – это центральная оптическая часть передней поверхности линзы, ее размер лежит в пределах 7,5–10,5 мм.

Диаметр линзы обычно составляет 13–15 мм для типичной мягкой линзы и 8–10 мм для жесткой линзы. От диаметра зависит посадка и удобство ношения линзы.

Радиус периферической кривой задней поверхности может характеризоваться одним или несколькими значениями.

Ширина периферической кривой – это ширина периферической части задней поверхности линзы, которую называют также зоной скольжения контактной линзы.

Высота сегмента – это расстояние между плоскостью, касательной к наружным краям линзы и вершиной задней поверхности. Чем меньше радиус базовой кривизны, тем больше высота сегмента.

Толщина линзы по центру составляет обычно 0,035–0,5 мм для мягких линз и 0,08–0,12 мм для жестких линз.

Толщина линзы по краю составляет, как правило, 0,01–0,12 мм для мягких линз и 0,08–0,12 мм для жестких линз.

Конфигурацией края определяет удобство ношения и обращения с линзой.

В зависимости от профиля преломляющих поверхностей в оптической зоне контактные линзы можно разделить на 4 основных типа:

– линзы с двумя сферическими поверхностями применяются для коррекции сферической аметропии; при коррекции миопии радиус

первой поверхности больше радиуса второй, а при коррекции гиперметропии – радиус первой поверхности меньше радиуса второй;

– линзы со сферической задней и торической передней поверхностями применяются для коррекции остаточного астигматизма, когда имеется нейтрализация хрусталикового и роговичного астигматизма (последний не выше 2 дптр); контактная линза нейтрализует роговичный астигматизм, при этом начинает проявляться хрусталиковый астигматизм, который и корригируется торической поверхностью контактной линзы;

– линзы с торической задней и сферической передней поверхностью применяются при роговичном астигматизме глаза;

– линзы с обеими торическими поверхностями.

При контактной коррекции астигматизма необходимо обеспечить ориентацию линзы, в соответствии с положением главных сечений астигматического глаза. Линзы с задней торической поверхностью, используемые при значительной величине роговичного астигматизма, удерживаются в требуемом положении и не вращаются именно благодаря асферичности роговицы и задней поверхности линзы. Если базовая поверхность сферическая, то для удержания линзы создается балласт либо в виде призматического утолщения в нижней части линзы, либо включением металлической добавки в нижнюю часть линзы (рис. 8.3).

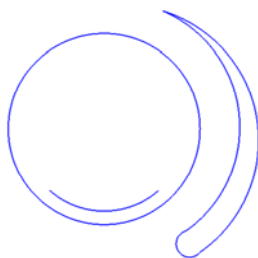


Рис. 8.3. Балласт в астигматических контактных линзах

Форма периферийной зоны контактной линзы определяется формой роговицы и удобством ношения. Необходимо, чтобы линза не оказывала давления на эпителий роговицы и не вызывала его травматизацию, поэтому форма базовой (задней) поверхности линзы на периферии за пределами оптической зоны является асфериче-

ской, имея в среднем меньшую кривизну, чем в оптической зоне. Различают линзы с двойной, тройной и множественной кривизной задней поверхности.

Передней поверхности периферийной зоны придают такую форму, чтобы получить примерно равную толщину на всей периферийной зоне. Особое внимание уделяется конфигурации края контактной линзы: тонкий пологий край повышает комфортность ношения.

Материалы для изготовления контактных линз и предъявляемые к ним требования

В зависимости от того из какого материала изготовлены контактные линзы они разделяются на *жесткие* и *мягкие*. В свою очередь жесткие линзы подразделяются на *газонепроницаемые* и *газопроницаемые*, а мягкие – на *гидрогелевые* и *силикон-гидрогелевые*.

Жесткие газонепроницаемые линзы изготавливают из полиметилметакрилата (ПММА), а жесткие газопроницаемые – из комбинации ПММА и кремнийорганических полимеров, хорошо пропускающих кислород. Они прочнее мягких и менее подвержены белковым отложениям.

Первые мягкие контактные линзы изготавливались из гидрогелевых полимерных материалов, в частности, гидроксипропилметакрилата (НЕМА). Эти полимеры обладают гидрофильностью, то есть способностью притягивать воду. Гидрогели хорошо совместимы с тканями глаза, насыщенные водой гидрогели очень мягкие, обладают хорошими оптическими свойствами. Кислородная проницаемость гидрогелей прямо пропорциональна содержанию воды в них. Причиной является то, что сам материал непроницаем для воздуха, а функцию переноса кислорода берет на себя содержащаяся в нем вода.

Для повышения содержания воды в состав НЕМА включают различные вещества, которые обеспечивают увеличение числа гидрофильных групп и поперечных сшивок у полимера. От их числа зависит способность гидрогеля всасывать воду и сохранять при этом свою структуру. Однако этого количества кислорода все же недостаточно для того, чтобы носить линзы длительное время. Поэтому они имеют только дневной режим ношения.

Силикон-гидрогелевые контактные линзы представляют собой комбинацию двух сополимеров – гидрогеля и силикона. Гидрогель является основой материала, а добавленный в химический состав

силикон – обладает гидрофильностью, то есть контактная линза уже содержит в себе воду. В связи с этим силикон-гидрогелевая линза пропускает значительно больше кислорода, что позволяет носить контактные линзы не только в дневное время, но непрерывно в течение недели, и глаза при этом не испытывают гипоксии (кислородного голода).

Материалы для изготовления контактных линз, в зависимости от содержания в них воды, делятся на 3 группы:

- с низким содержанием воды – до 45 %;
- со средним содержанием воды – 45–60 %;
- с высоким содержанием воды – более 65 %.

Следует отметить, что, чем больше содержание воды, тем, как правило, ниже прочность линзы. Жесткие материалы, такие как ПММА, обычно поглощают менее 2 % воды, чем и обусловлена их жесткость.

Линзы из материала с низким содержанием воды рекомендуют использовать при рефракции от -1 до -5 дптр. Эти материалы совместимы со всеми способами ухода за контактными линзами, включая тепловую обработку, обработку перекисью водорода, химическими дезинфектантами. Такие материалы поглощают мало белка, что удлиняет их срок службы. Линзы из такого материала имеют повышенную прочность на разрыв. По сравнению с линзами из материала с высоким содержанием воды. Поскольку материалы с низким содержанием воды не поглощают консерванты, то не возникает проблема с обесцвечиванием, как у материалов с высоким содержанием воды. Линзы из материала с низким содержанием воды могут изготавливаться токарной обработкой, литьем в форму и центробежным литьем.

Линзы из материалов с высоким содержанием воды имеют большую кислородную проницаемость и поэтому оптимальнее подходят для изготовления линз как больших рефракций, так и отрицательных. Линзы из таких материалов имеют более низкую прочность на растяжение. Эти материалы также отличаются худшей совместимостью с дезинфицирующими средствами. Материалы с высоким содержанием воды склонны к поглощению протеина это приводит к сокращению срока службы таких линз. Контактные линзы с высоким содержанием воды обычно изготавливаются токарной обработкой или литьем.

Линзы из материалов со средним содержанием воды разрабатываются с целью соединить в них преимущества материалов с низ-

ким и высоким содержанием воды. Обычно такие материалы имеют хорошие физиологические параметры, позволяют изготавливать тонкие удобные линзы. Недостатком материалов со средним содержанием воды является повышенное поглощение белка.

Показатель преломления линзы зависит от материала и находится в диапазоне между 1,33 и 1,55. Материал с высоким влагосодержанием обычно имеет более низкий показатель преломления. Линза из такого материала имеет большую толщину, чем линза равной оптической силы, но изготовленная из материала с меньшим содержанием воды.

Прозрачная оболочка глаза – *роговица* – является единственной частью человеческого тела, которая потребляет *кислород из атмосферного воздуха, а не из крови*. Наличие на ней контактной линзы неизбежно приводит к ограничению доступа кислорода к роговице, а также к затруднению удаления продуктов обмена веществ и, как следствие, к изменению обмена веществ в ней. Поэтому важной характеристикой линзы является *кислородопроницаемость*. Она определяется отношением объема кислорода прошедшего через единицу площади контактной линзы за единицу времени, обозначается DK (встречаются обозначения dK или Dk) и измеряется в $\text{см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Увеличение диффузии кислорода через контактную линзу достигается путем уменьшения ее толщины, увеличения влагосодержания материала и создание новых материалов с повышенным коэффициентом диффузии кислорода.

Для характеристики доступности кислорода к роговице применяют еще один показатель – *эквивалентную кислородную характеристику*. Как известно, в воздухе содержится около 21 % кислорода. Поэтому значение эквивалентной кислородной характеристики при отсутствии линзы на глазу принято 21 %. При ношении линзы эта характеристика может снижаться до 4 %. Измерения проводятся на живом глазу путем размещения на роговице датчика с кислородной камерой.

К числу важных характеристик материалов и особенно контактных линз относятся также биосовместимость, нетоксичность, устойчивость к раздражению микроорганизмов, устойчивость к образованию белковых отложений, смачиваемость (для жестких линз), легкость в обращении и легкость очистки и дезинфекции.

Технология производства контактных линз

Производство современных жестких и мягких контактных линз базируется на следующих основных технологиях:

- точение (токарная обработка);
- центробежное формование;
- литье;
- обратный реверсный процесс.

Изготовление контактных линз точением. Основным методом формирования таких линз является механическая обработка, включающая точение и последующее полирование их поверхностей. Технологический процесс состоит из следующих основных этапов:

- заготовительного;
- точение вогнутой поверхности линзы;
- ее полирование;
- точение выпуклой поверхности;
- ее полирование;
- контроля качества оптики;
- обработки края, окончательного контроля линзы и гравирования.

Заготовительный этап. Для изготовления жестких контактных линз используются цилиндрические заготовки из полиметилметакрилата диаметром 12–12,5 мм и толщиной 4–5 мм. Заготовки такого размера получают из листового материала путем их высверливания с помощью трубчатых инструментов. На этом же этапе для снятия внутренних напряжений осуществляют отжиг полученных заготовок. С этой целью их помещают в термощкаф, где они находятся в течение 8 ч при температуре 130–135 °С. Затем в течение последующих 8–10 ч температуру плавно снижают до комнатной.

Точение вогнутой поверхности. Предварительно с помощью специального наклейного воскового материала заготовку наклеивают (блокируют) в центре нагретой стальной подложки-спутника. Затем спутник с наклеенной заготовкой закрепляется в цанге специального сферотокарного станка (КП61) для точения вогнутой поверхности линзы. Схема точения представлена на рис. 8.4.

Обработка контактной линзы начинается с протачивания заготовки до заданного диаметра с припуском 0,1 мм на формирование края. Для этого используется стальной резец 5, установленный на поперечном суппорте станка. Далее с помощью алмазного резца 6, установленном на поворотном суппорте 7, начинают обработку во-

гнутой поверхности заготовки 4. Последняя установленная заготовка на спутнике 3, закрепленном в цанговом патроне 2 внутри шлифовальной головки 1.

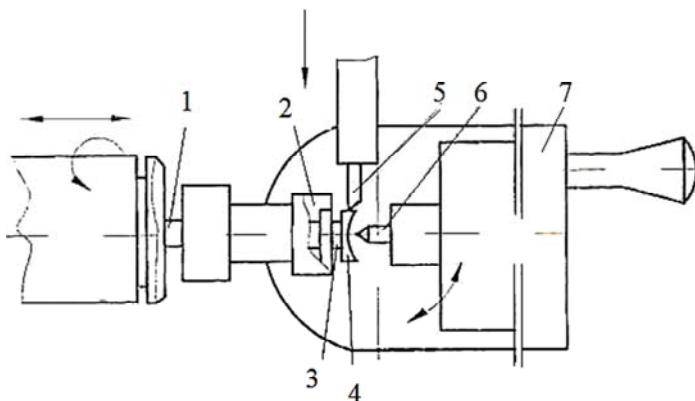


Рис. 8.4. Схема точения вогнутой поверхности линзы на станке КП61:
 1 – шлифовальная головка; 2 – цанговый патрон; 3 – спутник; 4 – заготовка;
 5 – стальной резец; 6 – алмазный резец; 7 – поворотный суппорт

Точение начинают с поверхности большего радиуса, в ходе которого производят несколько последовательных проходов с глубиной резания 0,2 мм для черновой обработки и с глубиной резания 0,01 мм для чистовой. После этого устанавливают требуемый радиус поворотного суппорта станка и осуществляют точение поверхности меньшего диаметра.

Полирование вогнутой поверхности. Эта операция начинается с полирования оптической зоны линзы. Сначала подготавливают к работе соответствующий полировальник. Для этого отлитую заготовку воскового полировальника устанавливают на сферотокарный станок КП62 (для обработки выпуклых поверхностей), на котором протачивают рабочую поверхность полировальника требуемого радиуса. Изготовленный притир-копировальник 2 (рис. 8.5) устанавливают на нижний шпиндель 1 доводочного станка. Приклеенную к спутнику 4 заготовку линзы 3 помещают на притир и удерживают поводком 5 верхнего шпинделя 6. Последнему помимо вращательного сообщается возвратно-качательное движение.

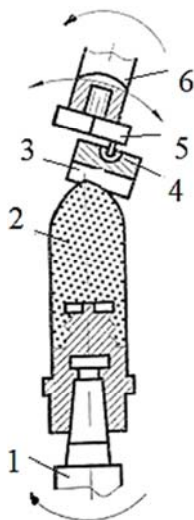


Рис. 8.5. Схема полирования вогнутой поверхности заготовки линзы:
 1 – нижний шпиндель; 2 – притир-копировальник; 3 – заготовка линзы;
 4 – спутник; 5 – поводок; 6 – верхний шпиндель

Полирование производится в течение 1–2 мин с применением полирующей суспензии. Периферийные зоны заготовки линзы полируют на вертикально шпиндельном станке с помощью специально изготовленных грибок, обтянутых медицинским лейкопластырем. Выбор радиуса соответствующего грибка производится с учетом толщины пластыря.

Точение выпуклой стороны. На предварительно нагретую оправку с центральным отверстием и радиусом, соответствующим радиусу оптической зоны заготовки, наносят наклейный воск и приклеивают заготовку со стороны обработанной вогнутой поверхности. С помощью специального приспособления заготовку центрируют на оправке с точностью 0,02–0,04 мм. После остывания оправку с отцентрированной на ней заготовкой линзы устанавливают на посадочный конус сферотокарного станка КП62 для обработки выпуклой поверхности. Точение осуществляется так же за несколько проходов (аналогично обработке вогнутой поверхности) до тех пор, пока в центре линзы будет достигнута заданная толщина, которая контролируется толщиномером.

Полирование выпуклой поверхности. Для этого вначале на сфероточном станке КП61 протачивают рабочую поверхность заготовленного притира-полировальника, радиус рабочей поверхности которого соответствует кривизне оптической зоны выпуклой поверхности линзы. Полирование этой поверхности производят на доводочном станке КП65 с применением полирующей суспензии (рис. 8.6).

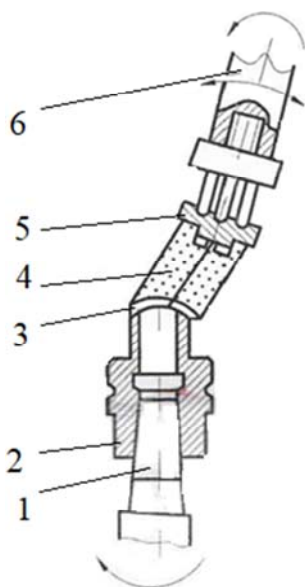


Рис. 8.6. Схема полирования выпуклой поверхности заготовки линзы:

1 – нижний шпиндель; 2 – оправка; 3 – заготовка;
4 – притир-полировальник; 5 – поводок; 6 – верхний шпиндель

Оправку 2 с наклеенной заготовкой 3 устанавливают на конус нижнего шпинделя 1 доводочного станка. На выпуклую поверхность линзы помещают притир-полировальник 4, смоченный полирующей суспензией. Три штыря поводка 5 верхнего шпинделя 6 фиксируют в лунках подложки притира. В процессе обработки верхнему шпинделю помимо вращательного сообщается возвратно-качательное движение. Продолжительность полирования 1–2 мин.

Обработка края. Эту операцию выполняют на специальном станке КП63, предназначенном для обработки края контактных линз.

Обрабатываемую заготовку 1 (рис. 8.7) центрируют и приклеивают выпуклой стороной к специальному спутнику 2 с помощью наклеенного воска. При этом диаметр спутника меньше общего диаметра линзы на величину выхода резца 4. При обработке переходной конической поверхности выпуклую поверхность линзы обрабатывают режущей кромкой резца. Поперечный суппорт 3 устанавливают таким образом, чтобы при обработке края получился необходимый диаметр линзы.

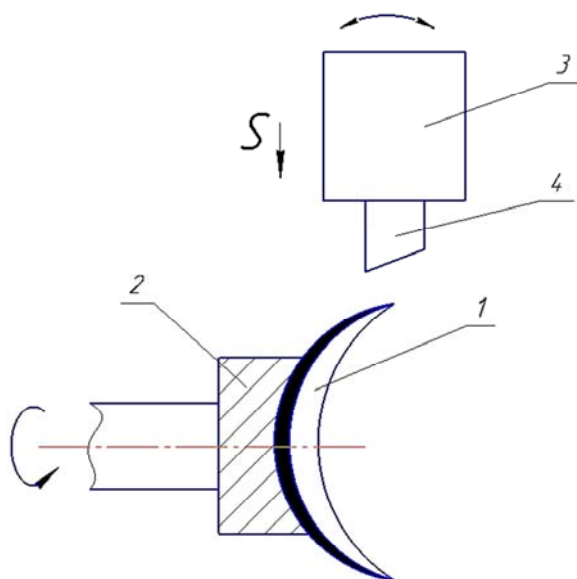


Рис. 8.7. Схема обработки края линзы на станке КП63:
1 – заготовка; 2 – спутник; 3 – поперечный суппорт; 4 – резец

Резец подводят к кромке линзы до касания под углом, обеспечивающим плавный переход внутренней поверхности к радиусу закругления. Далее поворотом суппорта край линзы закругляется и обрабатывается конус со стороны выпуклой поверхности линзы. Обработку осуществляют под микроскопом.

После формирования края на вертикальном шпиндельном станке или на шпинделе станка КП63 производят полирование края линзы фетром, смоченным полирующей суспензией.

Изготовление мягких контактных линз точением

Изготовление мягких контактных линз точением осуществляется на том же оборудовании, что и обработка жестких контактных линз. Однако имеется ряд специфических особенностей.

Во-первых, для изготовления мягких линз применяют высушенные цилиндрические заготовки диаметром $15 \pm 0,1$ мм и толщиной 5–6 мм. Высушенный гидрофильный материал в целях сохранения стабильности основных свойств должен содержаться в герметично закрытых футлярах-контейнерах.

При производстве мягких контактных линз необходимо поддерживать в рабочем помещении постоянную температуру (22 ± 2 °C) и влажность (45 ± 5 %) воздуха, что достигается установкой кондиционеров и вытяжек при закрытых дверях и окнах. Соблюдение этих условий является обязательным, т. к. гидрофильный материал адсорбирует воду из атмосферы помещения, набухает и изменяет свои свойства.

Во-вторых, линзы обрабатываются в сухом состоянии, а затем подвергаются гидратации. При этом размеры линзы в сухом состоянии и гидратированном существенно различны. Поэтому перед обработкой рассчитывают оптические и геометрические параметры линзы в жестком (сухом) состоянии, исходя из заданных параметров линзы в мягком гидратированном состоянии.

В-третьих, окончательный контроль готовых мягких контактных линз в гидратированном состоянии проводят в жидкой среде и недеформированном виде.

Формообразование заготовок в твердом состоянии, т. е. точение и полирование их поверхностей осуществляется таким же образом, как и для жестких линз.

После обработки и контроля линз в твердом состоянии их тщательно очищают и помещают в контейнер с физиологическим раствором и выдерживают там до полного набухания в течении 48 ч. После гидратации производят контроль геометрических и оптических параметров линзы в мягком состоянии.

Дезинфекцию проводят в течении 20 мин в 10%-м растворе перекиси водорода. Затем гидратированные линзы тщательно очищают и упаковывают.

Следует отметить, что линзы, изготовленные точением, как правило, несколько толще чем линзы, изготовленные другими методами, и вследствие этого имеют меньшую кислородную проницаемость.

Точение является более дорогостоящим методом, чем центробежное формование или литье. Однако этот метод эффективен при изготовлении небольших партий линз, линз со сложной геометрией или по индивидуальному заказу для конкретного пациента.

Изготовление мягких контактных линз методом центробежного формования

Специальная формочка 1 с вогнутым дном и цилиндрическими стенками заполняется необходимым количеством мономера 2 (рис. 8.8).

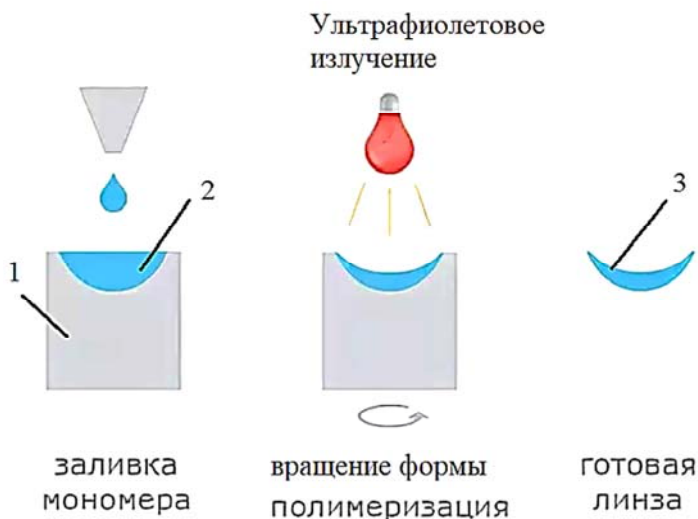


Рис. 8.8. Этапы изготовления мягкой контактной линзы центробежным формованием:

1 – формочка; 2 – мономер; 3 – готовая линза

В процессе ее вращения на специальной установке под действием центробежных сил состав растекается по ее внутренней поверхности. Полимеризация линзообразующей смеси осуществляется за счет ультрафиолетового излучения. После этого из формочки извлекается готовая линза 3. На параметры полученной линзы существенное влияние оказывают объем мономера и частота вращения формочки.

Центробежное формование является простым и дешевым методом изготовления мягких контактных линз. Оно обеспечивает хорошую воспроизводимость и стабильность параметров линзы и дает

очень тонкий и комфортный край. Линзы, полученные этим методом, имеют малую толщину и обладают асферической геометрией поверхности, хорошо соответствующей геометрии роговицы глаза. Кривизна линзы постоянно уменьшается от центра к периферии.

К недостаткам метода следует отнести невозможность получения линз со сложной геометрией, например, торических мягких контактных линз.

Изготовление мягких контактных линз литьем

По сравнению с точением, получение линз литьем является менее трудоемким. При больших масштабах производства этот метод позволяет изготавливать достаточно дешевые линзы.

Предварительно для каждого набора параметров линз изготавливается своя металлическая матрица. Далее по этой матрице изготавливаются формочки. На рис. 8.9 схематично представлены основные этапы изготовления мягких контактных линз литьем.

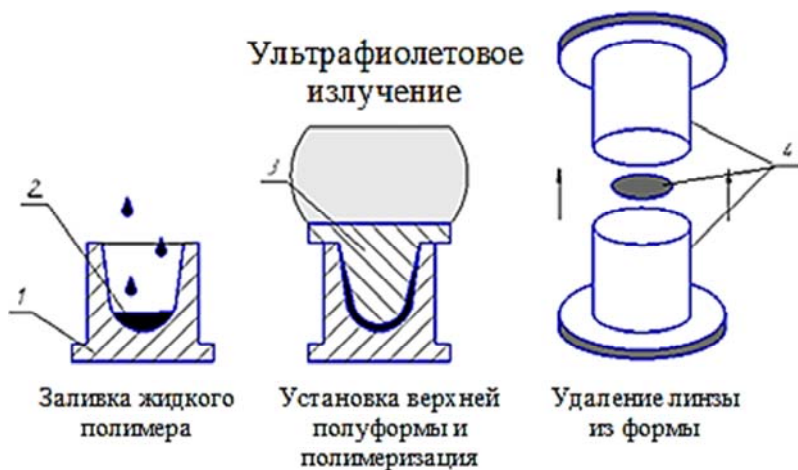


Рис. 8.9. Схематическое представление основных этапов изготовления мягких контактных линз литьем:

1 – нижняя часть формы; 2 – жидкий полимер;
3 – верхняя часть формы; 4 – полученная линза

В нижнюю половину формы 1 дозированно заливают жидкий полимер 2. Затем сверху внутрь этой половины формы вставляют

верхнюю часть формы 3. Образующаяся между ними формообразующая полость заполняется жидким полимером. После этого происходит облучение всей формы ультрафиолетовым излучением, в результате чего происходит полимеризация полимера, и полученная линза 4 удаляется из формы.

Преимуществами данного метода изготовления мягких контактных линз является:

- высокая стабильность повторения параметров линзы;
- возможность изготовления линз сложной геометрии (торические и др.);
- высокие оптические свойства линзы;
- низкая стоимость производства.

К недостаткам следует отнести трудности изготовления линз с большими диоптриями, возможна децентрация линзы.

Изготовление мягких контактных линз обратным реверсивным процессом

Обратный реверсивный процесс совмещает в себе две технологии: центробежного формования и точения. Свое название метод получил из-за того, что сначала изготавливается наружная, а затем внутренняя поверхность линзы. Наружную поверхность получают путем центробежного формования, внутреннюю – точением с последующим полированием. На рис. 8.10 схематично представлены основные этапы изготовления мягких контактных линз обратным реверсивным процессом.



Рис. 8.10. Схематическое представление основных этапов изготовления мягких контактных линз обратным реверсивным процессом.

Как видно, первых два этапа соответствуют центробежному формированию линзы, а остальные три – токарной обработке. Преимущество метода состоит в том, что передняя поверхность линзы получается более гладкой, чем при точении на токарном станке, что придает линзе высокие оптические характеристики, обеспечивает удобство ношения и идеальный профиль кромки. Задняя поверхность, полученная точением, обеспечивает хорошие функциональные качества, включая оптимальную подвижность и центровку. Кроме того, этим методом можно изготавливать линзы со сложной геометрией.

Описание экспериментальных установок

Устройство получения макетов контактных линз из парафина методом центробежного формирования

Принципиальная схема, поясняющая работу данного устройства, приведена на рис. 8.11.

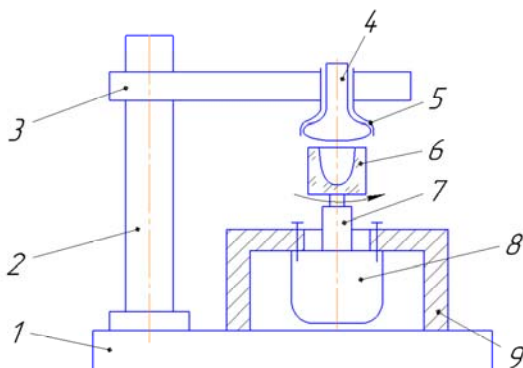


Рис. 8.11. Принципиальная схема устройства получения макетов контактных линз из парафина методом центробежного формирования:

- 1 – основание; 2 – вертикальная стойка; 3 – поперечный кронштейн;
4 – инфракрасная лампа; 5 – кожух; 6 – стеклянная формочка;
7 – стальная державка; 8 – электродвигатель; 9 – корпус

На массивном деревянном основании 1 смонтирован П-образный корпус 9. К верхней плите корпуса прикреплен электродвигатель 8 (СЛ-329), на валу которого по скользящей посадке установлена стальная державка 7 с закрепленной на ней стеклянной формочкой 6, имеющей вогнутое дно с цилиндрическими стенками (рис. 8.12).



Рис. 8.12. Фотография стальной державки с закрепленной стеклянной формочкой

На вертикальной стойке 2 с возможностью перемещения на ней и поворачиваться смонтирован поперечный кронштейн 3, на котором закреплена инфракрасная лампа 4 мощностью 250 Вт, имеющая кожух 5. Фотография общего вида устройства представлена на рис. 8.13.

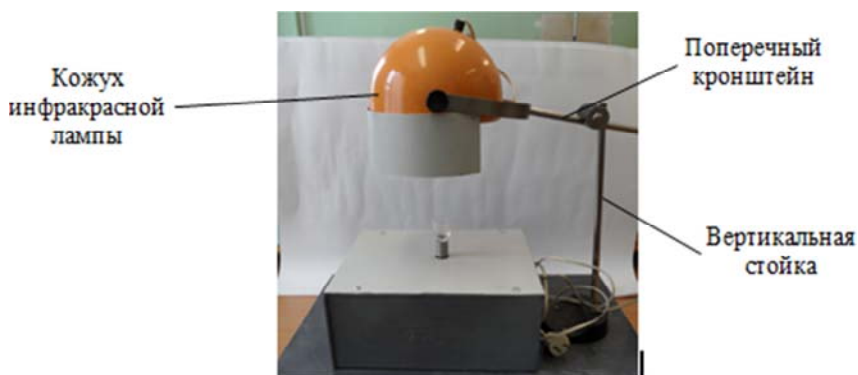


Рис. 8.13. Фотография общего вида устройства получения макетов контактных линз из парафина методом центробежного формования

Принцип работы устройства заключается в следующем. При неподвижном электродвигателе в формочку помещается дозированное количество парафина. С помощью лампы производится его плавление, формочке придается вращение. За счет центробежных сил расплав растекается по внутренней поверхности формочки, принимая

форму контактной линзы. После этого нагрев отключается, а охлаждение парафина происходит при продолжающемся вращении формочки. После затвердевания парафина, электродвигатель останавливается, державка с формочкой снимается с его вала, и полученный макет контактной линзы соответствующим образом из нее извлекается.

Порядок выполнения работы

Получение макета контактных линз из парафина методом центробежного формования

Для получения макета контактных линз из парафина методом центробежного формования выполнить следующие действия:

1. Получить у инженера образцы жестких и мягких контактных линз и изучить их конструкции.

2. С помощью ватного тампона тщательно протереть внутреннюю поверхность стеклянной формочки, закрепленной на стальной державке.

3. Смазать ватный тампон консистентной смазкой и нанести ее тонким слоем на внутреннюю поверхность стеклянной формочки.

4. Закрепить стальную державку со стеклянной формочкой на валу электродвигателя.

5. Заполнить мерную ложку (рис. 8.14) измельченным парафином и высыпать его в стеклянную формочку.



Рис. 8.14. Фотография мерной емкости, заполненной измельченным парафином

6. Установить инфракрасную лампу в положение, при котором ее торцевая поверхность будет расположена по центру стеклянной формочки на расстоянии порядка 200 мм от ее кромки (рис. 8.15).



Рис. 8.15. Фотография положения нагревательной лампы относительно стеклянной формочки

После этого ОБЯЗАТЕЛЬНО надеть защитные очки!

7. На панели управления устройства (рис. 8.16) включить тумблер 1 подключения к сети питания, и затем включить тумблер 4 нагревательной лампы.



Рис. 8.16. Фотография панели управления устройства:
1 – тумблер подключения к сети питания; 2 – ручка потенциометра;
3 – тумблер питания электродвигателя;
4 – тумблер включения нагревательной лампы

8. По истечении 4–5 минут, необходимых для расплавления парафина в формочке, включить на панели управления тумблер питания электродвигателя 3, сообщив тем самым ей вращательное движение.

9. Поворотом ручки потенциометра 2, по часовой стрелке на панели управления, постепенно повысить частоту вращения формочки до значения, при котором свободная поверхность расплавленного парафина примет необходимую форму.

10. Отключить на панели управления питание инфракрасной лампы и отвести ее в сторону.

11. Для охлаждения и отверждения парафина в формочке продолжить ее вращение в течение 4–5 минут.

12. По истечении указанного времени отключить на панели управления питание электродвигателя и снять с помощью отвертки стальную державку со стеклянной формочкой с вала электродвигателя.

13. Установить державку с формочкой 1 на дно стеклянной кружки 2 так, чтобы формочка располагалась сверху, и аккуратно залить в кружку нагретую до температуры 90–95 °С воду до уровня, соответствующего расположению парафина в формочке (рис. 8.17).

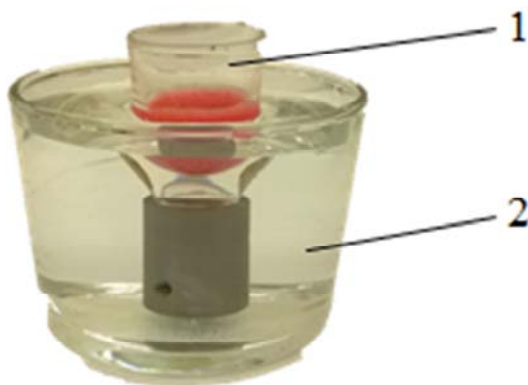


Рис. 8.17. Фотография державки с формочкой (1), установленной в стеклянной кружке (2)

14. По истечении 1–2 минут, необходимых для оплавления парафина в месте контакта со стенками формочки, взяв ее рукой за верхний край, извлечь из кружки, и второй рукой аккуратно достать полученный макет контактной линзы из парафина (рис. 8.18).



Рис. 8.18. Фотография макета контактной линзы из парафина, полученного методом центробежного формования

15. Изучить форму и состояние поверхностей полученного макета контактной линзы из парафина и сделать соответствующие выводы.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Описать порядок получения макета контактной линзы из парафина методом центробежного формования.
 - 4.1. Фотография полученного макета контактной линзы.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. В чем основное отличие зрения в контактных линзах от зрения с очками?
2. Назовите основные геометрические параметры контактной линзы.
3. Из каких материалов изготавливаются жесткие и мягкие контактные линзы?
4. Что такое кислородопроницаемость контактной линзы и как она оценивается?
5. Перечислите основные операции изготовления жестких контактных линз точением.

6. Каковы особенности изготовления мягких контактных линз точением?

7. Представьте последовательность изготовления мягких контактных линз методом центробежного формования. Назовите достоинства и недостатки этого метода.

8. Представьте последовательность изготовления мягких контактных линз литьем. Назовите достоинства и недостатки этого метода.

9. Представьте последовательность изготовления мягких контактных линз реверсивным процессом. Назовите достоинства и недостатки этого метода.

10. Представьте схему устройства для получения макетов контактных линз из парафина и последовательность их получения.

Литература

1. Аветисов, Э. С., Розенблюм, Ю. З. Оптическая коррекция зрения. – М. : Медицина, 1981. – 428 с.

2. Киваев, А. А., Шапиро, Е. И. Контактная коррекция зрения. – М. : ЛДМ Сервис, 2000. – 231 с.

3. Ушаков, Н. А., Новиков, С. А., Шульпина, Н. Б. Технология изготовления линз и оправ. – М. : Медицина, 2009. – 487 с.

Лабораторная работа № 9

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ

Цель работы

1. Изучить конструкции упругих элементов, применяемых в приборах различного назначения.
2. Изучить технологический процесс изготовления витых цилиндрических пружин.
3. Изучить технологический процесс изготовления спиральных пружин и волосков.
4. Изучить технологический процесс изготовления мембран.
5. Изучить технологический процесс изготовления сильфонов.
6. Изучить технологический процесс изготовления трубчатых манометрических пружин.
7. Получить практические навыки определения жесткости упругих элементов приборов.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Образцы упругих элементов, применяемых в приборах: цилиндрические пружины сжатия и растяжения; спиральные пружины и волоски, мембраны и мембранные коробки; сильфоны и трубчатые манометрические пружины.
2. Штангенциркуль ШЦ-1-125-0,1.
3. Упругий подвес на двух плоских пружинах.
4. Устройство определения характеристики упругого подвеса на двух плоских пружинах.
5. Цифровой запоминающий осциллограф.

Теоретическая часть

Технология изготовления упругих элементов приборов

В приборостроении очень широкое распространение получили упругие чувствительные элементы, к которым относятся различного типа пружины. В частности винтовые, спиральные, трубчатые манометрические, мембраны и мембранные коробки, сильфоны. В зависи-

мости от выполняемых функций и, в частности, от рода воспринимаемой и измеряемой нагрузки упругие элементы приборов разделяют на:

- силоизмерительные пружины;
- теплоизмерительные пружины (биметаллы);
- манометрические упругие элементы.

По характеру действия пружины могут быть разделены на четыре группы:

- 1) работающие на сжатие;
- 2) работающие на растяжение;
- 3) работающие на сжатие и растяжение;
- 4) работающие на кручение.

По точности пружины разделяются на обычные и прецизионные. Последние, в отличие от обычных, имеют строго постоянную зависимость между деформацией и нагрузкой.

Технология изготовления витых цилиндрических пружин

Витые цилиндрические пружины (рис. 9.1), подвергаемые после навивки только отпуску, изготавливаются из стальной углеродистой проволоки классов I, II и III с диаметром проволоки от 0,14 до 8 мм. Пружинная проволока класса I используется для больших нагрузок и перемещений. Пружинная проволока класса II используется для пружин, работающих при средних нагрузках. Пружинная проволока класса III используется для пружин, работающих при небольших нагрузках и малых перемещениях.

В общем случае технологический процесс изготовления витых цилиндрических пружин включает следующие операции:

1. Испытание проволоки.
2. Навивка заготовок пружин.
3. Разрезание на отдельные пружины (только при навивке на оправку).
4. Шлифование торцевых опорных витков пружин, работающих на сжатие (рис. 9.1, а).
5. Загибка концов крепления (зацепов) для пружин, работающих на растяжение (рис. 9.1, б).
6. Термическая обработка.
7. Заневоливание пружин.
8. Покрытие пружин.
9. Контроль пружин.

Навивка заготовок пружин

Эта операция является наиболее ответственной в техпроцессе изготовления пружин. Применяются два способа навивки пружин:

- на оправку;
- безоправочная навивка.

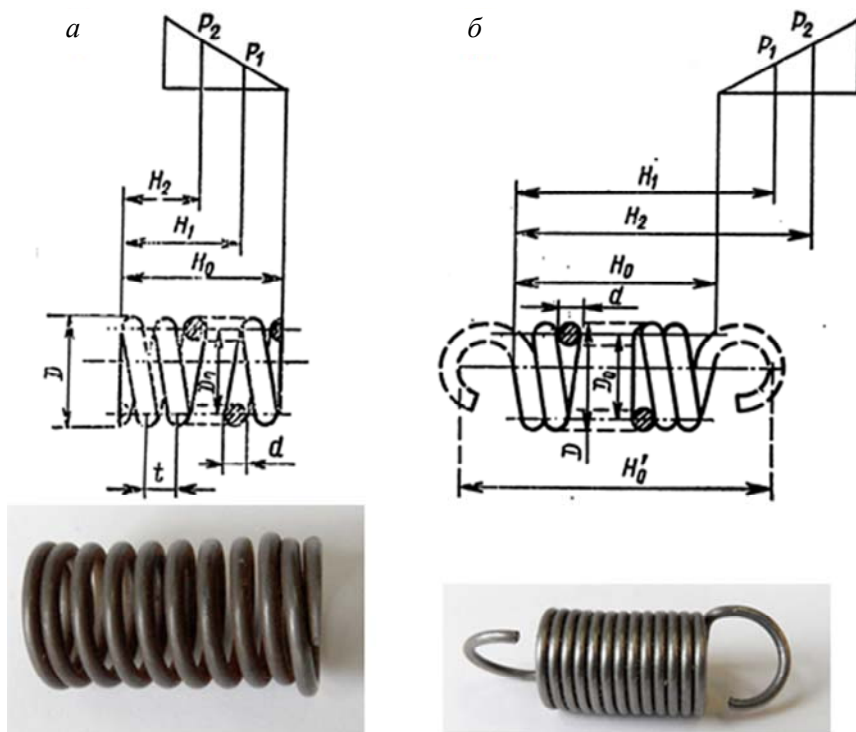


Рис. 9.1. Конструкции, характеристики и фотографии:
а – пружин сжатия; б – пружин растяжения

При навивке на оправку используется токарный станок (рис. 9.2). Оправка 2 зажимается с одного конца патроном токарного станка 1, а с другого конца подпирается вращающимся центром 4. Конец проволоки, подлежащий навивке, заправляется в отверстие оправки 2. Для создания натяжения и направления проволоки при навивке она зажимается текстолитовыми пластинками с использованием винтовых креплений резца резцедержателя 5 суппорта токарного станка.

После этого устанавливают требуемый шаг навивки, т. е. необходимое продольное перемещение суппорта на один оборот шпинделя, и включают станок. После навивки пружины с требуемым числом витков, станок выключают и проволоку отрезают на участке между суппортом и бухтой проволоки. Затем пружину снимают с оправки.

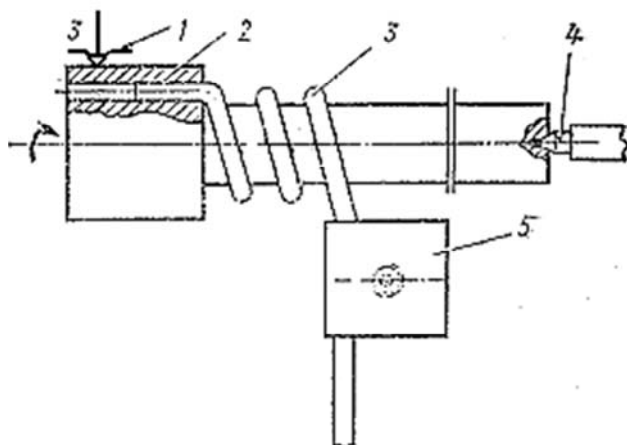


Рис. 9.2. Схема навивки пружины на оправку:
 1 – патрон токарного станка; 2 – оправка; 3 – пружина;
 4 – вращающийся центр; 5 – резцедержатель

Навивку пружин из проволоки диаметром более 8 мм следует производить в нагретом состоянии при $t = 850\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нагрев осуществляется электрическим током, для чего проволоку перед навивкой подсоединяют к обмотке трансформатора напряжением 2–3 В.

Следует подчеркнуть, что после снятия навитой пружины с оправки ее диаметр за счет сил упругости несколько возрастает. Причем это увеличение зависит от большого числа факторов, учесть влияние которых расчетным путем весьма сложно. Поэтому в производственных условиях диаметр оправки для навивки пружин устанавливают опытным путем. Для этого навивают несколько пружин с различными диаметрами оправок, на основе чего устанавливают оптимальный диаметр для навивки данной цилиндрической пружины.

Навивка пружин на оправку является малопроизводительным способом, не обеспечивающим высокой точности. Применяется в единичном и мелкосерийном производстве.

В крупносерийном и массовом производствах цилиндрические винтовые пружины изготавливают способом безправочного навивания, схема которого приведена на рис. 9.3. Проволока, поступающая из мотка (бухты), выпрямляется системой роликов *1* и подается транспортирующими роликами *2* через направляющую втулку *3* в зону навивки. Здесь, встречая на своем перемещении навивальные пальцы *6* (упоры), проволока огибается ими вокруг неподвижной опоры *7* (шаблона), образуя пружину *5*, которая по мере навивки сходит с опоры. Отрезка пружины осуществляется ножом *4*. После установки бухты проволоки и настройки станка он работает в автоматическом режиме. Производительность, по сравнению с навивкой на оправку, в 10–20 раз выше при лучшем качестве пружины.

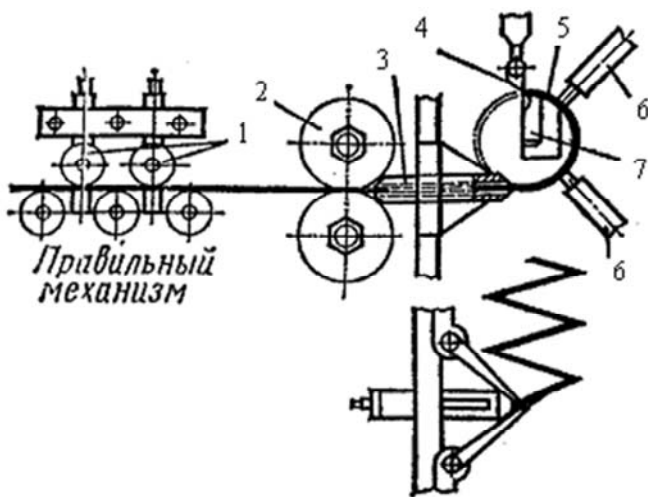


Рис. 9.3. Схема безправочной навивки пружин:

1 – система роликов; *2* – транспортирующие ролики; *3* – направляющие втулки;
4 – нож; *5* – пружина; *6* – упор; *7* – шаблон

Обработка торцов и зацепов пружин

Для получения опорных поверхностей у пружин, работающих на сжатие, торцы пружин подвергают шлифованию. При этом выдерживается свободный размер пружины H_0 (см. рис. 9.1, *a*).

В единичном производстве шлифование торцов пружин осуществляют на заточных станках вручную, что не обеспечивает высокого качества обработки.

В серийном производстве шлифование торцов пружин выполняется на плоскошлифовальных станках в приспособлении в виде плиты с отверстиями, равными наружному диаметру пружин, в которые они закладываются. Плита приспособления помещается на магнитный стол станка и закрепляется вместе с пружинами. Пружины, отшлифованные с одного торца, переворачиваются и затем шлифуются второй торец.

При массовом изготовлении пружин применяются специальные шлифовальные станки. На рис. 9.4 показано устройство станка для двухстороннего шлифования пружин. Он состоит из двух электродвигателей, на осях которых посажены шлифовальные круги 1 и 2. Электродвигатель с кругом 2 монтируется на основании неподвижно, а электродвигатель с кругом 1 установлен на подвижных салазках, что позволяет устанавливать необходимое расстояние между шлифовальными кругами. Пружины, подлежащие обработке, вставляются в сменные втулки 3, которые устанавливаются в призмах каретки 4 и крепятся планкой 5. Каретка 4, прикрепленная к рейке, получает движение относительно шлифовальных кругов от зубчатого колеса. Таким образом шлифуются торцы пружин и одновременно выдерживается свободная длина пружины, установленная чертежом.

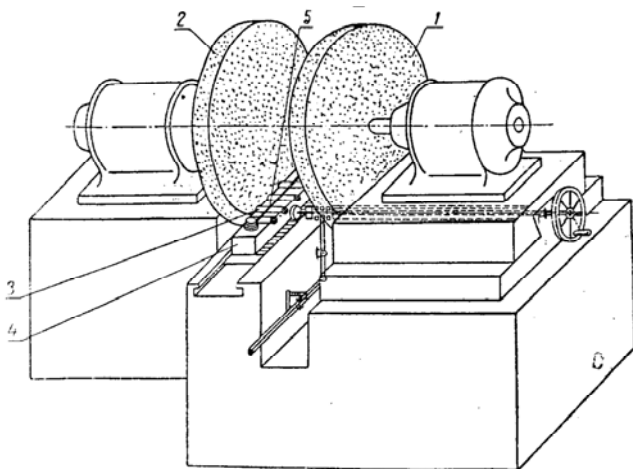


Рис. 9.4. Устройство станка для двухстороннего шлифования пружин:
1, 2 – шлифовальные круги; 3 – сменные втулки;
4 – каретка; 5 – планка

Пружины малой жесткости (менее 0,08 Н/мм) шлифуются в специальной цанге (рис. 9.5). В этом случае пружина 1 надевается на стержень 2 и по наружному диаметру прижимается цангой. При этом зажимаются крайние витки, чем повышается их жесткость при шлифовании.

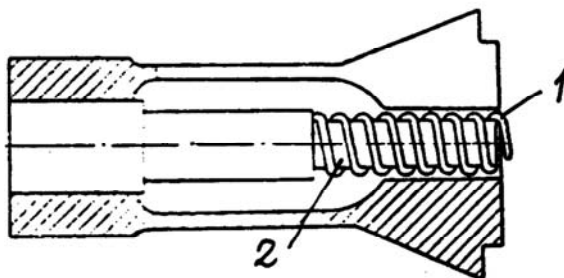


Рис. 9.5. Устройство шлифования пружин:
1 – пружина; 2 – стержень

Для пружин очень малой жесткости применяется электрохимическое шлифование, при котором процесс снятия металла производится при нулевом усилии. Схема такой обработки показана на рис. 9.6.

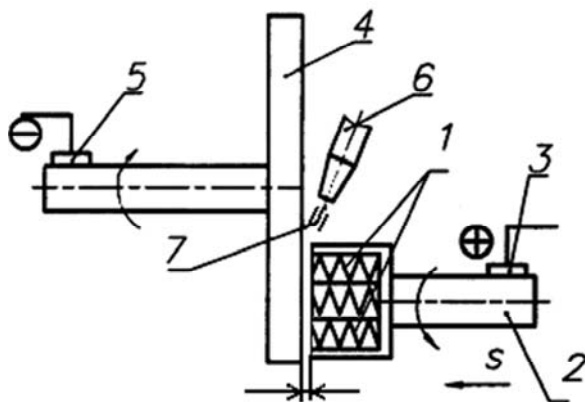


Рис. 9.6. Схема электрохимического шлифования пружин очень малой жесткости:
1 – заготовки; 2 – вращающееся приспособление; 3, 5 – щетки;
4 – металлический диск; 6 – насадка; 7 – электролит

Обрабатываемые пружины устанавливаются во вращающемся приспособлении 2, которое через щетку 3 подключено к положительному полюсу источника питания, т. е. является анодом. Вращающийся металлический диск 4 является электродом: инструментом, который через щетку 5 подключен к отрицательному полюсу источника постоянного тока, является катодом. Через насадку 6 в зону обработки подается электролит 7. За счет анодного растворения происходит обработка опорных витков пружин.

Термообработка пружин и стабилизация их свойств

Ее осуществляют после всех операций механической обработки. Пружины из стальной термически обработанной проволоки подвергают только отпуску для снятия внутренних напряжений. Их нагревают до температуры 250–320 °С с временем выдержки в зависимости от диаметра проволоки.

Пружины из стальной термически необработанной проволоки подвергают закалке и отпуску.

Стабильные свойства пружин обеспечиваются их механической тренировкой или «заневоливанием».

При *механической тренировке* производят периодическое растяжение (для пружин, работающих на растяжение) или сжатие (для пружин, работающих на сжатие) в течение 1–2 часов с числом циклов 30–40 в минуту.

«*Заневоливание*» заключается в сжатии пружин до соприкосновения витков или растяжении усилием, превышающим рабочее, и выдерживании в указанном состоянии от 6 до 48 часов.

Для прецизионных пружин еще выполняется так называемая доводка по осевому усилию, которая выполняется с применением приборов, измеряющих усилие и деформацию.

Покрытие и контроль пружин

В качестве антикоррозионного покрытия применяют оксидирование, цинкование, кадмирование, фосфатирование. Контроль пружин включает внешний осмотр (наличие дефектов на поверхности). Измеряются свободная длина пружины, наружный диаметр, равномерность шага навивки, перпендикулярность опорной плоскости. Проводятся испытания под нагрузкой.

Изготовление спиральных пружин и волосков

Спиральные ленточные пружины применяют в конструкциях приборов главным образом как аккумуляторы энергии (как двигатели). В соответствии с этим назначением пружины обладают небольшой жесткостью и работают при статической нагрузке в условиях длительного нагружения.

Спиральные пружины такого назначения изготавливают из высококачественной углеродистой стали, обладающей большой прочностью и стабильностью.

Техпроцесс их изготовления включает следующие основные операции:

- 1) подготовка материала, получение заготовок;
- 2) навивка;
- 3) отрезка и загибка конца;
- 4) термообработка;
- 5) покрытие;
- 6) «заневоливание»;
- 7) контроль.

Исходным материалом является лента, поступающая в нагартованном или термически обработанном виде. Заготовительные операции заключаются в разрезке материала на полосы требуемой ширины, правке полос и снятии заусенцев на их ребрах. Перед навивкой концы заготовок для обеспечения возможности крепления отжигают на небольшом участке и загибают.

Навивку проводят на специальном приспособлении, работа которого поясняется схемой, приведенной на рис. 9.7. В оправке 1 приспособления, диаметр которой соответствует внутреннему диаметру пружины, предусмотрен паз, для заправки конца заготовки. На другой конец подвешивают груз 3. После поворота оправки на пол оборота под заготовку вставляют мягкую прокладку 2 (стальную или латунную) для обеспечения требуемого зазора между витками пружины. После навивки пружину снимают с оправки, удаляют прокладку и отрезают ее по размеру с удалением вспомогательного крючка.

Термическая обработка пружин из стали У8А состоит в закалке и последующем отпуске. В качестве антикоррозионного покрытия применяют оксидирование с последующим покрытием лаком.

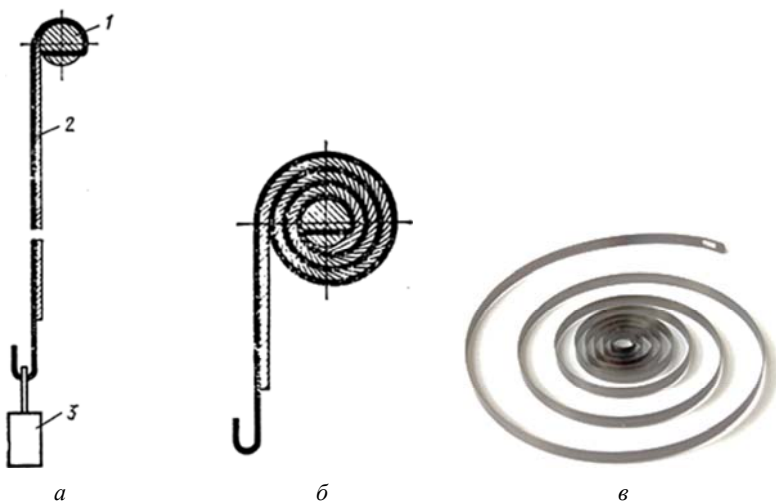


Рис. 9.7. Схема навивки спиральных пружин:
а – в исходном состоянии: 1 – оправка; 2 – мягкая прокладка; 3 – груз;
б – в конечном состоянии; *в* – фотография спиральной пружины

С целью стабилизации формы спирали и напряжений в ее материале пружину «заневоливают». Для этого ее закручивают до соприкосновения вишков, помещают в обойму и выдерживают в течение суток. Если после этого она имеет форму, близкую к архимедовой спирали, то она считается годной и контролируется по моменту.

Разновидностью спиральных пружин являются волоски, которые широко применяются в приборах (выборка зазора в зубчатых передачах, волосок в балансовых часах).

Техпроцесс изготовления волосков включает:

- 1) волочение проволоки;
- 2) прокатка проволоки (плющение);
- 3) навивка;
- 4) термообработка;
- 5) разрезка на отдельные пружины;
- 6) стабилизация;
- 7) контроль.

Исходным материалом служит проволока из бериллиевой бронзы, нержавеющей стали, инвара (сплав Fe – 65 % и Ni – 35 %).

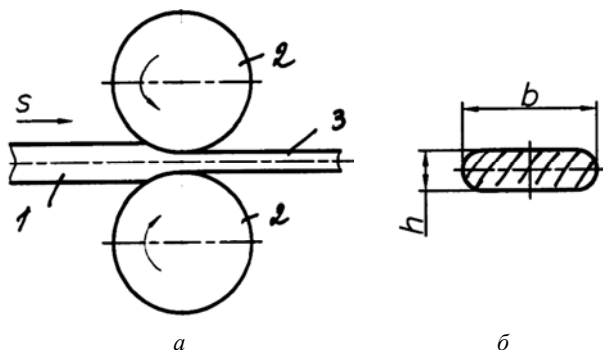


Рис. 9.8. Схема плющения проволоки на двухвалковом прокатном стане (а) и поперечное сечение полученной ленты (б):
1 – проволока; 2 – валы; 3 – лента

Волочение применяется для получения точного диаметра проволоки. Используются алмазные волокни.

Плющение проволоки 1 в ленту 3 производят на двухвалковом прокатном стане между валками 2 (рис. 9.8, а). При этом получают ленту с поперечным сечением, приведенным на рис. 9.8, б ($b/h < 10$). После этого полученную ленту разрезают на заготовки требуемой для навивки длины.

Навивка волосков осуществляется двумя способами: лучеобразная навивка (рис. 9.9, а) и пучкообразная (рис. 9.9, б).

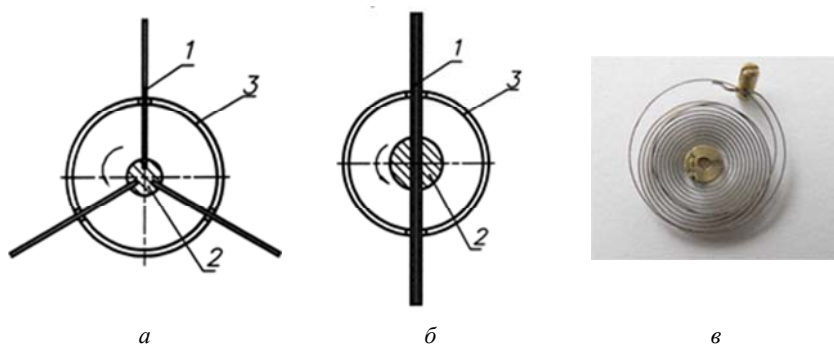


Рис. 9.9. Схема навивки волосков:
а – лучеобразная навивка; б – пучкообразная навивка; в – фотография волоска;
1 – заготовка волосков; 2 – шпиндель; 3 – неподвижная кассета

В обоих случаях приспособление для навивки состоит из неподвижной кассеты 3 и вращающегося шпинделя 2. Отличие состоит в заправке (установке) заготовок волосков. Так при лучеобразной концы заготовок вставляются поштучно в пазы на шпинделе, а при пучкообразной они в виде пучка устанавливаются в симметричном пазу шпинделя. В неподвижной кассете 3 также предусмотрены соответствующие пазы для установки заготовок волосков. При вращении шпинделей происходит навивка волосков, при этом шаг получаемой спиральной пружины определяется количеством одновременно навиваемых заготовок.

Термическая обработка волосков проводится в вакуумных печах ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, время 1 час). После этого происходит разделение пакета на отдельные пружины и осуществляется их контроль.

Изготовление плоских пружин

Плоские листовые пружины (рис. 9.10) в приборостроении применяются для различных подвесов, а также в качестве контактов или контактных деталей.

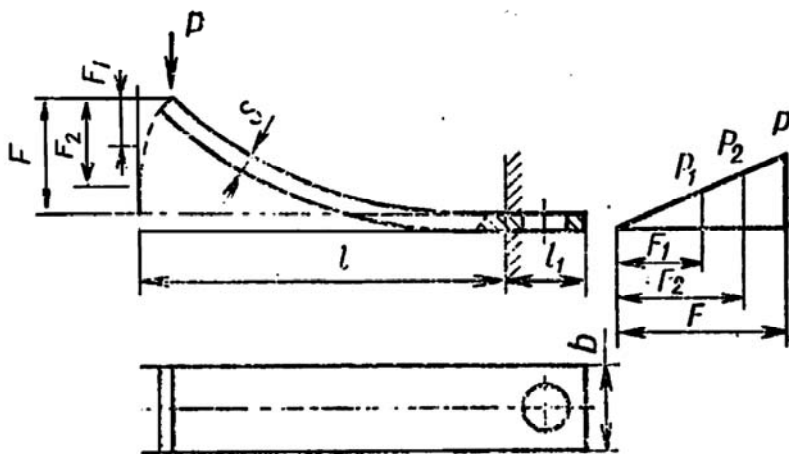


Рис. 9.10. Конструкция плоской пружины и ее характеристики

Технологический процесс изготовления плоских пружин включает следующие операции: заготовительная, штамповочная, термическая обработки и покрытия.

Для получения необходимой упругости плоских пружин, штампуемых из ленты или листа, пружины длинной стороной в заготовке располагаются вдоль проката.

Изготовление мембран

Мембраной называется тонкая круглая пластина с концентрически нанесенными складками (гофрами) (рис. 9.11).



Рис. 9.11. Конструкция мембраны:
 D_n – диаметр плоского центра; S – шаг гофра;
 $2h$ – высота гофра; δ – толщина мембраны

Мембрана является основным чувствительным элементом большого числа приборов, благодаря простоте конструкции, компактности и невысокой стоимости. Для увеличения перемещения подвижного центра мембраны применяются мембранные коробки (рис. 9.12). На рис. 9.12, *а* показана герметически изготовленная коробка, которая называется анероидной и применяется в барометрах для измерения абсолютного давления. На рис. 9.12, *б* показана мембранная коробка для измерения давлений, действующих на нее изнутри и снаружи.

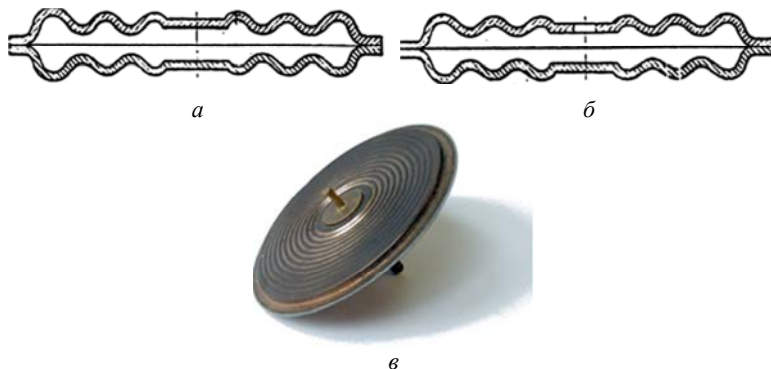


Рис. 9.12 – Конструкции мембранных коробок:
а – анероидная; *б* – для измерения давлений, действующих на коробку изнутри и снаружи; *в* – фотография мембранной коробки

В качестве материалов для изготовления мембран служат фосфористая бронза, оловянистая бронза, латунь, нержавеющая сталь, стали марок У8А, У10А, 65Г.

Рассмотрим типовой процесс изготовления мембран:

1. *Заготовительные операции.* Материал для изготовления мембран поступает в виде ленты толщиной от 0,3 до 1,5 мм и шириной 1200 мм. Каждая партия подвергается контролю по химсоставу и механическим свойствам. Ленты, прошедшие испытания, нарезаются на гильотинных или роликовых ножницах на отдельные полосы, ширина которых определяется диаметром заготовки.

2. *Прокатка.* Она преследует две цели: получение необходимой толщины материала и нагартовка материала для получения необходимых механических свойств и структуры металла.

3. *Термическая обработка.* Она предназначена для снятия внутренних напряжений и получения равновесной структуры.

4. *Вырубание кружков (заготовок) мембран.* Осуществляется на эксцентриковых прессах.

5. *Гофрирование*, т. е. формирование на заготовке заданного количества гофров с заданными параметрами. Наиболее рациональным способом является гофрирование мембран на резине, что поясняется схемой, приведенной на рис. 9.13. Для этого применяется специальный штамп. Он состоит из основания 1, в которое вставлен резиновый круг 2 толщиной 10 мм. Заготовка укладывается на основание 1 и прижимается к нему по периметру кольцом 4. Затем опускается пуансон 3, на рабочей поверхности которого выполнены соответствующие гофры, который придает мембране необходимую форму.

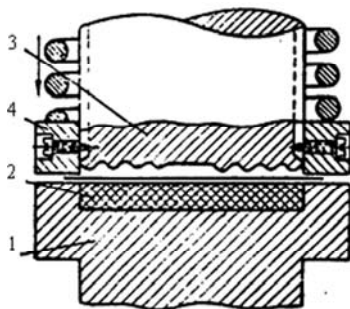


Рис. 9.13. Схема гофрирования мембран на резине:
1 – основание; 2 – резиновый круг; 3 – пуансон; 4 – кольцо

Весьма эффективно использовать для гофрирования мембран гидравлический способ. Он отличается высокой производительностью и качеством. Высокое качество мембран обеспечивается благодаря равномерному распределению давления по всей поверхности заготовки, что нельзя осуществить при других способах гофрирования.

Изготовление сифонов

Сифон представляет собой гофрированную тонкостенную трубку (рис. 9.14).

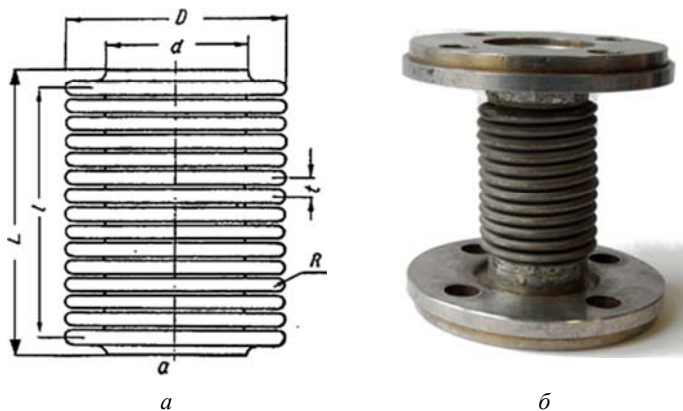


Рис. 9.14. Конструктивные элементы сиффона (а) и его фотография (б):

D – наружный диаметр; d – внутренний диаметр;
 L – длина в свободном состоянии; l – длина рабочей части;
 R – радиус гофров; t – шаг гофров; δ – толщина стенки

Сиффоны широко используются в различных приборах в качестве чувствительных элементов. Сиффоны изготавливают из фосфористой и бериллиевой бронзы, а также нержавеющей стали. Заготовками служат тонкостенные цельнотянутые трубки.

Технологический процесс изготовления сиффонов выглядит следующим образом. Из тонкостенной трубы нарезают штучные заготовки требуемой длины. Для снятия остаточных напряжений заготовки отжигаются в вакуумных печах. После отжига производят операцию гофрирования. В настоящее время наиболее производительным способом, обеспечивающим высокое качество сиффо-

нов, является гидромеханический способ, схема которого приведена на рис. 9.15.

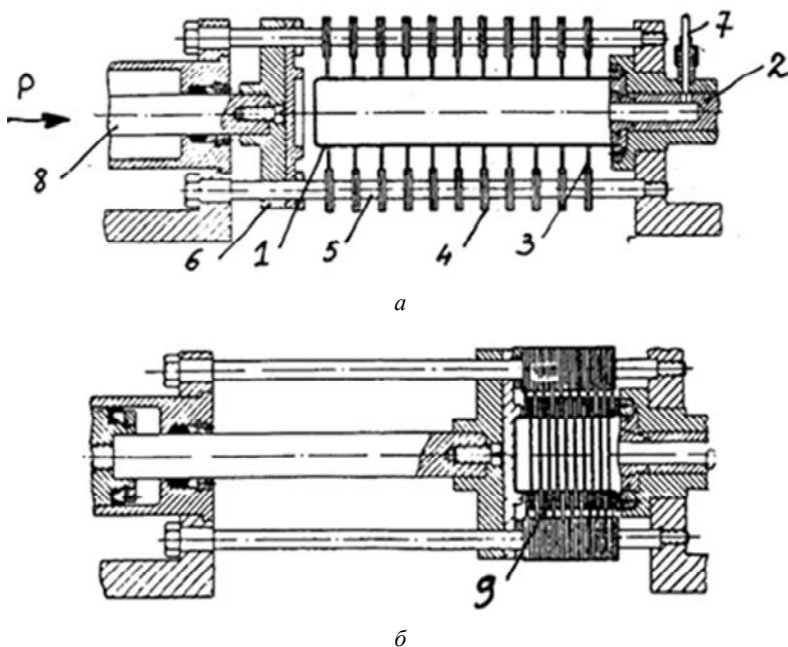


Рис. 9.15. Схема гидромеханического способа гофрирования сильфонов:
a – исходное положение; *б* – окончание гофрирования;
 1 – трубка-заготовка; 2 – неподвижная балка; 3 – пластинчатые матрицы;
 4 – корпуса; 5 – направляющие; 6 – подвижная плита;
 7 – штуцер; 8 – шток; 9 – сильфон

Внутренний диаметр заготовки должен быть равен внутреннему диаметру готового сильфона. Принцип формообразования состоит в следующем. Трубка-заготовка 1 одним концом вставляется в зажим неподвижной бабки 2, а второй конец закрывается пробкой. Затем подводят пластинчатые матрицы 3, которые плотно охватывают (фиксируют) заготовку по наружному диаметру. Сами пластинчатые матрицы установлены на корпусах 4, которые имеют возможность продольного перемещения по направляющим 5. Затем внутрь трубки через штуцер 7, в котором предусмотрен перепускной клапан, подается масло под давлением. После этого шток 8 си-

лового цилиндра под действием усилия P перемещает подвижную плиту b и корпуса пластинчатых матриц.

Заготовка, испытывая созданное таким образом осевое усилие, при одновременном действии давления изнутри сокращается по длине и заполняет свободные промежутки между матрицами, которые соответствующим образом перемещаются. В результате происходит складывание трубки в гофры (рис. 9.15, б) и формообразование сильфона 9. После этого давление внутри трубки снимается, пластинчатые матрицы выводятся, подвижная плита отводится и полученный сильфон снимается.

Для подвода пластинчатых матриц к наружной поверхности заготовки может использоваться механизм, аналогичный применяемому в ирисовых диафрагмах фотографических объективов (рис. 9.16).

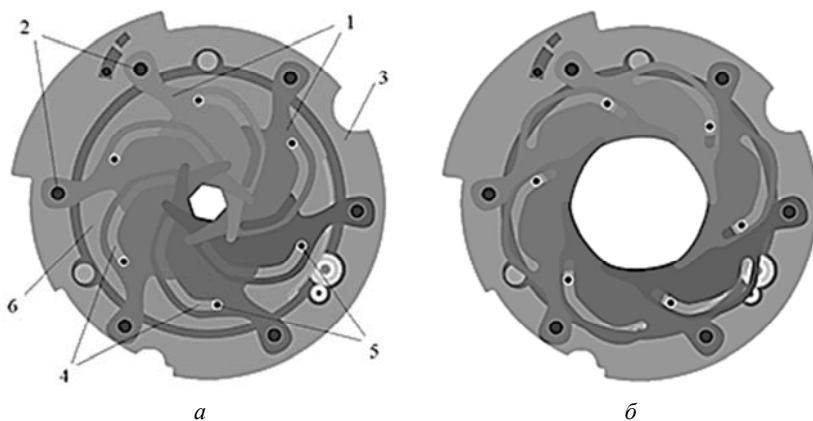


Рис. 9.16. Схема конструкции ирисовой диафрагмы:

- 1 – лепестки; 2 – оси; 3 – неподвижная часть корпуса диафрагмы;
- 4 – фасонные пазы; 5 – штифты; 6 – вращающаяся часть корпуса диафрагмы

Диафрагма состоит из множества лепестков 1 , установленных с возможностью вращения на осях 2 , закрепленных в неподвижной части 3 корпуса диафрагмы. В лепестках выполнены фасонные пазы 4 , внутри которых находятся штифты 5 , закрепленные на вращающейся части 6 корпуса диафрагмы. При вращении штифтов 5 по часовой стрелке их взаимодействие со стенками пазов 4 заставляет лепестки 1 расходиться наружу от оси корпуса диафрагмы, что сопровождается увеличением проходного отверстия.

Изготовление трубчатых манометрических пружин

Манометрическая трубчатая пружина представляет собой тонкостенную трубку 1 (рис. 9.17) вытянутого поперечного сечения, которая изогнута с определенными радиусами (внутренним r и внешним R) и углом изгиба $\varphi = 180\text{--}300^\circ$.

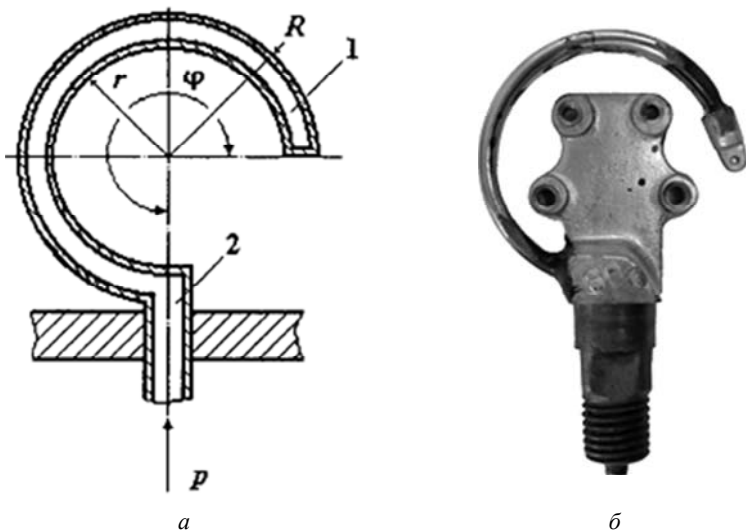


Рис. 9.17. Принципиальная схема чувствительного элемента манометра в виде одновитковой трубчатой пружины (а) и его фоторграфия (б):
1 – пружина; 2 – держатель

Манометрические трубчатые пружины применяют как измерительные преобразователи давления в показывающих, регистрирующих и регулирующих манометрических приборах. В приборах, где требуются большие перемещения упругих элементов, используют многовитковые трубчатые пружины.

Для изготовления трубчатых пружин применяют латунь Л63 и Л68, бронзы Бр2,5 и БрБНТ1,9. При работе в условиях высоких температур (до $200\text{--}300^\circ\text{C}$) и в агрессивных средах применяют пружины из высококачественных сплавов 36НХТЮ, 42НХТЮ.

Технологический процесс изготовления трубчатых пружин включает следующие основные этапы: заготовительный, профилирование (навивку), термообработку и контроль.

Заготовительный этап заключается в изготовлении трубки определенной длины с профилированным сечением.

Наибольшее распространение получил способ изготовления манометрических трубчатых пружин из цельнометаллических профилированных трубок, получаемых волочением и прокаткой. Форма поперечного сечения трубчатых пружин бывает следующих видов: овальная (рис. 9.18, *а*), плоскоовальная (рис. 9.18, *б*), круглая с эксцентрично расположенным отверстием (рис. 9.18, *в*), плоскопараллельная (рис. 9.18, *г*).

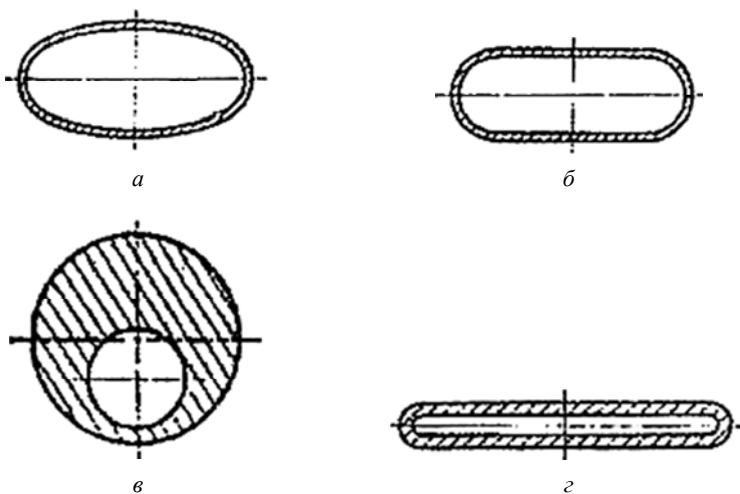


Рис. 9.18. Формы поперечного сечения трубчатых пружин

Требуемую форму поперечного сечения получают путем сплющивания на эксцентриковых прессах, вальцах и волочильных станах. Иногда трубку получают сваркой из листового материала (рис. 9.19).

При этом снижается разброс характеристик пружин одной партии, поскольку листовый материал имеет меньшие допуски на толщину по сравнению с допусками на цельнотянутые трубки. Применение сварки позволяет создавать сложные конструкции манометрических пружин. Так при сварке трех и более полос получают двухполостные (рис. 9.19, *з*) или многополостные трубчатые пружины. Перемещение конца такой пружины зависит от соотношения давлений, подаваемых в каждую полость.

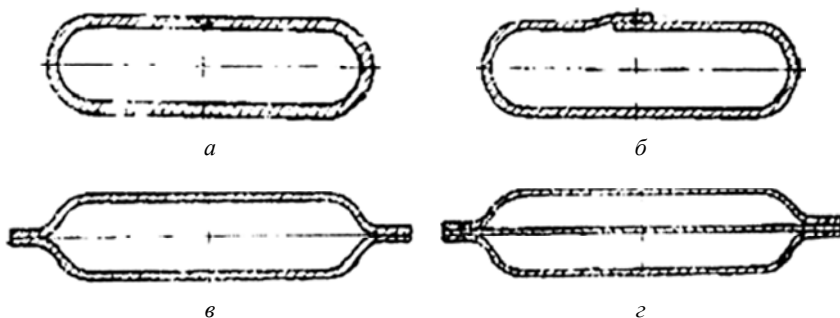


Рис. 9.19. Форма сечения сварных трубчатых пружин

Профилирование заключается в навивке пружины и получении окончательной формы ее поперечного сечения. Применяют следующие способы профилирования (рис. 9.20).

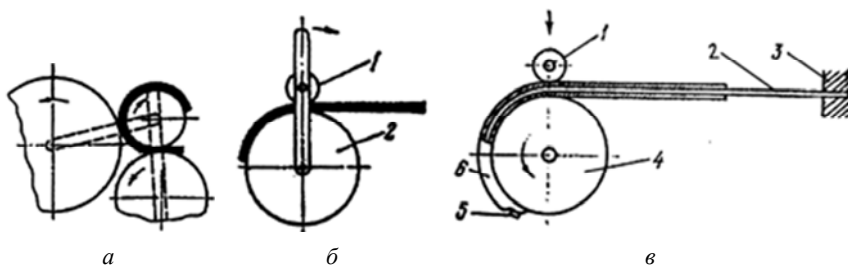


Рис. 9.20. Схема способов профилирования трубчатых пружин

1. *Профилирование тремя роликами* (рис. 9.20, а). В качестве наполнителя используется песок, соль или канифоль.

2. *Профилирование двумя роликами* (рис. 9.20, б). Заготовку закрепляют на неподвижном ролике 2 и сгибают вращающимся роликом 1. В качестве прокладки применяют висмутовый сплав.

3. *Профилирование двумя роликами с применением стального сердечника* (рис. 9.20, в). Трубку надевают на штифт 5 ведущего ролика 4. Сечение трубки б заполняют стальной гибкой лентой 2, свободный конец которой закрепляют на неподвижном зажиме 3. Нажимной ролик 1 прижимает трубку к ведущему ролику, при вращении которого трубка сходит с сердечника.

Термическая обработка после навивки предназначена для получения стабильных упругих свойств. Нагрев осуществляют в электропечах с нейтральной средой.

Описание экспериментальных установок

Устройство измерения жесткости упругого подвеса на двух плоских пружинах

Упругие подвесы на плоских пружинах используются в роли кинематических элементов приборов: упругих опор и направляющих, гибких связей и деталей передаточно-множительных механизмов. Они выполняют функции измерения в вибрографах, акселографах, тахометрах, манометрах и т. д. Направляющие и упругие подвесы на плоских пружинах практически не имеют трения и люфтов, не нуждаются в смазке, не боятся загрязнений и надежны в работе.

На рис. 9.21 приведены конструкция и фотография упругого подвеса на двух плоских пружинах.

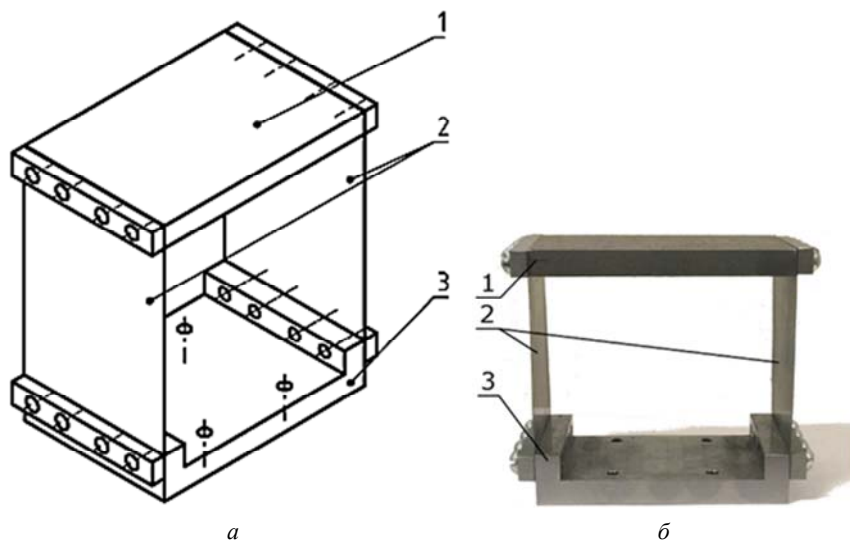


Рис. 9.21. Конструкция упругого подвеса на двух плоских пружинах (а) и его фотография (б):
1 – верхняя (подвижная) пластина; 2 – плоские пружины;
3 – неподвижный корпус

Подвес состоит из неподвижного корпуса 3, к торцам которого с помощью накладок жестко закреплены концы двух плоских пружин 2. Их противоположные концы с помощью накладок прикреплены к верхней (подвижной) пластине 1. Таким образом, образована конструкция плоскопараллелограммного упругого подвеса. При силовом воздействии на подвижную пластину в направлении, перпендикулярном плоскости плоских пружин, происходит ее перемещение в направлении приложенной силы. Основной характеристикой такого подвеса является его жесткость, т. е. отношение значения приложенной нагрузки P к величине перемещения подвижной пластины Δ ($\gamma = P / \Delta$). При этом рабочим участком зависимости $\Delta(P)$ считается линейный, на котором значение γ остается постоянным. Поэтому для конкретного подвеса необходимо экспериментально установить величину линейного участка его характеристики.

На рис. 9.22 приведена схема устройства для измерения жесткости упругого подвеса и его фотография.

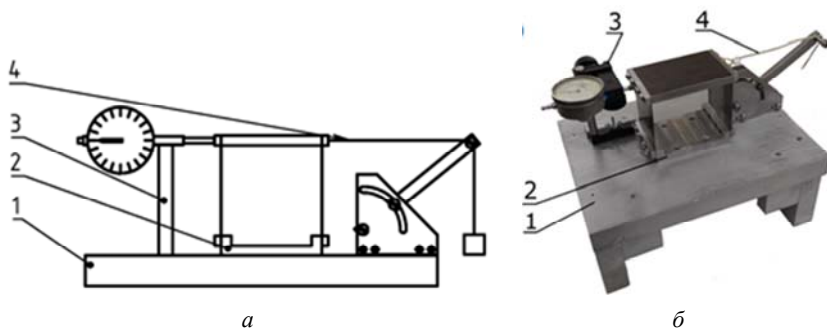


Рис. 9.22. Схема устройства для измерения жесткости упругого подвеса на двух плоских пружинах (а) и его фотография (б):

1 – основание; 2 – корпус упругого подвеса; 3 – стойка; 4 – проволока

К массивному деревянному основанию 1 прикреплен корпус испытываемого упругого подвеса 2. На его подвижной части закреплен конец проволоки 4, которая через блок связана с аттестованными грузами, вызывающими деформацию упругого подвеса. Величина этой деформации измеряется с помощью индикатора часового типа (ИЧ-10), закрепленного на стойке 3, которая установлена на деревянном основании.

Работа устройства заключается в следующем. При отсутствии нагрузки на подвес к верхней (подвижной) его части подводится измерительный наконечник индикатора часового типа с предварительным натягом 5–6 мм. Шкала индикатора устанавливается на ноль. После этого, на конце проволоки устанавливается аттестованный груз, т. е. происходит нагрузка подвеса, и по индикатору определяется величина деформации его подвижной части. Затем масса груза увеличивается и измеряется соответствующая ему деформация подвижной части подвеса. По полученным экспериментальным данным строится зависимость $\Delta(P)$ и определяется величина ее линейного участка. Аналогичную зависимость получают при обратном ходе, т. е. по мере уменьшения нагрузки.

При отклонении подвижной части подвеса от положения равновесия и дальнейшем снятии статической нагрузки подвижная часть совершает затухающие колебания, частота которых связана с жесткостью упругого подвеса зависимостью

$$f = (\gamma / m)^{1/2} / 2\pi, \quad (9.1)$$

где m – масса подвижной части подвеса.

Частота колебаний может быть измерена с помощью цифрового запоминающего осциллографа и индукционного датчика скорости перемещений, состоящего из закрепленного на подвижной части подвеса постоянного неодимового магнита и катушки индуктивности, закрепленной на неподвижной части стенда. При колебаниях подвижной части подвеса магнит смещается относительно катушки, что приводит к изменению величины магнитного потока, пронизывающего катушку. В результате, в соответствии с законом электромагнитной индукции, в катушке наводится пропорциональная скорости изменения магнитного потока ЭДС, которая может быть зарегистрирована осциллографом.

Порядок выполнения работы

Измерение жесткости упругого подвеса на двух плоских пружинах

1. Получить у инженера плоские пружины.
2. С помощью штангенциркуля измерить геометрические размеры пружин: толщину, ширину и длину.

3. Закрепить проволоку к подвижной части подвеса, пропустить ее через блок и при необходимости отрегулировать положение блока таким образом, чтобы проволока располагалась параллельно основанию.

4. Установить измерительный наконечник индикатора часового типа к верхней подвижной части подвеса (с противоположной от места закрепления проволоки стороны), создав предварительный натяг 5–6 мм.

5. Произвести измерения жесткости подвеса, согласно ранее описанной методике, и получить экспериментальную зависимость величины деформации подвеса от значения приложенной нагрузки.

6. По результатам проведенных экспериментов построить зависимости величины деформации подвеса от значения нагрузки и определить линейные участки его характеристики.

Измерение частоты затухающих колебаний подвижной части упругого подвеса

1. Включаем осциллограф в сеть с помощью сетевого шнура и кнопки включения, расположенной слева на верхней части корпуса.

2. Подключаем датчик коаксиальным разъемом к первому каналу осциллографа (CH1) (рис. 9.23).

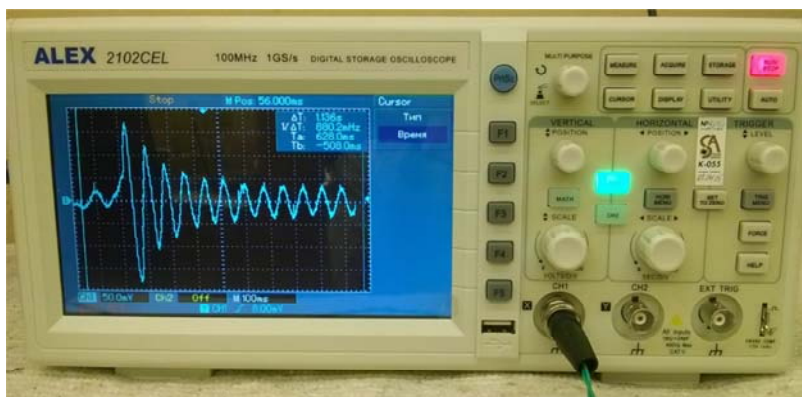


Рис. 9.23. Фотография подключенного датчика к первому каналу осциллографа

3. С помощью кнопок CH1 и CH2 включаем первый канал и отключаем второй. В нижней части дисплея в поле Ch1 должно отоб-

разиться значение вертикальной развертки в вольтах на деление, а в поле Ch2 – надпись Off.

4. Производим автокалибровку осциллографа (**ЕСЛИ ЭТО НЕОБХОДИМО**). Для этого нажимаем кнопку Utility, а затем кнопку F1 (кнопки F1–F5 используются для выбора пунктов меню, отображающихся в правой части дисплея).

5. Устанавливаем режим синхронизации. Для этого нажимаем кнопку Trig Menu, а затем кнопку F4. Выбираем Режим>Нормальный.

6. Регуляторами VOLTS/DIV и SEC/DIV устанавливаем развертку по вертикали и горизонтали, значения которых отображаются в нижней части дисплея. Типичные значения составляют 50 мВ/дел и 200 мс/дел.

7. Отклоняем подвижную часть подвеса от положения равновесия, а затем снимаем статическую нагрузку. Ждем, пока на дисплее отобразится кривая затухающих колебаний. Нажимаем кнопку RUN/STOP, чтобы исключить запись нового сигнала (рис. 9.24).

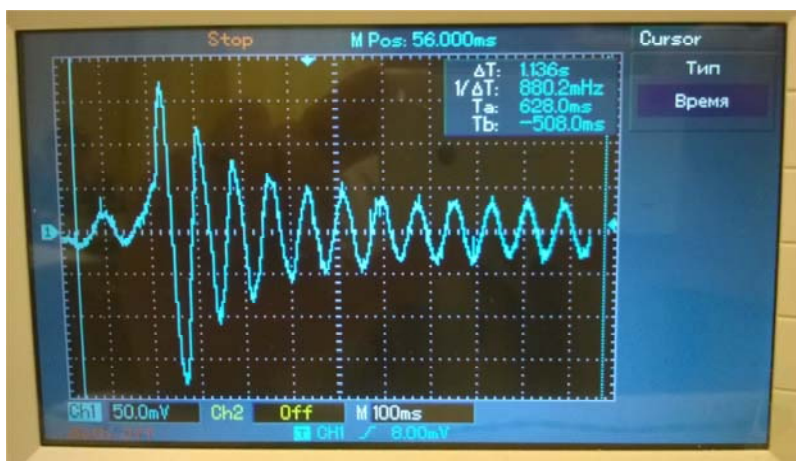


Рис. 9. 24. Фотография затухающих колебаний

8. Производим измерение частоты. Для этого нажимаем кнопку Cursor и кнопкой F1 выбираем измерение времени. На дисплее появляется вертикальная линия, которую с помощью многофункциональной кнопки, обозначенной круговой стрелкой, совмещаем с одним из максимумов сигнала (при необходимости масштабируем

изображение сигнала с помощью регулятора SEC/DIV). Фиксируем линию нажатием на многофункциональную кнопку. Появляется вторая линия, которую совмещаем с соседним максимумом сигнала и фиксируем нажатием на многофункциональную кнопку. В правом верхнем углу дисплея появляется значение частоты.

9. Вычисляем частоту затухающих колебаний по формуле (9.1) и сравниваем со значением частоты, полученной при выполнении работы (масса подвижной части подвеса 550 г.)

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Результаты измерения жесткости упругого подвеса на двух плоских пружинах.
 - 4.2. Результаты измерения частоты затухающих колебаний подвижной части упругого подвеса.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие операции включает технологический процесс изготовления витых цилиндрических пружин?
2. Сущность способа навивки заготовок пружины на оправку.
3. Сущность безоправочного способа навивки заготовок пружин.
4. Какие способы шлифования опорных витков пружин используются при их малой жесткости?
5. В чем заключается операция «заневоливания» пружин?
6. Назовите основные операции технологического процесса изготовления спиральных пружин.
7. Какие применяются способы навивки волосков?
8. Каким образом осуществляется гофрирование мембран?
9. В чем заключается способ гидромеханического гофрирования сифонов?
10. Какие основные операции включает технологический процесс изготовления трубчатых манометрических пружин?

11. Какие применяются способы гофрирования трубчатых пружин?
12. Назовите основные достоинства упругих подвесов на плоских пружинах.

Литература

1. Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1991. – 392 с.
2. Марычев, С. Н. Технология изготовления упругих элементов приборов : учебное пособие / С. Н. Марычев; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 136 с.
3. Рахштадт, А. Г. Пружинные стали и сплавы / А. Г. Рахштадт. – М. : Metallurgia, 1981.

Лабораторная работа № 10

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕНТОВ

Цель работы

1. Изучить назначение стентов и требования, предъявляемые к материалам для их изготовления.
2. Изучить конструкции стентов и этапы их установки.
3. Изучить принцип работы стентов с эффектом памяти формы.
4. Изучить методы изготовления матричных стентов.
5. Провести эксперимент по выполнению процедуры расширения макета стента с помощью воздушного шарика.
6. Провести эксперименты с проволокой из нитинола, наглядно иллюстрирующие эффект памяти формы.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Матричный стент из нержавеющей стали, полученный после операции лазерной резки.
2. Увеличенный макет связанного из ниток баллонорасширяемого стента.
3. Воздушный шарик, закрепленный на стеклянной трубке.
4. Приспособление для выполнения процедуры расширения макета стента с помощью воздушного шарика.
5. Пружина из нитинола после отжига в вакуумной печи при температуре 500 °С в течение двух часов.
6. Ванночка с водой со льдом.
7. Пинцет.

Теоретическая часть

Назначение стентов и требования к материалам для их изготовления

Стент (от имени английского стоматолога Чарльза Стента) – это упругая металлическая или пластмассовая конструкция в виде цилиндрического каркаса, устанавливаемая в просвете полых органов и обеспечивающая расширение участков, подвергшихся стенозу

(сужению). Стент обеспечивает проходимость физиологических жидкостей, расширяя просвет полого органа (сосуда, пищевода, желчевыводящих путей или мочеточника).

Стентирование – медицинское оперативное вмешательство, проводимое с целью установки стента, который помещается в просвет полых органов человека, например, коронарных сосудов сердца, и обеспечивает расширение участка, суженного патологическим процессом. Стент является внутрисосудистым протезом, поддерживающим стенки пораженного органа и сохраняющим диаметр его просвета.

подавляющее число применяемых на сегодня стентов изготавливается из металлов и их сплавов. Самое широкое распространение получили медицинская нержавеющая сталь 316L, тантал, нитинол, сплав платины (90 %) и иридия (10 %), сплав кобальта.

К материалу стента предъявляются следующие требования:

- биосовместимость;
- резистентность к образованию тромбов на поверхности;
- рентгеноконтрастность;
- возможность расширения раздутым баллоном (мягкость) в сочетании с радиальной жесткостью (упругостью).

Биосовместимость подразумевает наличие минимальной ответной реакции сосудистой стенки на внедрение инородного тела (стента), которая оценивается по толщине неоинтимального слоя, образованного на поверхности имплантированного стента.

Резистентность к тромбообразованию на поверхности стента достигается следующими способами:

- обработкой поверхности металла с целью снижения ее шероховатости;
- уменьшением поверхности металла в стентируемом сегменте;
- покрытием металлической поверхности стента веществами, препятствующими тромбообразованию (например, покрытие гепарином).

Последними исследованиями было доказано, что конструкция сегмента также играет определенную роль в предотвращении образования пристенных тромбов. В частности, структура и рисунок стента должны способствовать ламинарному кровотоку через стентированный сегмент. Отсутствие пристеночного турбулентного потока создает условия для предотвращения тромбообразования. На рис. 10.1 представлено схематическое изображение коронарного кровотока через стентированный элемент.

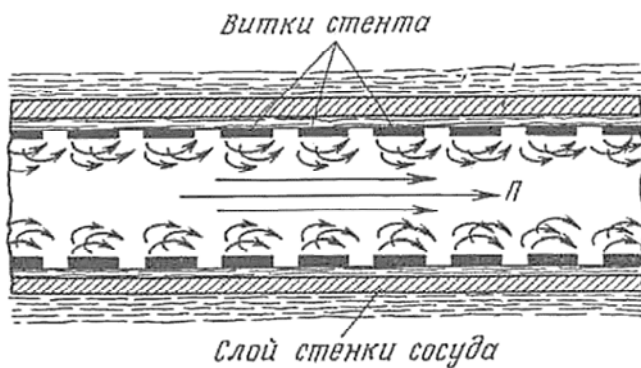


Рис. 10.1. Схематичное представление коронарного кровотока через стентированный элемент

Как видно, ближе к оси сосуда характер кровотока более ламинарный, а пристеночный кровоток имеет турбулентный характер, основной причиной которого является имплантированный стент. Стрелками указано направление кровотока через просвет сосуда. Как установлено, более биосовместимый материал является и менее тромбогенным. С этой точки зрения наиболее приемлемыми материалами являются металлы: тантал и сплав никеля и титана – нитинол.

Рентгеноконтрастность (видимость на флюороскопическом экране) является важной характеристикой стента и зависит в первую очередь от материала стента. Рентгеноконтрастность стента характеризуется тремя степенями: невидимой, средней и высокой контрастностью. Самый меньшей видимостью обладают стенты из стали, самой высокой из тантала и платины. Покрытие обычных стальных стентов тончайшим слоем (до 80 мкм) золота или платины также приводит к резкому увеличению их рентгеноконтрастности.

Возможность расширения стента под невысоким давлением в баллоне (5–6 атм.) свидетельствует о хорошей податливости (пластичности) материала стента: чем меньше давление для расширения сжатого стента, тем пластичнее его материал. С другой стороны, основная задача стентирования – хорошее армирование стентированного сегмента артерии. Поэтому пластичность материала стента должна сочетаться с упругостью (сопротивляемостью к внешнему воздействию) структуры стента. Упругость стента зависит не только от материала, но и от конструкции (дизайна) стента.

Конструкции стентов

Несмотря на значительное разнообразие форм и конструкций стентов их можно объединить в 5 групп по типу конструкции и способу изготовления:

1. Трубчатые (или матричные) стенты.
2. Проволочные стенты.
3. Синусоидальные стенты.
4. Кольцевые стенты;
5. Стенты смешанной конструкции.

Подавляющее число стентов, применяющихся на сегодня в клинической практике имеют матричную конструкцию.

Матричные, или трубчатые, стенты изготавливают из цельных металлических трубок различной длины и диаметра. На рис. 10.2 представлены основные стадии изготовления такого стента. На месте продольных разрезов после раздувания баллона образуются ромбовидные структуры.

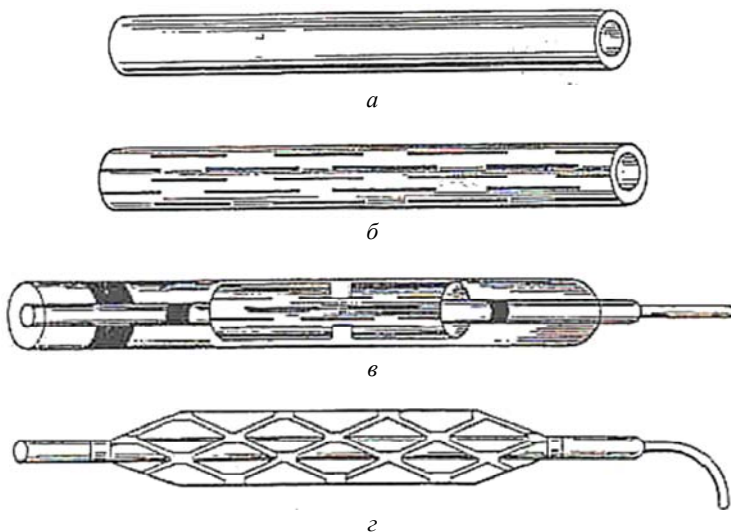


Рис. 10.2. Основные стадии изготовления матричного стента:
а – заготовка в виде полой металлической трубки;
б – нанесение надрезов или других фигур с помощью лазерного луча
или прецизионной коррозионной химической обработки;
в – закрепление на баллоне; г – стент в раскрытом состоянии

На рис. 10.3 представлена фотография общего вида *проволочного стента*. Спиральная синусоидальная структура стента создана из одной проволоки без сварок и соединений его отдельных элементов.

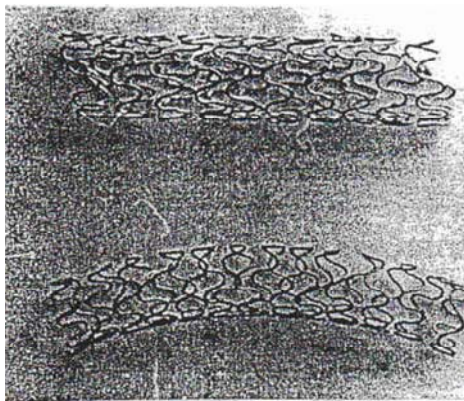


Рис. 10.3. Фотография общего вида проволочного стента

Кольцевые стенты (рис. 10.4) являются разновидностью проволочных, но в отличие от них, в кольцевых стентах отдельные элементы (фигуры), изготовленные из проволоки, соединяются между собой с помощью сварки (химической или горячей). На рис. 10.4 показан общий вид кольцевого стента, а стрелками показаны места соединения между собой отдельных ромбовидных элементов.

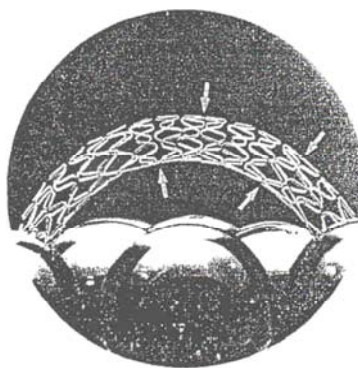


Рис. 10.4. Фотография общего вида кольцевого стента

На рис. 10.5 показан общий вид *синусоидального стента*, который представляет собой композицию из отдельных проволок (от 10 до 20), каждая из которых имеет синусоидальную форму.

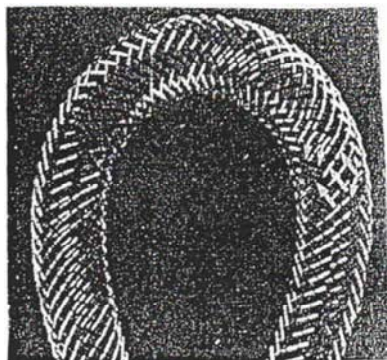


Рис. 10.5. Фотография общего вида синусоидального стента

Изготавливаются проволочные стенты плетением или вязанием проволок.

Стадии установки баллоно-расширяемого стента

На рис. 10.6 показаны основные стадии установки баллоно-расширяемого стента.

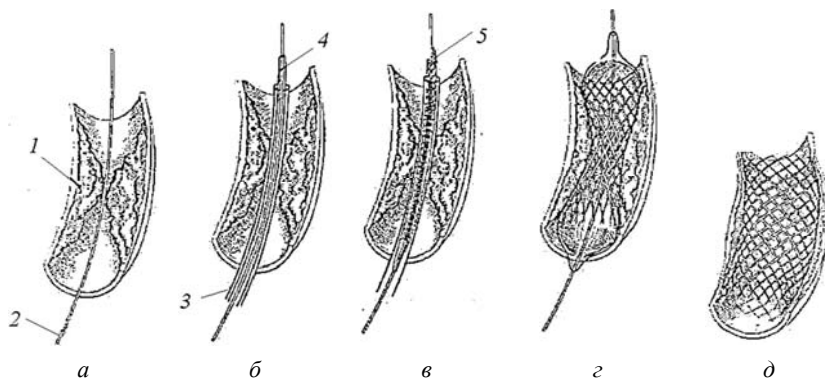


Рис. 10.6. Основные стадии изготовления баллоно-расширяемого стента:
1 – бляшка; 2 – проводник; 3 – катетер; 4 – дилататор; 5 – баллон со стентом

Бляшка 1 пересекается проводником 2 (рис. 10.6, а), затем по проводнику вводится катетер 3 с дилататором 4 (рис. 10.6, б). После этого дилататор удаляется из катетера и заменяется баллоном со стентом 5 (рис. 10.6, в). Затем катетер отводится назад, а баллон раздувается (рис. 10.6, г). После этого баллон сдувается и отводится назад, оставляя стент 6 в полностью раскрытом состоянии (рис. 10.6, д).

На рис. 10.7 представлена фотография матричного стента в исходном состоянии и после его расширения.

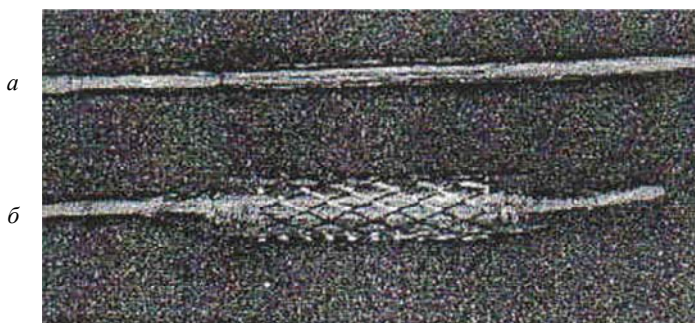


Рис. 10.7. Фотография матричного стента в исходном состоянии (а) и после его расширения (б)

Помимо баллоно-расширяемых стентов используются саморасширяющиеся, основанные на эффекте памяти формы (ЭПФ). В качестве материалов для изготовления саморасширяющихся стентов применяют нитинол – сплав, содержащий 50 % никеля и 50 % титана. Он обладает двумя важными для изготовления стентов свойствами: эффектом памяти формы (ЭПФ) и эффектом сверхупругости. Оба эти эффекта связаны с так называемыми бездиффузионными фазовыми превращениями, возникающими под действием температуры или механической деформации.

Механизмы эффектов памяти формы и сверхупругости

Высокотемпературная фаза нитинола (после отжига при температуре 500 °С) представляет собой аустенит с объемно-центрированной кубической решеткой (рис. 10.8, а) При понижении температуры нитинол переходит в фазу мартенсита с моноклинной решеткой, подвергнутой двойникованию (рис. 10.8, б).

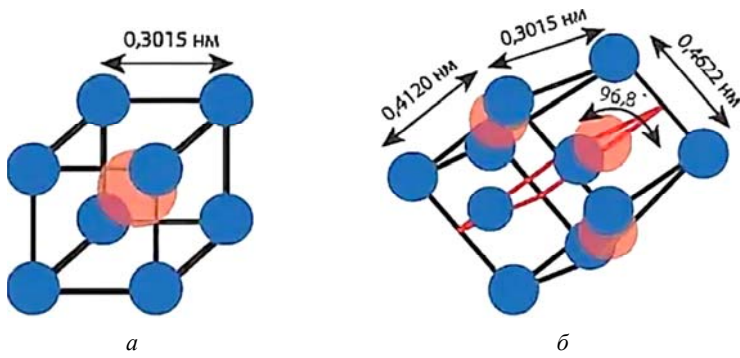


Рис. 10.8. Высокотемпературная фаза нитинола:
a – аустенит с объемно-центрированной кубической решеткой;
б – мартенсит с моноклинной решеткой

При этом переходы аустенит–мартенсит и мартенсит–аустенит происходят при различных температурах, что иллюстрируется на рис. 10.9

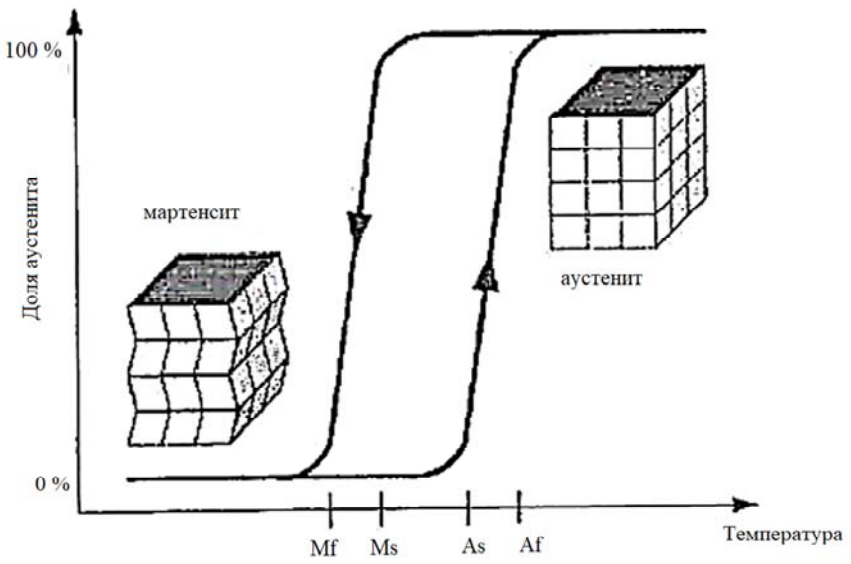


Рис. 10.9. Зависимость фазовых переходов аустенит–мартенсит и мартенсит–аустенит нитинола от температуры

При фазовом переходе аустенит–мартенсит формирование мартенсита начинается при температуре M_s , а заканчивается при температуре M_f , меньшей, чем M_s . При обратном фазовом переходе мартенсит–аустенит формирование аустенита начинается при температуре A_s и заканчивается при температуре фазовых превращений может существенно изменяться (в диапазоне -100 до $+100$ °C) при незначительном изменении состава сплава.

В мартенситном состоянии (при температуре ниже M_f) нитинол может быть легко деформирован за счет раздвойниковогоания – деформации при кристаллической решетке, при которой исчезают двойники. При этом может быть достигнута максимальная деформация до 8 %, а процесс деформации не сопровождается движением дислокаций, которое обычно характерно для пластической деформации. При нагреве выше температуры A_f (рис. 10.9) деформированное тело принимает свою исходную форму за счет превращения раздвойниковогоанного мартенсита в аустенит. Этот эффект и называют эффектом памяти формы (ЭПФ).

При температуре выше A_f при приложении внешней нагрузки возможно прямое превращение аустенита в раздвойниковоанный мартенсит, называемый индуцированным напряжением мартенситом. При снятии нагрузки деформированное тело изменяет свою исходную форму за счет превращения раздвойниковоанного мартенсита в аустенит. Этот эффект называют эффектом сверхупругости (псевдоупругости) (рис. 10.10).

Полностью восстанавливается деформация до 8 %, в то время как обычные материалы для изготовления упругих элементов допускают максимальную деформацию не более 0,4 %.

Это позволяет упаковать стенты большого диаметра внутри малых по диаметру катетеров. При этом после высвобождения из катетера стент стремится принять свой исходный размер, не проявляя признаков пластической деформации. Стенты из материала с ЭПФ охлаждают и упаковывают в катетер при температуре ниже M_f . При этом при нормальной температуре материал стента должен находиться в аустенитном состоянии, то есть температура A_f не должна превышать нормальной температуры. При установке стента в кровеносный сосуд он нагревается до температуры выше A_f и стремится принять свой исходный размер.

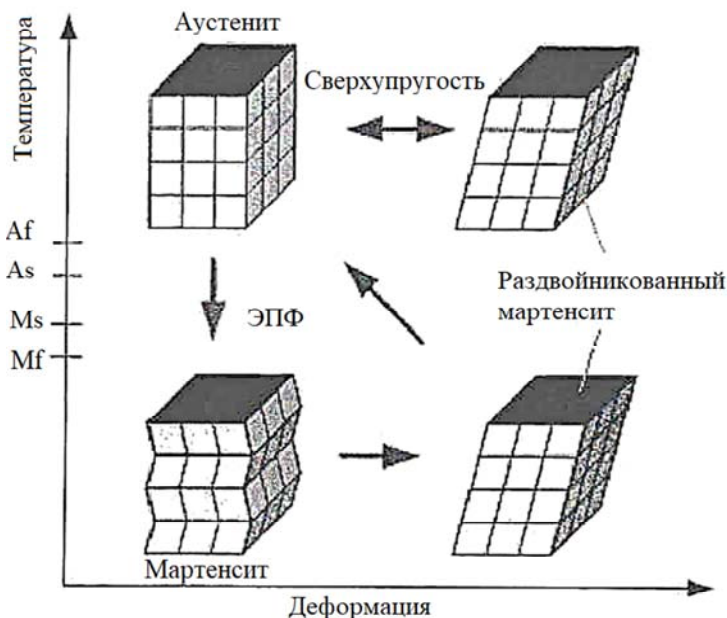


Рис. 10.10. Зависимость фазовых переходов аустенит–мартенсит и мартенсит–аустенит нитинола от деформации

ЭПФ может наблюдаться не только у металлических сплавов, но и у полимерных материалов. По сравнению с металлическими, полимерные стенты обладают повышенной гибкостью и податливостью, что позволяет вводить их в сильно искривленные сосуды и обеспечивает соответствие податливостей стента и сосудистой стенки. Интересным способом раскрытия полимерных стентов с ЭПФ является фототермическая активация ЭПФ. Для ее реализации стент устанавливается на светорассеивающее оптическое волокно, в которое вводится излучение диодного лазера. Излучение вызывает нагрев стента и его раскрытие в результате ЭПФ.

Биодеградируемые металлические стенты

Постоянные стенты имеют ряд недостатков, например, тромбогенность и невозможность адаптации к росту молодых пациентов. В связи с этим помимо постоянных стентов разрабатываются стенты из биологически рассасываемых материалов.

Сплавы для биodeградируемых стентов должны не уступать по прочности нержавеющей стали, при этом сами сплавы и продукты их коррозии не должны обладать токсичностью. В настоящее время разработаны биodeградируемые сплавы на основе железа и магния.

Первый биodeградируемый металлический стент был изготовлен из армко-железа (более 99,8 % железа) и испытан на кроликах в 2001 году. Недостатком стента является малая скорость его деградации. В связи с этим были исследованы Fe-Mn, которые продемонстрировали хорошую биосовместимость и скорость коррозии (в 2–10 раз выше, чем у армко-железа). Добавление кремния в сплав Fe-Mn позволяет получить биodeградируемый сплав с ЭПФ.

Первая успешная имплантация биodeградируемых металлических стентов человеку была выполнена в 2005 году. Магниевого стента был имплантирован в левую легочную артерию преждевременно рожденного ребенка с пороком сердца. Полное рассасывание стента произошло в течении 5 месяцев без каких-либо осложнений.

Методы изготовления стентов

На сегодня методы изготовления стентов включают лазерную резку, фотохимическое травление, водоструйную резку, электроэрозионную обработку, плетение и вязание.

Лазерная резка применяется для изготовления матричных стентов из трубчатых заготовок. При этом к размерам заготовок предъявляются жесткие требования: допуск на наружный диаметр – от 15 до 20 мкм, допуск на толщину стенки – от 20 до 50 мкм.

В качестве лазера может применяться лазер на кристалле иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами неодила, работающий в режиме модуляции добротности. Это позволяет получать короткие импульсы (длительностью менее 100 нс) с высокой частотой следования (до 40 кГц) при большой пиковой мощности (несколько кВт) и малой энергии импульса (менее 3 мДж). Также применяются волоконно-оптические лазеры (например, с волокном, легированным эрбием и иттербием).

На рис. 10.11 представлена схема установки лазерной резки заготовок матричных стентов.

Трубчатая заготовка одним концом зажимается в патроне, а другой ее конец установлен в поддерживающей оправке. Внутри расположен стержень для блокировки луча. Для удаления образующе-

гося при резке расплавленного металла коаксиально лазерному лучу через сопло подается газ. Подача кислорода под давлением позволяет повысить эффективность процесса резки.

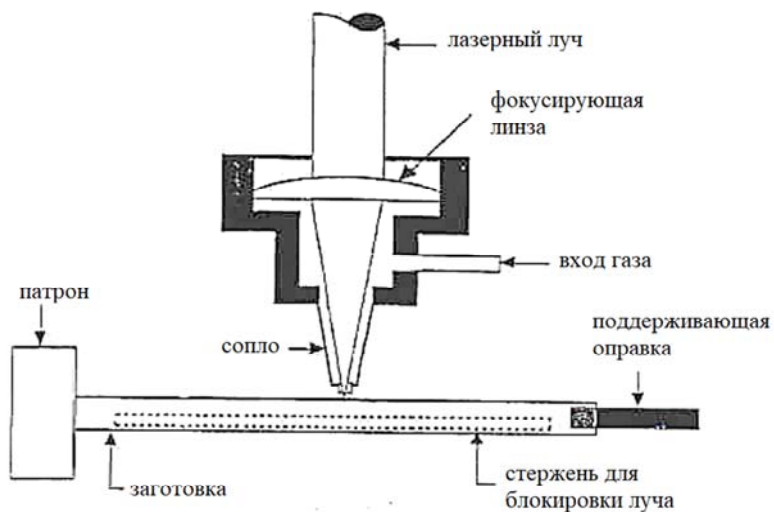


Рис. 10.11. Схема установки лазерной резки заготовок матричных стентов

Патрон с заготовкой с помощью системы ЧПУ перемещается вдоль координатных осей и поворачивается относительно оси заготовки. В результате воздействия на поверхность трубки лазерного луча и соответствующих движений заготовки на ней вырезаются необходимые элементы (рис. 10.12). Ширина резания составляет 15 мкм.



Рис. 10.12. Фотография зоны обработки при лазерной резке заготовки матричного стента

Фотография общего вида полученных после лазерной резки матричных стентов представлена на рис. 10.13.



Рис. 10.13. Фотографии общего вида матричных стентов

Известна технология лазерной водоструйной резки стентов из трубчатых заготовок. Этот способ резки основан на введении сфокусированного лазерного излучения в струю жидкости высокого давления, которая служит в качестве волновода для передачи лазерного излучения (рис. 10.14).

Импульсное лазерное излучение передается к водоструйной головке через оптическое волокно, выходной торец которого проецируется с помощью оптической системы на входное сечение сопла головки. Вода подается в головку под давлением 2–50 МПа, скорость струи жидкости составляет до 300 м/с, а диаметр струи – 40–100 мкм. Сопло изготавливается из алмаза или сапфира. Длина струи жидкости, по которой распространяется лазерное излучение, может примерно в 100 раз превышать диаметр сопла, то есть при его диаметре 50 мкм длина струи может составлять 5 мм.

В отличие от обычной лазерной резки данная технология не требует совмещения фокуса лазерного излучения с поверхностью заготовки, так как диаметр лазерного пятна остается постоянным на протяжении всей длины струи. Такая технология позволяет обеспечить параллельность стенок реза, а также обеспечивает чистые и ровные его края без зоны термического влияния. На рис. 10.15 показаны электронные фотографии обратной стороны стальной фольги, поле лазерного прошивания отверстия по рассматриваемой технологии (рис. 10.15, *а*) и по традиционной (рис. 10.15, *б*).

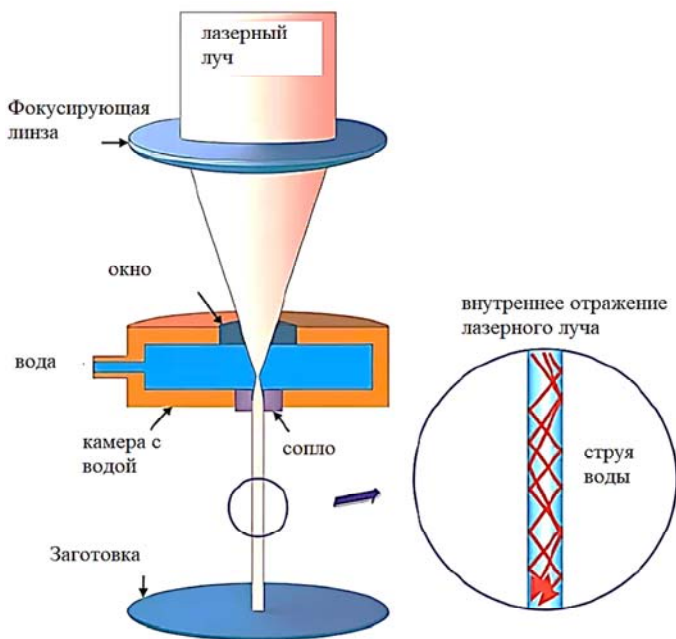


Рис. 10.14. Схема, поясняющая способ лазерной водоструйной резки

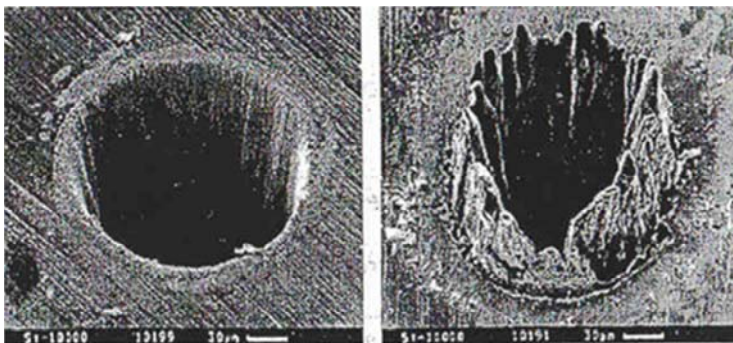


Рис. 10.15. Электронные фотографии обратной стороны стальной фольги после лазерного прошивания отверстия по рассматриваемой технологии (а) и по традиционной (б)

В случае применения лазерной водоструйной резки зона оплавления на выходе отверстия значительно меньше и оно имеет практически ровные края.

Описание экспериментальных установок

Получить у инженера матричный стент, изготовленный лазерной резкой и под микроскопом изучить его конструкцию.

Макет баллонорасширяемого стента и устройство для выполнения процедуры его расширения с помощью воздушного шарика

На рис. 10.16 приведена фотография макета, связанного из ниток баллонорасширяемого стента.



Рис. 10.16. Фотография макета, связанного из ниток баллонорасширяемого стента:

1 – манжет; 2 – ажурная часть; 3 – стальной хомут; 4 – трубка

Он связан из ниток в виде цилиндра и включает три части: среднюю ажурную часть 2, способную расширяться, и два манжета 1, выполненные плотным вязанием. Манжеты с помощью стальных хомутов 3 закреплены на концах трубок 4, благодаря чему исключается деформирование этих участков макета стента.

Для выполнения процедуры расширения стента в работе используется приспособление, фотография которого приведена на рис. 10.17.



Рис. 10.17. Фотография приспособления для выполнения процедуры расширения макета стента:

Оно состоит из основания 1, на котором закреплены две призмы 2. На них устанавливаются трубки с макетом стента. В качестве расширительного баллона используется воздушный шарик, закрепленный на конце стеклянной трубки (рис. 10.18).



Рис. 10.18. Фотография воздушного шарика, закрепленного на стеклянной трубке

Порядок выполнения работы

Выполнение процедуры расширения с помощью воздушного шарика включает следующую последовательность действий:

1. Установить трубки с закрепленным на них макетом стента на призмы приспособления (рис. 10.19) и зафиксировать их положение с помощью липучек на призмах.



Рис. 10.19. Фотография макета стента установленного и закрепленного на призмах приспособления

2. Ввести воздушный шарик со стеклянной трубкой во внутреннюю полость макета стента таким образом, чтобы он располагался в средней (ажурной) его части.

3. Через стеклянную трубку ртом начать надувать воздушный шарик, одновременно наблюдая (фиксируя) изменения диаметра ажурной части стента.

4. По достижению максимального расширения макета стента, входное отверстие воздухоподводящей трубки закрыть пальцем (рис. 10.20).

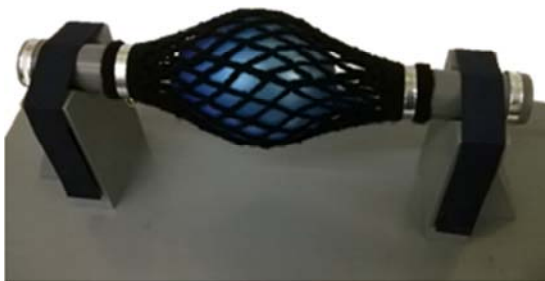


Рис. 10.20. Фотография макета стента в расширенном состоянии

5. Сфотографировать макет стента в расширенном состоянии и по полученной фотографии представить эскиз дизайна его ажурной части.

6. Освободить отверстие стеклянной трубки, выпустить воздух из шарика, извлечь его из полости макета стента и снять его с приспособления.

Визуализация эффекта памяти формы

Для проведения эксперимента по визуализации эффекта памяти формы в работе используются навитая из нитиноловой проволоки диаметром 0,2 мм цилиндрическая пружина (рис. 10.21), приспособление для ее фиксирования в натянутом состоянии и пластмассовый контейнер для помещения приспособления с проволокой в морозильную камеру.



Рис. 10.21. Фотография пружины из нитиноловой проволоки

Приспособление (рис. 10.22) состоит из пластмассовой пластины (основания), на которой на расстоянии 200 мм закреплены две металлические стойки высотой 20 мм, имеющие на свободных концах резьбовые отверстия, в которые вкручиваются винты с прижимными шайбами.



Рис. 10.22. Фотография приспособления для фиксирования концов нитиноловой проволоки в растянутом состоянии

Порядок выполнения эксперимента включает в себя последовательное выполнение следующих действий:

1. С помощью винта и прижимной шайбы закрепить конец пружины на одной из стоек приспособления.
2. Взявшись за второй конец пружины, растянуть ее до положения, позволяющего закрепить его на другой стойке приспособления (рис. 10.23).

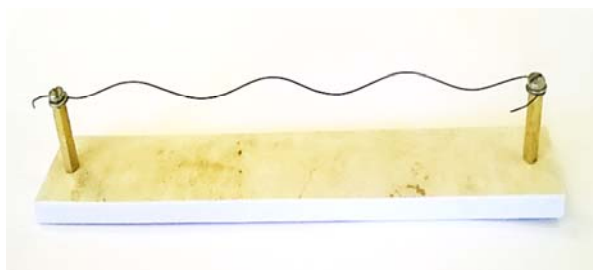


Рис. 10.23. Фотография приспособления с закрепленной на нем нитиноловой проволокой в растянутом положении

3. Поместить приспособление в пластмассовый контейнер (рис. 10.24). Дополнительно пространство можно заполнить кусоч-

ками льда и установить его в морозильную камеру, предварительно накрыв крышкой.



Рис. 10.24. Фотография контейнера с помещенным в него приспособлением

4. По истечении 5 минут, достать контейнер из морозильной камеры, снять крышку и как можно быстрее раскрепить концы проволоки на стойках приспособления.

5. С помощью пинцета извлечь проволоку из контейнера, уложить ее на плоскую поверхность и с помощью видеокамеры зафиксировать процесс восстановления проволоки в пружину.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Результаты выполнения процедуры расширения макета стента с помощью воздушного шарика.
 - 4.2. Результаты выполнения эксперимента по визуализации эффекта памяти формы.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что из себя представляет стент? Для чего он применяется?
2. Требования, предъявляемые к стентам.

3. Какие требования предъявляются к материалам для изготовления стентов?

4. Назовите и проиллюстрируйте основные стадии установки баллонно-расширяемого стента.

5. В чем заключается механизм эффекта памяти формы и сверхупругости нитинола?

6. Каким образом осуществляется лазерная резка матричных стентов?

7. В чем особенность лазерной водоструйной резки и какие ее преимущества, по сравнению с обычной лазерной резкой?

Литература

1. Самко, А. Н., Павлов, Н. А. Особенности конструкции и технологии изготовления стентов. М., 2012. – 383 с.

2. Козлов, К. Л. Разработка конструкции и технологии изготовления сердечного стента. – СПб. : ЭЛБИ, 2000. – 237 с.

Лабораторная работа № 11

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА И ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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 сущность электроэрозионного модифицирования металлических поверхностей и условия его реализации.
4. Изучить эксплуатационные характеристики модифицированной поверхности.
5. Получить экспериментальные данные, отражающие влияние энергии единичного разряда и условий его протекания (на воздухе или с применением дистиллированной воды) на диаметр лунки и диаметр наплывов металла по ее краю на полированной поверхности образцов из различных металлов.
6. Провести эксперименты по модифицированию исходной гладкой поверхности проволочного инструмента и оценить ее режущую способность.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Образцы из различных металлов с полученными на их полированной поверхности лунками в результате воздействия единичного электрического разряда различной энергии при обработке на воздухе и с применением дистиллированной воды.
2. Микроскоп МИМ-5.
3. Отрезок стальной (У8А) проволоки диаметром 0,3 мм.
4. Устройство модифицирования исходной гладкой поверхности проволоки и последующей оценки ее режущей способности.

Теоретическая часть

Основные сведения о теории процесса электроэрозионной обработки и применяемых технологических схемах

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.

Рассмотрим основные условия, необходимые для протекания электроэрозионного процесса удаления 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 (МЭП).

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 (рис. 11.1, а).

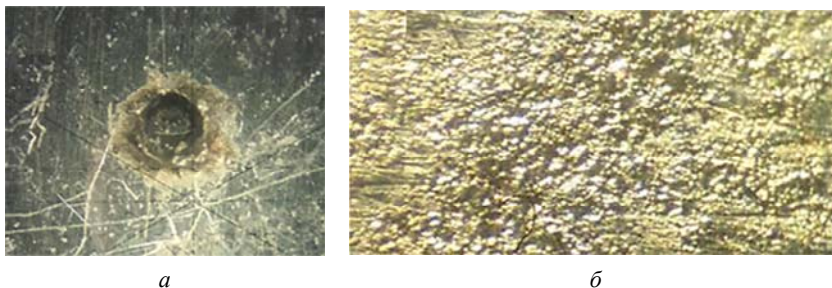


Рис. 11.1. Фотография единичной лунки (а) и фотография поверхности после эрозионной обработки (б)

Вылетевшие из лунки частицы металла охлаждаются окружающей 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 перекрывающихся друг друга лунок (рис. 11.1, б). 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 сле-

дует принимать 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 проба 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. 11.2), через который между ними 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.

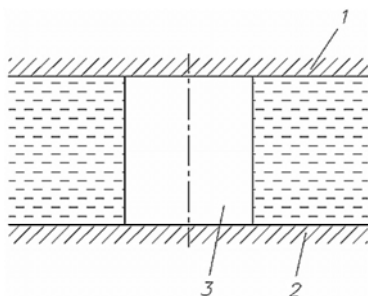


Рис. 11.2. Стадия пробной обработки межэлектродного промежутка:

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. 11.3) в начале этой стадии находятся жидкий металл 2 в углублениях электродов 1 и 6; газовый пузырь 3, внутри которого присутствуют пары 4 металлов заготовки 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.

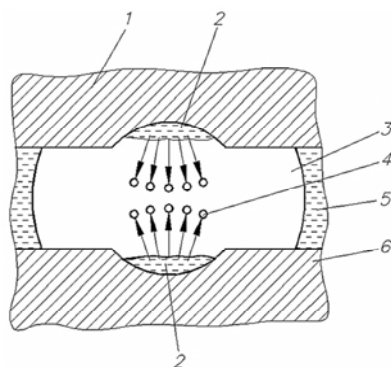


Рис. 11.3. Завершающая стадия единичного разряда:

- 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:

$$A_{И} = \int_0^{\tau_{И}} IU d\tau_{И}.$$

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

$$A_{И} = I_{СР} U_{СР} \tau_{И}.$$

При этом среднее значение напряжения пробоя

$$U_{СР} = (0,5-0,75)U_0,$$

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 $U_0 = 40-180$ В, при электроимпульсном – $U_0 = 18-36$ В. Электроэрозионную обработку в жидкой среде осуществляют при $U_0 = 18-40$ В, а в воздухе – при $U_0 = 3-12$ В.

Среднюю силу тока определяют через значение тока $I_{К}$ при коротком замыкании электродов $I_{СР} = (0,5-0,75)I_{К}$. 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 $I_{К} = 20-120$ А, при чистой – $I_{К} = 0,5-5$ А. При обработке твердых сплавов значение $I_{К} = 0,05-0,2$ А.

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

$$q = \frac{T}{\tau_{\text{И}}} (q > 1).$$

Учитывая, что $f = 1/T$, длительность импульса определяется

$$\tau_{\text{И}} = \frac{1}{qf}.$$

Длительность импульса зависит от обрабатываемого материала и режима обработки. Так, при черновой обработке сталей $\tau_{\text{И}} = 200\text{--}10^5$ мкс, при чистовой – $\tau_{\text{И}} = 5\text{--}200$ 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. К примеру, 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 соотношение максимального значения силы тока в импульсе к его длительности.

Основные технологические схемы электроэрозионной обработки

На сегодня применяется несколько технологических схем электроэрозионной обработки.

1. *Прошивание* – удаление металла из полостей, углублений, отверстий, пазов с наружных поверхностей. На рис. 11.4 приведены схемы изготовления углубления (рис. 11.4, а) и фасонного стержня (рис. 11.4, б). Электрод-инструмент 1 поступательно перемещается

к заготовке 2 со скоростью $V_{и}$. 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.

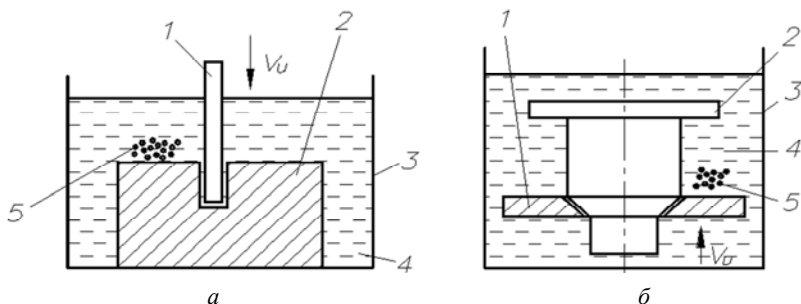


Рис. 11.4. Схема электроэрозионного прошивания:
a – прямое копирование; *б* – обратное копирование;
 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка;
 3 – ванна; 4 – диэлектрическая жидкость; 5 – продукты обработки

Применяются два варианта прошивания:

– прямое копирование, когда электрод-инструмент находится над заготовкой (рис. 11.4, *a*);

– обратное копирование с расположением заготовки над электродом-инструментом (рис. 11.4, *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, повышение точности обработки детали.

Прошивание профильным инструментом применяют:

- для изготовления пресс-форм, ковочных штампов;
- для предварительной обработки объемных заготовок сложной формы, например, лопаток турбин и компрессоров;
- для изготовления фасонных наружных поверхностей, имеющих переходы, препятствующие выходу металлорежущего инструмента;
- для изготовления фасонных ступенчатых внутренних поверхностей;

- для изготовления отверстий и систем отверстий произвольного сечения в труднообрабатываемых материалах, включая изготовление отверстий с криволинейной осью;
- для нарезания резьб на твердосплавных и закаленных стальных заготовках;
- для маркирования деталей;
- для удаления обломков сверл, метчиков и других инструментов;
- для получения соединительных каналов в деталях гидроаппаратуры.

2. *Электроэрозионное шлифование*, схема которого приведена на рис. 11.5. Она аналогична схеме традиционного круглого наружного шлифования с той только 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_u . 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.

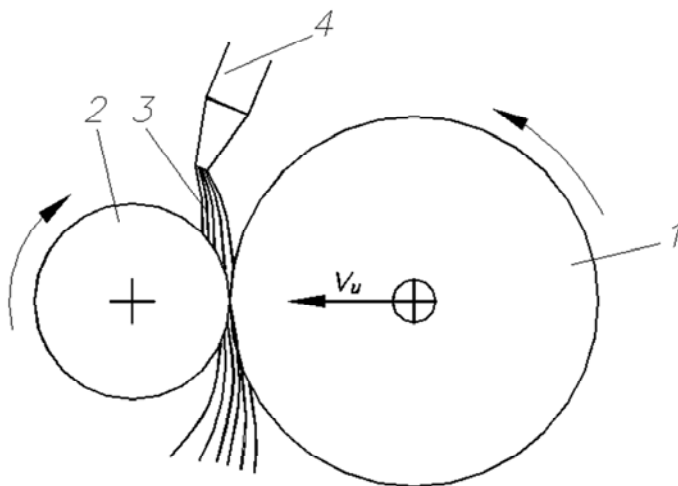


Рис. 11.5. Схема электроэрозионного шлифования:
 1 – вращающийся электрод инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка;
 3 – диэлектрическая жидкость; 4 – насадка

Электроэрозионное шлифование применяют:

- при изготовлении деталей из хрупких, вязких материалов и деталей, набранных из тонких листов (роторы электрических машин);
- при нарезании наружных резьб в деталях из твердых сплавов и закаленных сталей;
- при заточке твердосплавного режущего инструмента;
- для правки и профилирования электропроводных абразивных и алмазных кругов;
- для получения прецизионных отверстий.

3. *Разрезание профильным и непрофильным инструментом.* Оно включает разделение заготовок на части – *отрезание* – и получение непрямолинейного контура – *вырезание*, которое выполняется только непрофильным электродом-инструментом. При разрезании (рис. 11.6, а) профильный электрод-инструмент может быть выполнен в виде диска или пластины. Так вращающийся металлический диск-электрод 1 перемещается к заготовке 2 со скоростью $V_{\text{И}}$ 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.

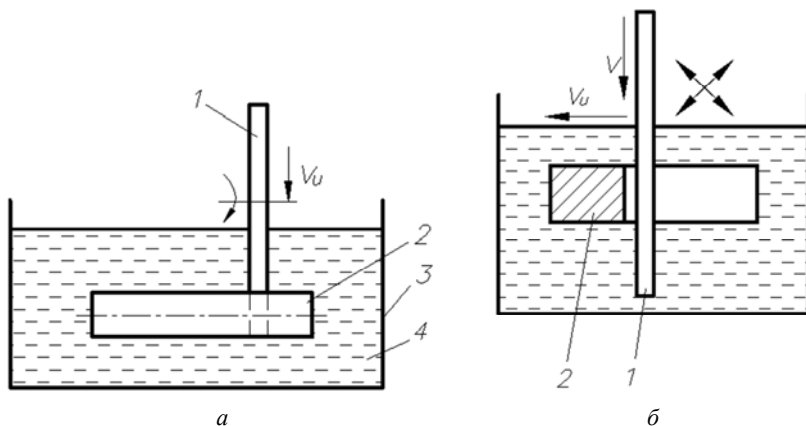


Рис. 11.6. Схема электроэрозионного разрезания:
а – отрезание; б – вырезание непрофильным инструментом;
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка;
3 – ванна; 4 – диэлектрическая жидкость

В случае применения непрофилированного электрода (рис. 11.6, б) инструмент I выполняют в форме круглой проволоки диаметром 0,02–0,3 мм или тонкого стержня, которые могут перемещаться в различных направлениях со скоростью $V_{\text{И}}$ 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.

Резание профильным электродом-инструментом применяется:

- для получения пазов и щелей малой ширины;
- для разрезания заготовок из вольфрама и других труднообрабатываемых материалов и сплавов.

Резание непрофилированным электродом-инструментом применяется:

- для получения сквозных или глухих щелей;
- для получения рабочей части резцов и других инструментов;
- для получения щелей в цангах для закрепления деталей малого диаметра (менее 2–3 мм);
- для вырезания деталей по контуру из листового материала.

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, к примеру, 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. 11.7) 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 сердцевинки 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.

После завершения прошивания оставшиеся отверстия, не связанные между собой, части метчиков или сверл легко удаляются из детали. В случае, когда необходимо удалить обломившуюся часть шпильки или болта из резьбового отверстия, в ней прошивают квадратное или шестиугольное углубление, причем за счет износа электрода-инструмента оно будет иметь угол уклона боковых стенок в пределах $2-6^\circ$. Затем в полученное углубление вставляют специальный ключ с рабочей частью, обратной форме углубления и вывертывают обломок, восстанавливая деталь.

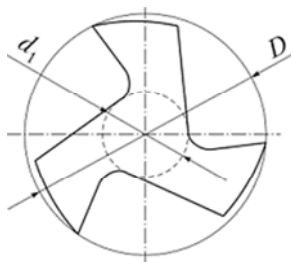


Рис. 11.7. Схема для определения диаметра электрода-инструмента при удалении обломка метчика

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

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 обязательно 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 соотношением $\frac{L}{d} = 20$ можно применять в качестве электрода-инструмента сплошной стержень, который имеет большую жесткость и при обработке на заготовке не образуется керн. Однако при использовании сплошного стержня по мере его заглубления в заготовку производительность обработки

снижается до 10–15 % от первоначальной. Кроме того, необходимость периодического введения 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 применять электроды-инструменты в виде трубки из меди, латуни, графитовых материалов. С одной стороны, эта конструкция имеет меньшую жесткость, внутри трубки образуется керн, 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.

При получении отверстий с $\frac{L}{d} > 40$ необходимо в процессе обработки удалить керн, остающийся на заготовке внутри трубчатого электрода-инструмента. С этой целью используют трубки 1, внутри которых вставлены детали 2 с нарезанным спиральным каналом (рис. 11.8, 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. 11.8, б) или квадратный стержень 4 (рис. 11.8, в). При этом в процессе обработки электроду-инструменту необходимо сообщать вращательное движение.

Отверстия диаметром менее 1 мм выполняют в форсунках, распылителях, сетках. При диаметре отверстия $d < 0,6–0,7$ мм используют цельные электроды из латунной или вольфрамовой проволоки 1 (рис. 11.9). Электрод подают в зону обработки через кондукторные втулки 4, изготовленные из рубина или других твердых диэлектриков. К заготовке 5 проволока перемещается 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 $\frac{L}{d} = 10–15$).

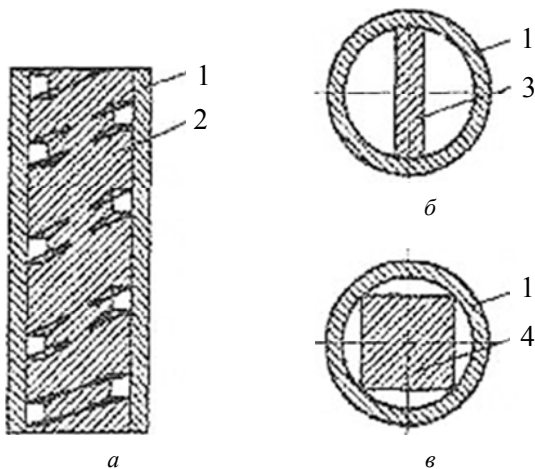


Рис. 11.8. Реконструкция трубчатых электродов-инструментов при прошивании особо глубоких отверстий:

a – с нарезанным спиральным каналом; *б* – с пластиной;

в – со стержнем квадратного сечения;

1 – трубка; 2 – деталь со спиральными канавками;

3 – пластина; 4 – квадратный стержень

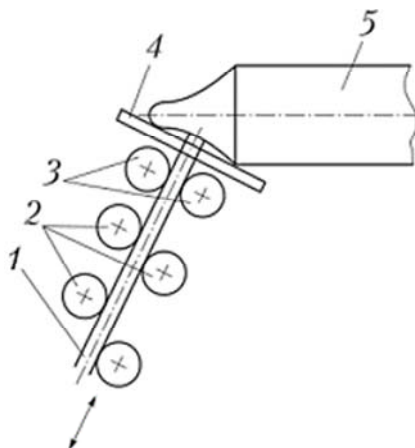


Рис. 11.9. Схема обработки отверстий диаметром менее 0,6 мм:

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. Обработывают отверстие, получая в заготовке заходный конус, как показано на рис. 11.10, а.

8. Стравливают электрохимическим способом конец электрода до проволоки на длину $h = (2-2,5)h_1$, где h_1 – длина не прошитого участка заготовки (рис. 11.10, б).

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

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 $R_a = 0,16-0,32$ мкм, при больших диаметрах – $R_z = 10-30$ мкм. Погрешность межосевого расстояния не превышает 5 мкм. При этом время обработки отверстия диаметром $d = 0,02-0,04$ мм составляет порядка 120 с, что в 3–6 раз меньше, по сравнению со сверлением.

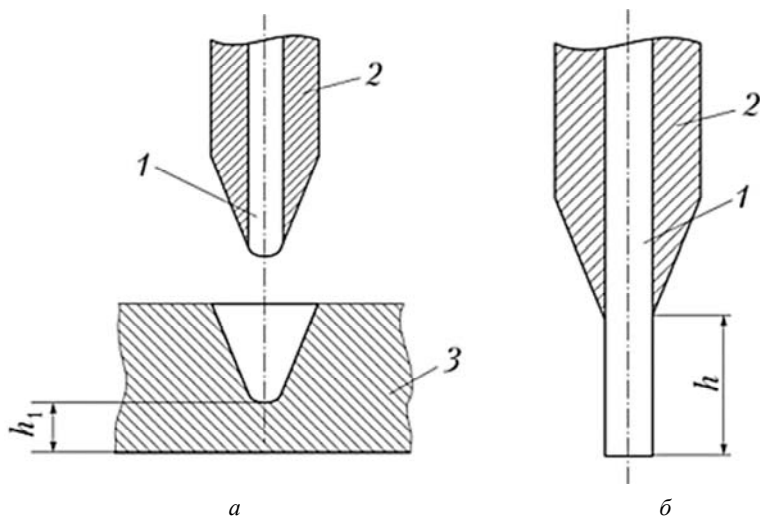


Рис. 11.10. Конструкция электрода-инструмента для прошивания отверстия диаметром менее 0,1 мм:

a – для получения заходной фаски;

б – для окончательной обработки отверстия;

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

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, то его можно получить только с применением электрических методов и, в частности, электроэрозионным прошиванием.

Для осуществления такой операции необходимо, чтобы размер L_y одного из углублений (рис. 11.11) и длина L_p рабочей части электрода-инструмента были больше толщины стенки L_c , в которой

необходимо получить канал. Общую длину $L_{И}$ электрода-инструмента рассчитывают по зависимости

$$L_{И} = L_{э} + L_{р},$$

где $L_{э}$ – размер электродержателя, и его определяют из условия обеспечения необходимой жесткости консольной части электродержателя.

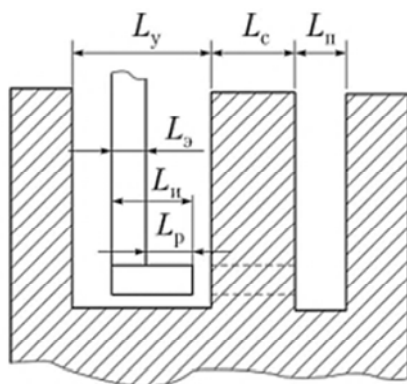


Рис. 11.11. Схема определения размеров электрода-инструмента при прошивании соединительных каналов

Длину $L_{р}$ рабочей части электрода-инструмента находят по формуле

$$L_{р} = kL_{с},$$

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

Однако во всех случаях требуется, чтобы $L_{р} \leq (L_{с} + L_{п})$, в противном случае необходимо использовать электрод-инструмент с выдвигающимся рабочим элементом.

Электроэрозионная обработка позволяет изготавливать детали, имеющие отверстия с криволинейной осью, что невозможно сделать при традиционных методах обработки металлов. На рис. 11.12 показана схема устройства для обработки таких отверстий.

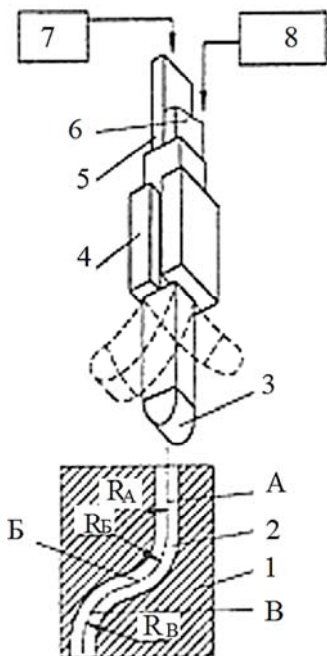


Рис. 11.12. Схема устройства для электроэрозионной обработки отверстий с криволинейной осью:

- 1 – деталь; 2 – отверстие; 3 – рабочая часть электрода-инструмента;
 4 – пластина; 5, 6 – гибкие проводки; 7, 8 – программные механизмы;
 А – прямолинейный участок; Б, В – криволинейные участки

Обработка в детали 1 отверстия 2 выполняется нежестким электродом-инструментом, рабочая часть 3 которого связана с гибкими поводками 5 и 6. На эти поводки действуют усилия, соотношение которых задается из условия обеспечения заданной кривизны отверстия на том или ином его участке. Так при равенстве усилий на поводки 5 и 6 электрод-инструмент получает прямолинейное движение в следящем режиме подачи, и таким образом обрабатывается прямолинейный участок А отверстия. При приложении различных усилий рабочая часть 3 электрода-инструмента поворачивается, формируя криволинейный участок Б или В отверстия. Для соответствующего изменения усилий на поводки 5 и 6 применяются программные механизмы 7 и 8 с электрогидравлическим или электро-механическим приводом.

Сущность процесса электроэрозионного модифицирования металлических поверхностей и условия его осуществления

На кафедре «Конструирование и производство приборов» БНТУ разработан способ электроэрозионного модифицирования металлических поверхностей с целью придания им технологических или иных эксплуатационных показателей.

Как было показано выше, в процессе электроэрозионной размерной обработки изменение размеров и формы заготовки происходит в результате удаления металла за счет воздействия серии импульсов на смежные участки ее поверхности, то есть за счет перекрытия лунок. При этом форма и размеры лунки будут отличаться от параметров углубления после единичного разряда. На рис. 11.13 показано изменение диаметра лунки $d_{л}$ и ее глубины $h_{л}$ по сравнению с теми же параметрами (d_1 , h_1) после единичного разряда.

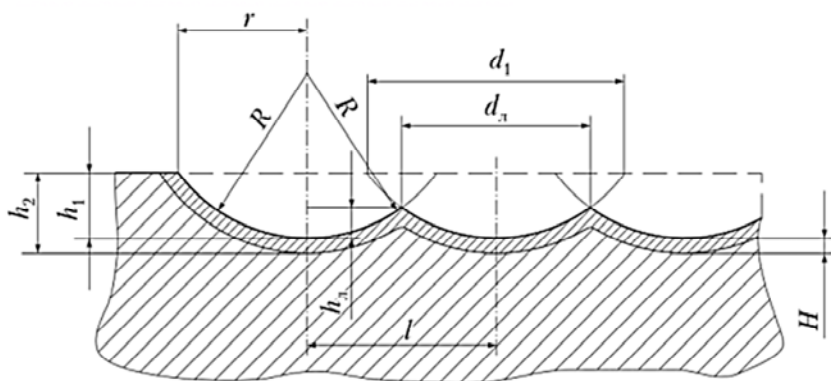


Рис. 11.13. Схема формирования шероховатости поверхностей при электроэрозионной обработке

Как видно значения d_1 и h_1 превышают величины $d_{л}$ и $h_{л}$, причем эта разница будет зависеть от расстояния l между центрами соседних лунок. Поэтому для оценки взаимного влияния импульсов используют коэффициент перекрытия лунок $\beta = l / d_{л}$, при условии, что $l < d_{л}$.

Принципиальное отличие электроэрозионного модифицирования от размерной электроэрозионной обработки заключается в том, что формируемые на ней лунки не перекрывают друг друга, а распола-

гаются на ней с определенной закономерностью. Очевидно, чтобы реализовать эту закономерность необходимо выполнить два принципиально важных условия выполнения операции. Во-первых, обеспечить точное и управляемое место воздействия электрического разряда на обрабатываемую поверхность, для чего необходимо локализовать зону его прохождения, а соответственно, место формирования на ней единичной лунки. Во-вторых, обеспечить управляемое перемещение поверхности или инструмента в заданном направлении относительно друг друга за промежуток времени между двумя последовательными разрядами с целью получения требуемого шага между лунками.

Заметим, что в процессе размерной ЭЭО место прохождения электрического разряда между электродом-инструментом и обрабатываемой поверхностью определяется местом расположения на данный момент минимального МЭП. При этом, чем больше площадь рабочей поверхности электрода-инструмента, тем в большей степени варьируется место расположения минимального МЭП, а соответственно, и место воздействия электрического разряда на обрабатываемую поверхность. Следовательно, чтобы обеспечить выполнение первых условий, то есть локализовать место воздействия электрического разряда на обрабатываемой поверхности, необходимо использовать электрод-инструмент с минимально возможной площадью рабочей поверхности. В качестве такого инструмента оправдано использовать тонкую металлическую проволоку или пластину. Для реализации второго условия необходимо использовать привод, обеспечивающий, за время между двумя последовательными разрядами, относительное перемещение электрода-инструмента и обрабатываемой поверхности на величину требуемого шага расположения лунок. В этом случае целесообразно использовать коэффициент расположения лунок $\beta = l / d_n$, который больше единицы.

Учитывая, что в процессе ЭЭО электрод-инструмент изнашивается, а для поддержания постоянной величины МЭП необходимо использовать сложные следящие системы, что представляется целесообразным при компенсации влияния его износа на протекание процесса модифицирования, а также при упрощении его выполнения, сообщать электроду-инструменту колебания, направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности и использовать релаксационную схему генератора импульсов, как показано на рис. 11.14.

Она состоит из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора C и токоограничивающего резистора R . Положительный полюс ИП подключен к заготовке 2, а отрицательный – к электроду-инструменту 1 (прямая полярность). Последнему сообщаются колебания частотой f , действующие перпендикулярно обрабатываемой поверхности заготовки. В этом случае однократный акт взаимодействия этих поверхностей включает в себя следующее протекание следующих основных стадий. Стадия их сближения, когда электрод-инструмент из своего крайнего верхнего положения двигается вниз; стадия пробоя МЭП, когда рабочая поверхность электрода-инструмента располагается относительно поверхности заготовки на расстоянии, соответствующем значению минимального МЭП, которая заканчивается формированием на поверхности заготовки лунки 3 диаметром d_n ; стадия механического контактирования поверхностей электрода-инструмента и заготовки; стадия разрыва их механического контакта, когда электрод-инструмент перемещается вверх до своего крайнего положения. Таким образом, в этом случае реализуются условия электроконтактной (электроискровой) обработки, которая является разновидностью ЭЭО.

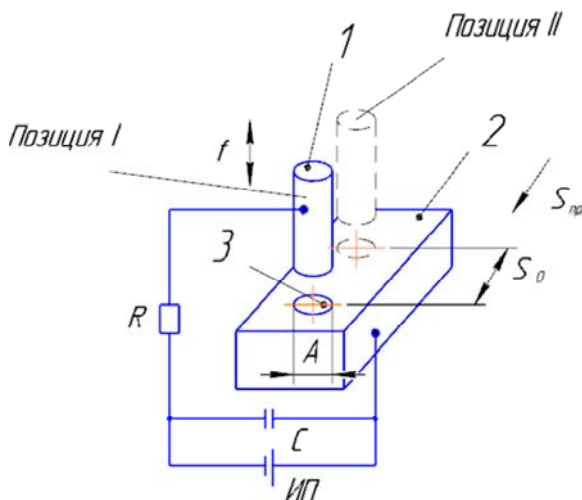


Рис. 11.14. Схема расположения электрода-инструмента относительно обрабатываемой поверхности при ее модифицировании:

1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – лунка

Для получения требуемого шага расположения лунок на модифицированной поверхности необходимо, чтобы электрод-инструмент переместился относительно ее из позиции *I* в позицию *II*. Это обеспечивается соответствующим перемещением заготовки с подачей *S* равной *l*. При этом необходимо, чтобы выполнялись следующие условия. Период колебаний *T* электрода-инструмента, то есть промежуток времени между двумя последовательными разрядами, должен быть больше времени, необходимого для зарядки накопительного конденсатора *t_з*, которое определяется $t_з = RC$, а время перемещения заготовки в следующую позицию *t_{пер}* должно быть больше или равно периоду колебаний электрода-инструмента, то есть $t_{пер} > T$. Если использовать дискретный привод перемещения заготовки с частотой *f_з*, то она должна быть равна или больше частоты следования разрядов, то есть $f_з \geq f$. Амплитуда колебаний электрода-инструмента *A_{эл}* должна превышать глубину лунки *h_л*, образовавшейся на поверхности заготовки плюс величину минимального МЭП *z_{мин}*, соответствующую его пробую, то есть $A_{эл} > h_{л} + z_{мин}$.

Устройство электроэрозионного модифицирования металлических поверхностей

На рис. 11.15 приведена схема устройства модифицирования металлических поверхностей, реализующих вышеуказанные условия.

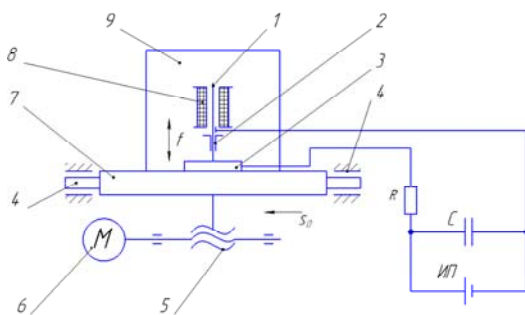


Рис. 11.15. Принципиальная схема устройства модифицирования металлических поверхностей:

- 1* – проволока; *2* – направляющая втулка; *3* – заготовка;
- 4* – направляющие; *5* – передача «винт-гайка»; *6* – шаговый электродвигатель;
- 7* – подвижная каретка; *8* – электромагнит; *9* – вертикальная стойка;
- ИП – источник питания; *C* – конденсатор; *R* – резистор

Обрабатываемый образец (заготовка) 3 закрепляется на поверхности подвижной каретки 7, которая имеет возможность перемещаться по направляющим 4 в горизонтальном направлении. Это движение она получает от шагового электродвигателя 6 (ДШИ-3) посредством передачи «винт-гайка» 5. На вертикальной стойке 9, выполненной из диэлектрического материала, смонтирован электромагнит 8, на якоре которого закреплена тонкая, диаметром 0,3 мм, стальная проволока, выполняющая роль электрода-инструмента. С помощью электромагнита проволоке сообщаются продольные колебания, действующие перпендикулярно обрабатываемой поверхности, благодаря чему происходит их периодическое контактирование. Для обеспечения высокой точности позиционирования торца проволоки (электрода-инструмента) относительно обрабатываемой поверхности применена направляющая втулка 2, в отверстии которой проволока перемещается по скользящей посадке. Электрод-инструмент и заготовка включены в электрическую цепь, состоящую из источника питания ИП постоянного тока, накопительного конденсатора C и токоограничивающего резистора R . При однократном включении электромагнита электрод-инструмент перемещается к поверхности образца и на расстоянии, равном минимальному МЭП, между ними протекает электрический разряд, вызывающий формирование на обрабатываемой поверхности единичной лунки. После завершения стадии механического контактирования этих поверхностей, электрод-инструмент поднимается вверх в свое исходное положение и одновременно от источника ИП происходит зарядка конденсатора C . При следующем включении электромагнита указаний процесс формирования очередной лунки на поверхности образца повторяется.

Применение электрода-инструмента в виде тонкой стальной проволоки с весьма малой площадью его рабочей (торцевой) поверхности ($0,031 \text{ мм}^2$) позволило технически реализовать первое из выше указанных условий: локализовать зону прохождения электрического разряда в момент пробоя МЭП. Благодаря применению направляющей втулки, обеспечивается точное позиционирование места воздействия электрического разряда на обрабатываемой поверхности, то есть места формирования на ней единичной лунки.

Обеспечение требуемого шага между центрами соседних лунок технически реализуется путем применения в качестве привода пе-

ремещения заготовки шагового электродвигателя. С помощью блока управления (БУ) задается требуемый дискретный шаг угла поворота работы электродвигателя, при котором с учетом передачи «винт-гайка» заготовка перемещается за время между двумя последовательными разрядами на величину требуемого шага расположения лунок. При этом после каждого дискретного перемещения заготовки от БУ поступает сигнал на срабатывание электромагнита, и протекает однократный акт взаимодействия электрода-инструмента с поверхностью заготовки, в результате чего на ней формируется очередная лунка. На рис. 11.16 приведена фотография участка поверхности титановой заготовки с полученными на ней в результате модифицирования лунками.

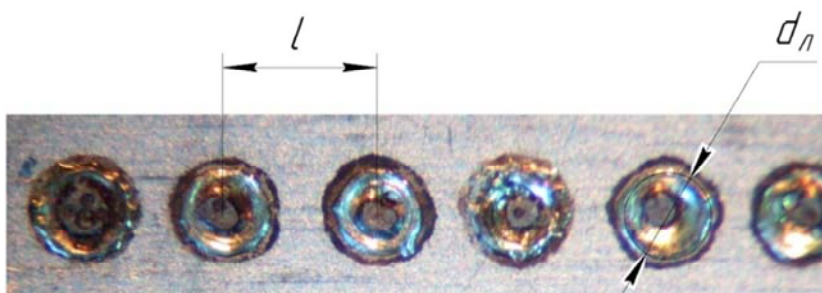


Рис. 11.16. Фотография участка поверхности титановой заготовки с полученными на ней в результате модифицирования лунками

Эксплуатационные характеристики модифицированной металлической поверхности

Модифицирование металлической поверхности позволяет придать ей характеристики, которые могут быть эффективно использованы для решения ряда технологических задач. В частности, модифицирование позволяет получать поверхности с частично регулярным микрорельефом. Под *поверхностью с частично регулярным микрорельефом* понимается поверхность с элементами микрорельефа, форма, расположение и размер которых обусловлены определенной закономерностью и между которыми имеются участки исходной поверхности. Наличие на поверхности такого микрорельефа способствует повышению ее эксплуатационных показателей: придает ей высокую однородность, повышает ее емкость, адсорбцион-

ную способность и смачиваемость при взаимодействии с жидкостями, а также коррозионную стойкость.

Модифицирование исходной гладкой поверхности инструментов позволяет повысить ее режущую способность при распиливании хрупких неметаллических материалов с использованием свободного абразива. По сравнению с инструментами с абразивно-алмазным покрытием, инструменты с гладкой поверхностью обеспечивают меньшую ширину пропила и более высокое качество поверхности распила, что принципиально важно при распиливании дорогостоящего сырья с целью его экономии. Однако они существенно уступают первой по производительности выполнения операции, так как разрушение материала происходит главным образом за счет воздействия на него перекатывающихся в зоне обработки абразивных зерен. Следовательно, для повышения производительности выполнения операции необходимо устранить или, по крайней мере, существенно ограничить явление перекатывания абразивных зерен в зоне обработки. В результате модифицирования поверхности инструмента на ней образуется совокупность не перекрывающих друг друга лунок, препятствующих перекатыванию абразивных зерен в зоне обработки и способствующих их закреплению на поверхности инструмента, чем обеспечивается повышение производительности выполнения операции.

Модифицирование исходной гладкой поверхности инструментов позволяет придать ей режущую способность при распиливании материалов, уступающих по твердости металлу инструмента. Эту способность ей придают образовавшиеся по краю лунки наплывы (валики) металла, выходящие за исходный контур поверхности (рис. 11.17).

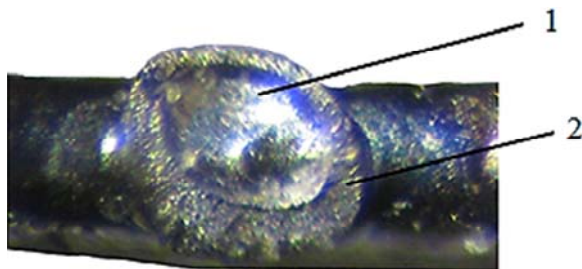


Рис. 11.17. Фотография единичной лунки, полученной на рабочей поверхности тонкой пластины (штрипса):
1 – лунка; 2 – наплывы металла по ее краю

Сопряжение наружной и внутренней поверхностей наплывов металла образует своеобразную режущую кромку, которая в плане имеет замкнутый контур, близкий к окружности, и скругленную в диаметральном сечении выступающую часть (аналог зуба). Поэтому наплывы металла по краю лунки оправдано рассматривать как режуще-деформирующие элементы, способные разрушать материалы, уступающие по твердости металлу наплывов.

С целью наглядного подтверждения этого положения в данной лабораторной работе предусмотрено модифицирование исходной гладкой поверхности проволочного инструмента с последующей оценкой ее режущей способности. Для этого используется специальное устройство, описание и принцип работы которого приведена ниже.

Описание экспериментальных установок

Устройство модифицирования исходной гладкой поверхности проволочного инструмента и оценки ее режущей способности

На рис. 11.18 представлена принципиальная схема данного устройства

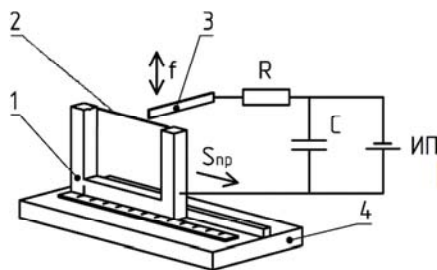


Рис. 11.18. Принципиальная схема устройства для модифицирования исходной гладкой поверхности проволочного инструмента и оценки ее режущей способности:
1 – рамка; 2 – проволока; 3 – электрод-инструмент

На массивном основании из диэлектрического материала (дерева) смонтированы горизонтальные направляющие. На их подвижной части установлена стальная рамка, между концами которой в натянутом состоянии закреплен отрезок стальной (У8А) проволоки диаметром 0,3 мм. В качестве электрода-инструмента используется тонкая, толщиной 0,3 мм, стальная пластина, которой вручную

сообщаются колебания с частотой 1–1,5 Гц, направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности проволоки. Рамка и электрод-инструмент включены в электрическую цепь, состоящую из источника питания ИП постоянного тока, накопительного конденсатора С и токоограничивающего резистора R. В процессе модифицирования рамка с проволокой остаются неподвижными, а для обработки поверхности по всей длине электрод-инструмент (пластина) после каждого очередного разряда вручную смещается вдоль оси проволоки примерно на 1,5–2 мм.

По завершению операции модифицирования поверхности проволоки проводятся эксперименты по подтверждению ее режущей способности. Для этого от электродвигателя (РД-09-А) посредством кривошипно-шатунного механизма подвижной направляющей с рамкой сообщаются возвратно-поступательное движение с частотой 30 двойных ходов в минуту с длиной хода 70 мм. Затем к модифицированной поверхности проволоки вручную прижимается деревянный образец, к примеру, карандаш, и по истечении 1–2 минут обработки, визуально оценивается полученный на его поверхности след, подтверждающий наличие процесса резания. Одновременно, подставив снизу проволоки листок чистой бумаги и встряхнув проволоку, собрать продукты разрушения, которые также подтверждают тот факт, что модифицированная поверхность обладает режущей способностью.

На рис. 11.19 представлена фотография общего вида устройства для модифицирования исходной гладкой поверхности проволоочно-го инструмента и оценки ее режущей способности.

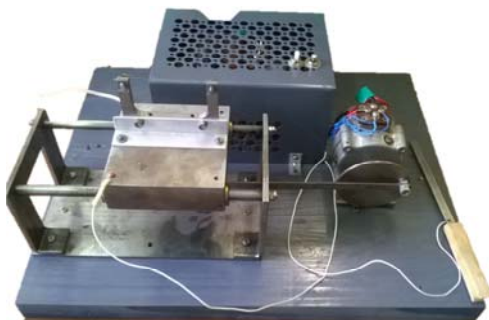


Рис. 11.19. Фотография общего вида устройства для модифицирования исходной гладкой поверхности проволоочно-го инструмента и оценки ее режущей способности

Порядок выполнения работы

Измерение параметров единичных лунок

1. Получить у инженера образец из соответствующего металла (рис. 11.20) на полированной поверхности которого предварительно получены лунки в результате воздействия электрического разряда при различном напряжении U накопительного конденсатора 40, 60 и 80 В при его емкости 350 мкФ. Часть лунок получена при обработке на воздухе, а часть – при использовании в качестве диэлектрической жидкости дистиллированной воды.



Рис. 11.20. Фотография полированной поверхности образца с полученными на ней лунками

При неизменных режимах и условиях обработки на поверхности образца получены три лунки, расположенные в диаметральном направлении.

2. С помощью малого инструментального микроскопа измерить диаметр лунок d_l и диаметр наплывов металла d_n по их краям и вычислить среднее значение этих параметров при неизменных условиях воздействия единичного разряда.

3. По результатам выполненных измерений построить график зависимости значений d_l и d_n от напряжения U накопительного конденсатора при обработке на воздухе и с применением дистиллированной воды.

4. Проанализировать полученные экспериментальные данные и сделать соответствующие выводы о влиянии напряжения накопительного конденсатора и наличия дистиллированной воды на диаметр единичной лунки и диаметр наплывов металла по ее краю.

Модифицирование исходной гладкой поверхности проволочного инструмента и оценка ее режущей способности

1. Натянуть и закрепить отрезок стальной проволоки на стальной рамке устройства модифицирования ее поверхности.

ОБЯЗАТЕЛЬНО надеть защитные очки

2. Включить на панели управления устройства (рис. 11.21) тумблер питания генератора импульсов *1*.



Рис. 11.21. Фотография панели управления устройства:
1 – тумблер питания генератора импульсов; *2* – тумблер питания электродвигателя

3. Взять рабочей рукой пластину (электрод-инструмент) за изолированную часть. Расположить пластину сверху проволоки и последующим движением вниз довести ее до контакта с обрабатываемой поверхностью, после чего поднять вверх. В момент их сближения между ними возникнет электрический разряд (рис. 11.22) с формированием на поверхности проволоки единичной лунки.

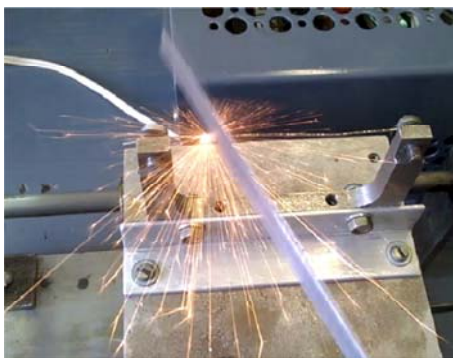


Рис. 11.22. Фотография момента электроискрового разряда между пластиной и проволокой

4. Переместить электрод-инструмент (пластину) вдоль оси проволоки на 1,5–2 мм и повторить процедуру получения между ними электрического разряда и так до окончания модифицирования поверхности проволоки по всей ее длине. После чего отключить на панели управления тумблер питания генератора импульсов.

5. Включить на панели управления устройства тумблер питания электродвигателя 2 (рис. 11.21), после чего рамка с обработанной проволокой начнет совершать возвратно-поступательное движение.

6. Вручную с небольшим усилием прижать к движущейся модифицированной поверхности проволоки образец из материала, уступающего по твердости металлу проволоки, например, деревянный карандаш (рис. 11.23).

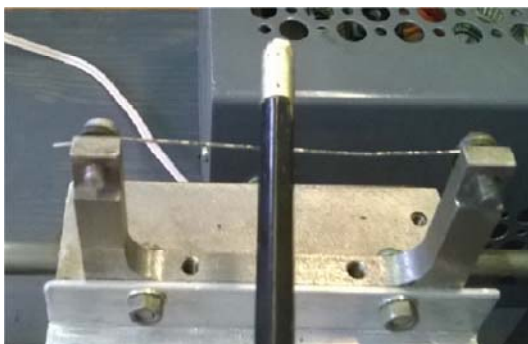


Рис. 11.23. Фотография расположения распиливаемого образца (карандаша) при оценке режущей способности модифицированной поверхности проволоки

7. По истечении 30–40 секунд обработки, отвести образец (карандаш) от поверхности проволоки, отключить на панели управления питание электродвигателя.

8. Визуально изучить состояние полученного на поверхности образца (карандаша) следа обработки и сделать соответствующий вывод о режущей способности модифицированной поверхности проволочного инструмент.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.

3. Теоретическая часть.

4. Практическая часть:

4.1. Схема устройства для модифицирования поверхности проволочного инструмента и последующей оценки ее режущей способности.

4.2. Результаты измерения диаметров лунок и диаметров напывов металла по их краю, полученных на полированной поверхности образца при различном напряжении накопительного конденсатора как при обработке на воздухе, так и с использованием дистиллированной воды.

5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. На каком явлении основаны электроэрозионные методы обработки?

2. Что такое прямая и обратная полярность?

3. Перечислить основные стадии однократного акта удаления металла в процессе электроэрозионной обработки.

4. Назовите основные технологические схемы электроэрозионной обработки и области их применения.

5. Чем принципиально отличается электроэрозионное модифицирование поверхности от размерной электроэрозионной обработки?

6. Какие условия необходимо обеспечить для осуществления процесса модифицирования металлической поверхности?

7. Какими эксплуатационными показателями характеризуется модифицированная металлическая поверхность?

8. Что обеспечивает придание модифицированной металлической поверхности режущей способности?

Литература

1. Киселёв, М. Г. Электроэрозионная обработка материалов : учебно-методическое пособие / М. Г. Киселёв, Ю. Ф. Ляшук, В. Л. Габец. – Мн. : УП «Технопринт», 2003. – 112 с.

2. Золотых, Б. Н., Мельдер, Р. Р. Физические основы электроэрозионной обработки. – М. : Машиностроение, 1977. – 43 с.

Лабораторная работа № 12

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Цель работы

1. Изучить сущность и особенности магнитно-абразивной обработки материалов.
2. Изучить магнитно-абразивные порошки и смазочно-охлаждающие жидкости для магнитно-абразивной обработки.
3. Изучить технологические схемы магнитно-абразивной обработки поверхностей.
4. Изучить конструкцию и принцип работы устройства магнитно-абразивной обработки с постоянными магнитами.
5. Провести эксперименты по магнитно-абразивной обработке образцов.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Устройство магнитно-абразивной обработки с использованием постоянных магнитов.
2. Магнитно-абразивный порошок.
3. Микроскоп МИМ-5.
4. Обрабатываемые образцы.

Теоретическая часть

Краткая характеристика методов абразивной обработки материалов

Известные методы абразивной обработки принято подразделять на два основных вида, отличающихся состоянием зерен в инструменте: закрепленном или свободном.

В первом случае (*закрепленном*) алмазные или другие разновидности абразивных зерен сцементированы связкой в круг, брусок, сегмент, головку и тому подобный режущий инструмент.

Обработка связанным абразивом обеспечивает высокую производительность, точность геометрических форм обрабатываемых поверхностей и их сравнительно малую шероховатость. Однако такому

виду обработки присущи следующие особенности, ограничивающие его применение. В частности, прерывистость режущей кромки, разно-высотность расположения зерен, создающая при резании перенапряжение отдельных зерен и локальных зон обрабатываемой поверхности, выкрошивание или вырывание зерен из связки. Трение последней и скольжение зерен по обрабатываемой поверхности приводят к тому, что порядка 80 % всей механической работы шлифования переходит в теплоту, вызывая прижоги на поверхности заготовки и значительные деформации ее поверхностного слоя.

При обработке *свободным* зерном абразив используется в виде порошка, входящего в состав суспензии, т. е. с применением жидкой фазы. В незакрепленном состоянии зерна абразива более полно используют свои режущие способности, так как они постоянно переориентируются относительно обрабатываемой поверхности (перекатываются в зоне обработки) и перемешиваются в процессе работы. Такие методы позволяют при сравнительно простых кинематических схемах оборудования обрабатывать поверхности сложной геометрической формы, при этом существенно снижается температурный режим в зоне обработки.

В последнее время широко исследуются и получают практическое применение методы, при которых используют инструмент с подвижно-связанными зёрнами, т. е. методы магнитно-абразивной обработки (МАО) или магнитно-абразивного полирования (МАП). При такой обработке в роли связки абразивных зерен используется магнитное поле, обладающее упругими силами воздействия на единичные зерна. Причем степень упругости этой связки легко регулируется за счет изменения напряженности магнитного поля. Таким образом, МАО может приближаться к условиям обработки связанным или свободным абразивом, используя, тем самым преимущества первого или второго метода обработки в одном рабочем цикле.

Сущность и особенности процесса магнитно-абразивной обработки

Магнитно-абразивная обработка (МАО) представляет собой способ финишной обработки металлических и неметаллических деталей с помощью ферроабразивного материала (абразивных частиц, обладающих магнитными свойствами), удерживаемого в магнитном поле. Ферроабразивные частицы формируют своеобразный магнит-

но-абразивный инструмент, в котором роль связки выполняет магнитное поле. Съем материала осуществляется в результате силового воздействия зерен порошка на обрабатываемую поверхность при их относительных движениях. Схема МАО цилиндрических деталей и фотографии зоны обработки представлены на рис. 12.1.

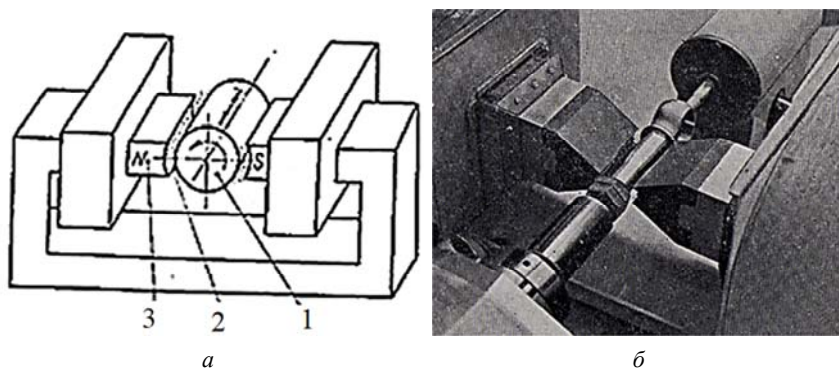


Рис. 12.1. Схема МАО цилиндрических деталей (а) и фотография зоны обработки (б):
1 – деталь; 2 – порошок; 3 – электромагнит

Обрабатываемая деталь 1 помещается между полюсными наконечниками электромагнита 3 с зазорами. В них подается порошок 2, обладающий магнитными и абразивными свойствами. С помощью механических приводов детали сообщается вращательное движение вокруг оси и колебательное (осциллирующее) движение вдоль нее.

Силами магнитного поля зерна порошка удерживаются в рабочих зазорах, прижимаются к поверхности детали и таким образом осуществляется ее обработка. В рабочую зону подается технологическая жидкость, являющаяся носителем поверхностно-активных веществ (ПАВ). Она обеспечивает протекание процесса электролиза, в ходе которого растворяется как поверхностный слой детали, что ускоряет съем металла, так и ферромагнитная основа зерен порошка, в результате чего обеспечивается вскрытие абразивной части и повышение их режущей способности.

МАО представляет собой ориентированное и избирательное абразивное микрорезание и микровыкальвание. Сущность этого процесса состоит в том, что при сравнительно больших величинах мик-

ровыступов на обрабатываемой поверхности зерна микропорошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, которые являются концентраторами магнитных силовых линий. При этом каждый рабочий элемент (зерно) устанавливается в магнитном поле наибольшей своей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. При износе и затуплении их вершин происходит переориентирование зерна таким образом, что вновь образовавшаяся наибольшая ось направляется вдоль магнитных силовых линий. В результате процесс обработки поверхности заготовки осуществляется острыми кромками зерен, т. е. имеет место процесс ориентированного абразивного резания.

Особенностями процесса МАО являются:

– непрерывный контакт порошка с обрабатываемой поверхностью детали, что дает возможность повысить точность ее геометрических размеров и формы, а так же снизить циклические нагрузки в системе СПИД;

– отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке, способствующее самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно формы обрабатываемой поверхности;

– возможность управления жесткостью инструмента и регулирования за счет этого съема материала с поверхности заготовки и ее шероховатости;

– возможность резания материала наиболее острой кромкой магнитно-абразивного порошка, за счет чего отпадает необходимость периодической заточки инструмента;

– отсутствие трения связки о поверхность заготовки, что существенно снижает температуру в зоне обработки;

– исключение явления засаливания инструмента, что позволяет эффективно обрабатывать мягкие и вязкие материалы.

Характерной особенностью МАО является то, что при обработке магнитных материалов в техпроцессе предусматривается операция демагнитизации (размагничивания) обрабатываемой детали.

Магнитно-абразивные порошки и смазочно-охлаждающие жидкости для МАО

Использование при МАО традиционных абразивных материалов в качестве режущего инструмента невозможно, так как они не обладают магнитными свойствами. Одной из особенностей МАО является

многократное использование магнитно-абразивного порошка. Поэтому эффективность процесса MAO зависит не только от магнитных и абразивных свойств порошка, но и от прочности соединения ферромагнитной и абразивных его составляющих. Помимо этого, важное значение имеют также микротвердость, гранулометрический состав, форма частиц, химическая активность к окружающей среде, технологичность в изготовлении и стоимость магнитно-абразивного порошка.

В качестве абразивного материала для MAO используются композиционные ферроабразивные порошки, состоящие из абразивных частиц и магнитной связки. В качестве магнитной связки используют железо (при работе в постоянном магнитных полях), а также магнитотвердые материалы (при работе в переменных полях) такие, как гексаферрит бария $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, сплавы Fe-Ni-Al и Fe-Ni-Al-Co. В качестве абразивных частиц используют алмаз, эльбор (кубический нитрид бора), карбид бора, карборунд (карбид кремния) и корунд.

Эффективным является использование тугоплавких соединений. Обусловлено это тем, что абразивные свойства тугоплавких соединений карбидов, боридов переходных металлов IVa-VIa групп оказываются выше абразивных свойств электрокорунда, что связано с их высокой твердостью и прочностью, а также физико-химической инертностью тугоплавких абразивов к обрабатываемому материалу.

Существенным преимуществом использования тугоплавких соединений в магнитно-абразивных порошках является то, что в процессе их приготовления, при температуре 1200–1300 °С, между магнитной составляющей железа и абразивной составляющей карбидов и боридов образуются диффузные зоны, способствующие созданию прочной химической связи зерен железа с зернами тугоплавкого соединения. Эта связь обуславливает механическую прочность как в процессе измельчения брикетов, так и при магнитно-абразивной обработке. Достоинством тугоплавких соединений является также их высокая теплопроводность, сравнимая с теплопроводностью обрабатываемых материалов. Это уменьшает локализацию тепла на границе между обрабатываемой поверхностью и магнитно-абразивным порошком, обеспечивая тем самым улучшение качества поверхностного слоя обрабатываемой заготовки.

Наиболее эффективным при MAO является порошок на основе железа и карбида титана Fe-TiC, который при прочих равных условиях обеспечивает наибольший удельный съем материала и наимень-

шую шероховатость, по сравнению с другими магнитно-абразивными порошками.

Технологическая схема изготовления таких порошков аналогична изготовлению деталей методом порошковой металлургии. Отличие состоит в том, что из смеси железного порошка и карбида титана прессуются брикеты, затем они спекаются, а после этого происходит дробление брикетов и размол в порошок.

Как уже указывалось, при MAO роль СОЖ заключается в доставке в зону обработки поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые обеспечивают механохимический процесс съема материала. То есть в этом случае происходит химическое взаимодействие поверхностно-активных веществ с обрабатываемой поверхностью, которые механически удаляются с помощью магнитно-абразивного порошка. В качестве таких веществ применяют олеиновую и стеариновую кислоты, которые вводятся в состав СОЖ.

Технологические схемы магнитно-абразивной обработки

С помощью MAO можно обрабатывать внутренние и наружные цилиндрические поверхности, плоские поверхности, поверхности вращения с криволинейной образующей (фасонные поверхности), винтовые поверхности, поверхности с эвольвентным, трапецидальным и другим профилем. Технологические схемы MAO могут быть классифицированы по следующим признакам:

- 1) по функциональному назначению магнитного поля;
- 2) по форме обрабатываемых поверхностей;
- 3) по типу используемого магнитного индуктора.

Согласно функциональному назначению магнитного поля различают следующие группы способов MAO:

Группа I. Магнитное поле формирует из ферроабразивной массы режущий инструмент с управляемой жесткостью и создает силы резания.

Группа II. Магнитное поле формирует из ферроабразивной массы режущий инструмент с управляемой жесткостью, создает силы резания и сообщает режущему инструменту движения резания.

Группа III. Магнитное поле сообщает силы и движения резания несформированной ферроабразивной массе.

Группа IV. Магнитное поле сообщает необходимые для резания движения непосредственно заготовке или жесткому абразивному инструменту.

По форме обрабатываемых поверхностей схемы МАО разделяются на:

- схемы обработки наружных поверхностей вращения;
- схемы обработки внутренних поверхностей вращения;
- схемы обработки плоскостей и линейных фасонных поверхностей;
- схемы обработки трехмерных фасонных поверхностей.

По типу используемого магнитного индуктора схемы МАО разделяются на:

- схемы с электромагнитными индукторами постоянного тока;
- схемы с электромагнитными индукторами переменного тока;
- схемы с электромагнитными индукторами трехфазного тока;
- схемы с индукторами на постоянных магнитах.

При МАО качество обработанных изделий прежде всего зависит от относительного движения в системе деталь-инструмент. Инструментом в данном случае служит совокупность частиц магнитно-абразивного порошка, связанных между собой и удерживаемых в рабочей зоне энергией магнитного поля. В настоящее время известно большое количество технологических схем МАО, отличающихся формой обрабатываемой поверхности и видами относительного движения заготовки и магнитно-абразивного порошка. Поэтому остановимся только на некоторых из них, которые получили наибольшее распространение.

На рис. 12.2 приведена схема МАО наружных поверхностей тел вращения.

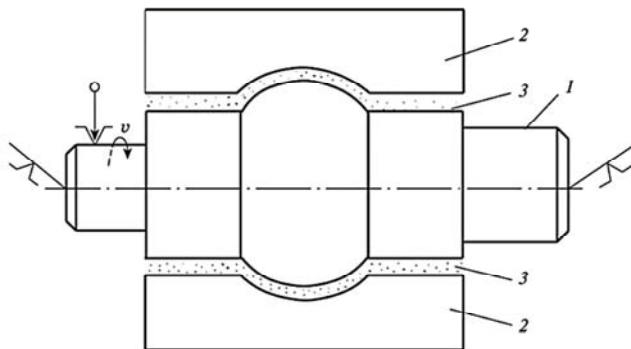


Рис. 12.2. Схема МАО наружных поверхностей тел вращения

Схема, представленная на рис. 12.2, отличается от ранее приведенной на рис. 12.1, *a* тем, что заготовке *1*, помимо вращательного движения вокруг оси, сообщается качательное движение, что позволяет интенсифицировать процесс за счет повышения самозатачиваемости магнитно-абразивной массы.

Выполняют MAO при относительно невысоких окружных скоростях вращения ($v = 1-3$ м/с), осцилляции с амплитудой колебательной скорости детали $v_k = 0,15-0,3$ м/с, амплитуде колебательных смещений $A = 0,5-2$ мм, магнитной индукции в рабочем зазоре $B = 1-2$ Т и зернистости порошка $0,1-0,2$ мм.

Как уже отмечалось, принципиально важным достоинством MAO является возможность одновременной обработки на одной рабочей позиции разных по геометрической форме и размерам поверхностей (цилиндрической, конической, сферической и т. д.). То есть исключение нескольких переходов, перебазирования заготовки, смены инструмента и его фасонной правки. В качестве примера на рис. 12.3 представлены фотографии изделий после MAO

На валике *1* одновременно обрабатываются две цилиндрические поверхности разного диаметра, переходная коническая поверхность между ними, торец и гантель. У колец подшипников одновременно осуществляется полирование их цилиндрических поверхностей и обработка внутренних торцов буртиков.

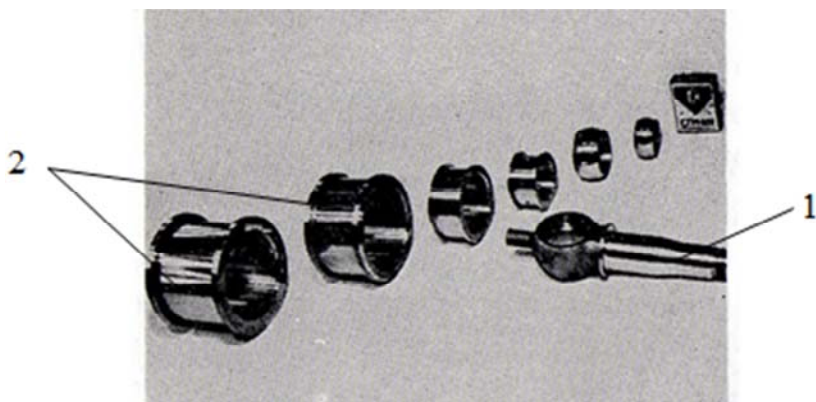


Рис. 12.3. Фотографии изделий после MAO:
1 – вал, имеющий цилиндрическую и коническую поверхности;
2 – внутренние кольца подшипников качения

Для многеместной обработки малогабаритных деталей вращения может применяться схема МАО роторного типа, представленная на рис. 12.4.

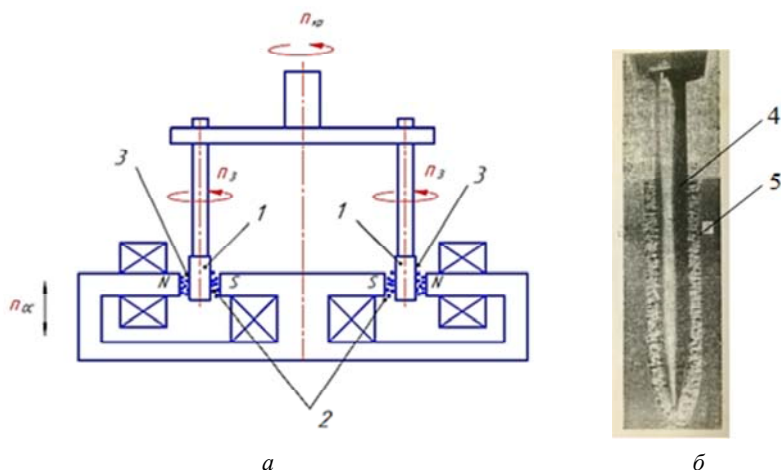


Рис. 12.4. Технологическая схема МАО роторного типа (а) и фотография изделия с магнитно-абразивным порошком (б):
 1 – заготовки; 2 – рабочая зона; 3 – магнитно-абразивный порошок;
 4 – обрабатываемая поверхность; 5 – зерна порошка

Заготовки 1 вводятся в рабочую зону 2 между полюсами электромагнитов, заполненную магнитно-абразивным порошком 3. Заготовкам, помимо вращательного движения вокруг своих осей n_3 , дополнительно сообщается круговое движение $n_{кр}$ вдоль замкнутого рабочего зазора. При этом зерна порошка 5 находятся в непрерывном контакте с обрабатываемой поверхностью 4 изделия (рис. 12.4, б). В этом случае осциллирующее движение $n_{ос}$ может сообщаться электромагнитам.

Для обработки винтовых поверхностей предназначена схема, изображенная на рис. 12.5.

Заготовку 1 помещают внутрь цилиндрической немагнитной камеры 5, укрепленной между полюсами электромагнита 4 постоянного тока, который при включении сообщает ферроабразивной порошковой массе внутри камеры заданную жесткость. Выходные отверстия камеры соединены трубопроводом (на рисунке не пока-

зан). При вращении заготовки *1* полируемая резьба, как шнек, стремится вытеснить магнитно-абразивный порошок из камеры, а полированию преимущественно подвергается одна сторона профиля резьбы. Для увеличения давления внутри камеры на выходах из нее установлены дополнительные электромагнитные катушки *2* и *3*. Включенной должна быть одна из них (например, *3*). При этом увеличивается сопротивление прохождению магнитно-абразивного порошка через выходное отверстие камеры и тем самым создается дополнительное давление в камере. Силы резания увеличиваются и более равномерно обрабатывается резьба по высоте профиля. Для обработки второй стороны профиля изменяют направление вращения заготовки *1*. Одновременно изменяется направление движения порошка. Для создания дополнительного давления в камере необходимо выключить катушку *3* и включить катушку *2*.

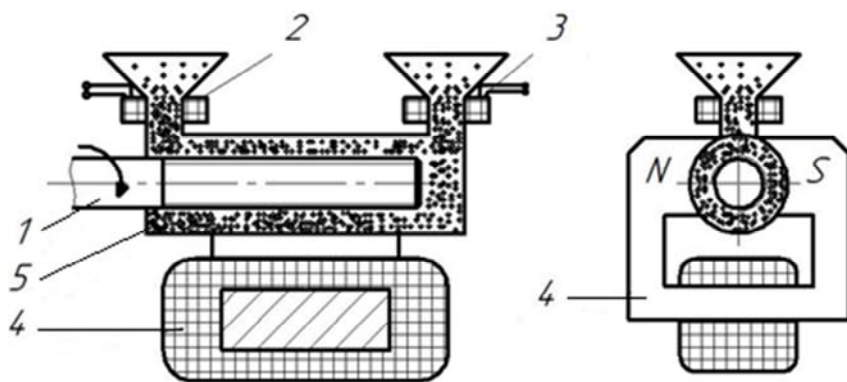


Рис. 12.5. Схема МАО наружных винтовых поверхностей:
1 – заготовка; *2, 3* – электромагнитные катушки; *4* – электромагнит;
5 – цилиндрическая немагнитная камера

Полирование внутренней поверхности немагнитного тонкостенного контейнера *1* может осуществляться по схеме, приведенной на рис. 12.6.

Порция ферроабразивного порошка *2* силами магнитного поля, наведенного электромагнитом *3*, прижата к обрабатываемой поверхности и удерживается от вращения при вращении обрабатываемой детали *1*.

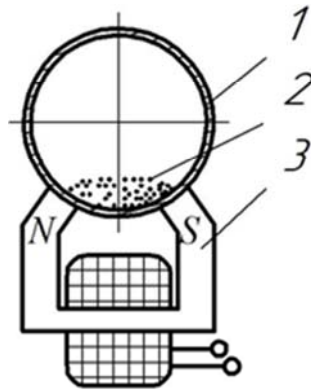


Рис. 12.6. Схема МАО внутренней поверхности немагнитного тонкостенного контейнера:
 1 – немагнитный тонкостенный контейнер;
 2 – ферроабразивный порошок; 3 – электромагнит

На рис. 12.7 показана блок-схема обработки магнитно-абразивной струей внутренней поверхности полой цилиндрической заготовки.

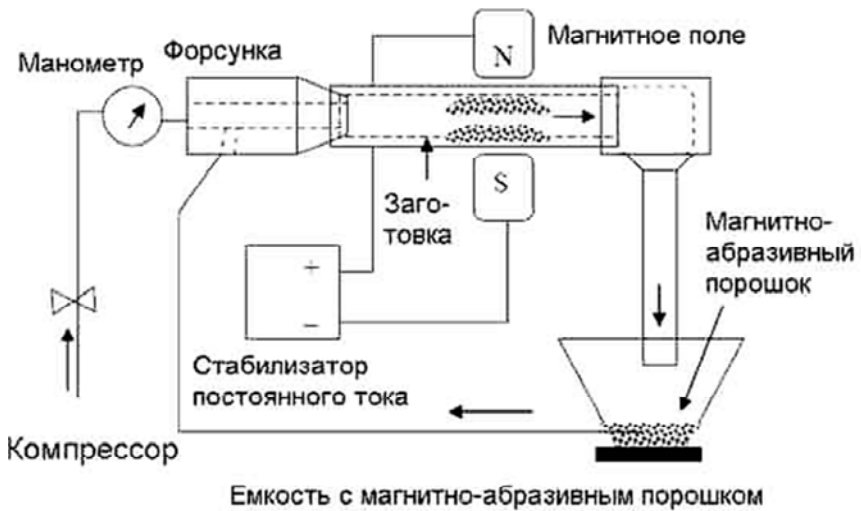


Рис. 12.7. Блок-схема обработки внутренней поверхности полой цилиндрической заготовки магнитно-абразивной струей

Согласно этой схеме, рабочая жидкость, смешанная с магнитно-абразивным порошком, перемещается внутри трубки с расположенными на ее наружной части магнитными полюсами. Во время движения абразивной смеси происходит быстрая и качественная обработка внутренней поверхности заготовки.

На рис. 12.8 представлена схема очистки печатных плат с помощью МАО.

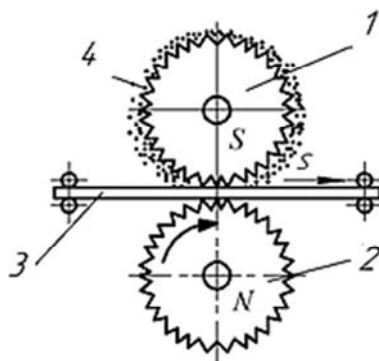


Рис. 12.8. Схема очистки печатных плат:
1, 2 – рифленые валики; 3 – загрязненная печатная плата;
4 – ферромагнитный порошок

В этом случае полюсы электромагнита выполнены в виде рифленых валиков 1 и 2, вращающихся с определенной окружной скоростью навстречу друг другу. В зазоре между ними протягивается загрязненная печатная плата 3, на которую подается ферромагнитный порошок 4. За счет магнитных сил порошок постоянно находится на ведущем валике 1 и удаляет оксидную пленку с печатной платы 3.

МАО широко применяется для удаления заусенцев (рис. 12.9).

Заготовка 1, совершая движение осцилляции n_{oc} в вертикальном направлении, движется поступательно со скоростью $V_{п}$ в межполюсном пространстве электромагнита 2, заполненном ферромагнитным абразивным порошком. Таким способом на заготовках из стали марки 10X18H9T исходные заусенцы (после вырубки) высотой 0,2–0,4 мм удаляются полностью за 12–15 с машинного времени. Ферромагнитный абразивный порошок-крошка закаленного чугуна зернистостью 1000/630 мкм.

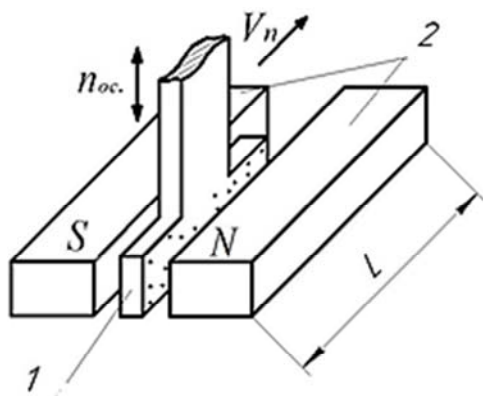


Рис. 12.9. Схема МАО по удалению заусенцев:
1 – заготовка; 2 – электромагнит

На рис. 12.10 Представлена схема МАО по скруглению кромок и удалению заусенцев в рассверленных отверстиях

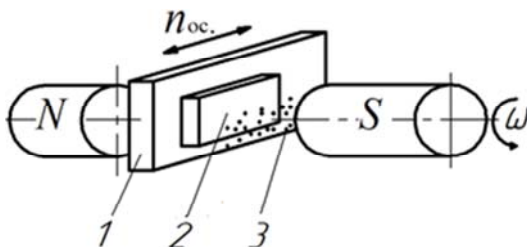


Рис. 12.10. Схема МАО по скруглению кромок и удалению заусенцев:
1 – пластина; 2 – заготовка; 3 – ферромагнитный абразивный порошок

Пластина 1 с заготовкой 2 устанавливается в межполюсное пространство электромагнита. Туда же засыпается ферромагнитный абразивный порошок. Пластина вместе с заготовкой совершает рабочее движение: осцилляцию с частотой $n_{oc} = 12-23 \text{ с}^{-3}$. Один полюс электромагнита вращается с частотой $n = 12-23 \text{ с}^{-3}$. При вращении он увлекает вместе с собой ферромагнитный абразивный порошок 3, осуществляющий удаление заусенцев и скругление кромок.

МАО может быть эффективно использована для одновременной финишной обработки наружных и внутренних поверхностей биоп-

сийных игл из стали 316L (03X17H14M3) со следующими геометрическими размерами: наружный диаметр 1,27 мм, внутренний диаметр 0,84 мм. Для этого (рис. 12.11) заготовка 1 иглы устанавливается над расположенными под углом 90° по отношению друг к другу полюсными наконечниками 2 неодимового магнита и приводится во вращательное движение с частотой 10000 мин⁻¹.

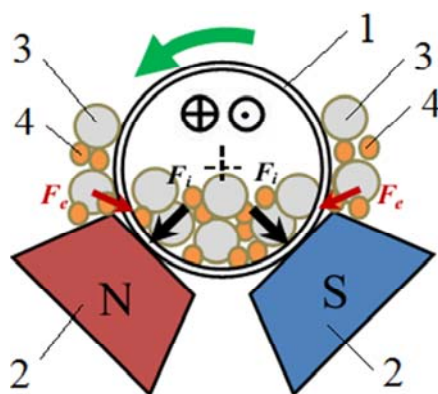


Рис. 12.11. Схема МАО биопсийных игл:
1 – заготовка; 2 – полюсные наконечники; 3 – частицы железа;
4 – ферроабразивный порошок

Полюсным наконечникам сообщается возвратно-поступательное движение в направлении оси заготовки. Абразивный материал представляет собой смесь 80 весовых процентов частиц железа 3 размером 150–300 мкм и 20 весовых процентов ферроабразивного порошка 4 на основе корунда со средним диаметром частиц 80 мкм. Крупные магнитные частицы способствуют повышению сил, действующих на частицы ферроабразивного порошка.

На рис. 12.12 Показан процесс МАО, в котором обработка осуществляется благодаря воздействию магнитного поля в зазоре между поверхностью заготовки и вращающимся полюсом электромагнита. Действие магнитного поля приводит к возникновению нормальной силы, которая способствует проникновению абразивного порошка вглубь обрабатываемой поверхности, в то время как вращение абразивной щетки (северный полюс N) приводит к удалению материала в виде стружки.

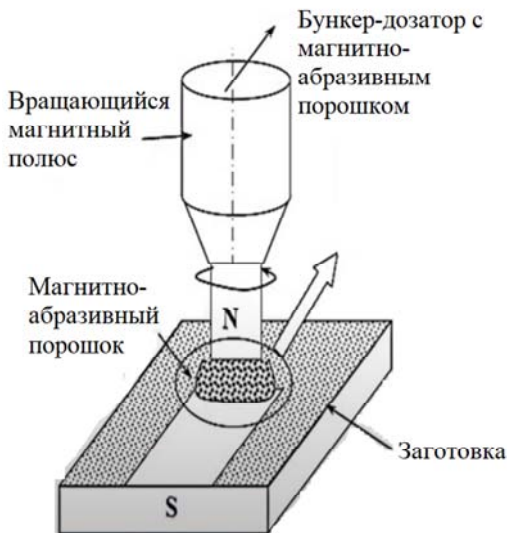


Рис. 12.12. Схема магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей

Для обработки асферических поверхностей оптических деталей с отклонениями формы менее 50 нм и шероховатостью менее 1 нм может применяться технология магнитореологического полирования, основанная на использовании магнитореологических жидкостей. Технология была изобретена в 1980-х годах в Институте тепло- и массообмена Академии наук Беларуси.

Магнитореологические жидкости представляют собой взвесь магнитных частиц (с размерами в микрометровом диапазоне) в жидкости-носителе и характеризуются значительным ростом кажущейся вязкости в магнитном поле, вплоть до превращения жидкости в вязкоупругое твердое тело. Кажущаяся вязкость жидкости может контролироваться путем изменения параметров приложенного магнитного поля.

Существуют также ферромагнитные жидкости, представляющие собой взвесь магнитных частиц в жидкости-носителе, но отличающиеся меньшими размерами частиц, заключенными в нанометровом диапазоне.

Магнитные частицы в ферромагнитной жидкости поддерживаются во взвешенном состоянии благодаря броуновскому движению

и не оседают при нормальных условиях. Частицы магнитореологической жидкости слишком велики для поддержания во взвешенном состоянии за счет броуновского движения и склонны к осаждению. Эффект увеличения вязкости под действием магнитного поля в ферромагнитных жидкостях намного слабее, чем в магнитореологических. Под действием приложенного магнитного поля магнитные частицы магнитореологической жидкости, которые при отсутствии поля равномерно распределены по объему жидкости-носителя (рис. 12.13, *а*), выстраиваются вдоль силовых линий поля, образуя цепочки (рис. 12.13, *б*).

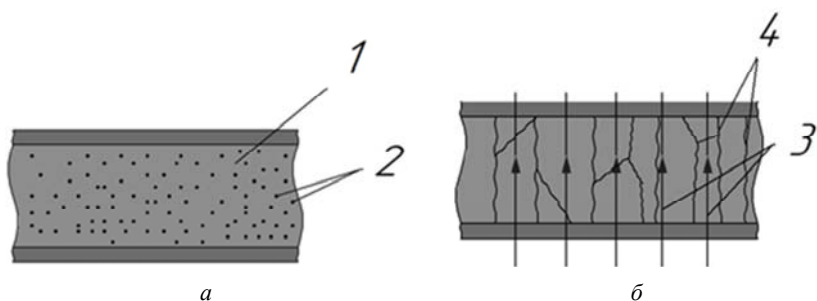


Рис. 12.13. Поведение магнитореологической жидкости в магнитном поле:
 1 – жидкость-носитель; 2 – магнитные частицы;
 3 – силовые линии магнитного поля; 4 – цепочки магнитных частиц

Установка для магнитореологического полирования (рис. 12.14, *а*) состоит из резервуара 1 с магнитореологической жидкостью, насосов 2, сопла 3, вращающегося диска 4, электромагнита 5 и шпинделя 6 с заготовкой линзы 7. Через сопло на вращающийся диск подается небольшое количество магнитореологической жидкости, которая формирует на диске тонкий слой 8 (рис. 12.14, *б*), в который частично погружается заготовка линзы.

Электромагнит, установленный под вращающимся диском, создает локализованное магнитное поле, при попадании в которое магнитореологическая жидкость уплотняется, выполняя функцию полировального инструмента, жесткость которого может регулироваться путем изменения параметров приложенного магнитного поля. Заготовка линзы вращается на шпинделе, а положение оси шпинделя изменяется с помощью системы числового программного

управления таким образом, что толщина слоя магнитореологической жидкости под обрабатываемым участком заготовки и направление нормали к его поверхности остаются постоянными в процессе обработки. Съем материала происходит не по всей поверхности заготовки, а только в кольцевой зоне 9 (рис. 12.14, б), в которой заготовка контактирует со слоем магнитореологической жидкости: такая технология называется субпертурной обработкой. Величина съема материала контролируется путем изменения длительности контакта различных зон заготовки с магнитореологической жидкостью.

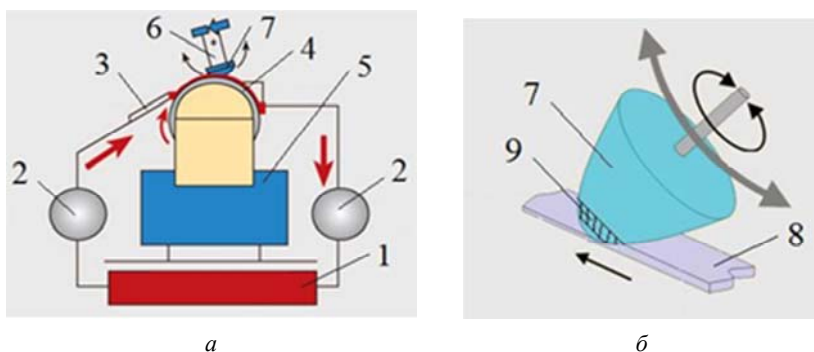


Рис. 12.14. Установка для магнитореологического полирования:
 1 – резервуар; 2 – насос; 3 – сопла; 4 – вращающийся диск; 5 – электромагнит;
 6 – шпиндель; 7 – заготовка линзы; 8 – тонкий слой; 9 – кольцевая зона

Магнитореологическая жидкость содержит 36 объемных процентов частиц железа, 6 объемных процентов абразивных частиц, 3 объемных процента стабилизаторов и воду. Стабилизаторы предотвращают деградацию свойств магнитореологической жидкости в результате окисления железа. Жидкость с добавкой Na_2CO_3 и pH около 10 сохраняет стабильные свойства на протяжении 8 часов. Разработаны магнитореологические жидкости с абразивными частицами оксида церия, при использовании которых можно достичь шероховатости 0,1 нм.

Описанная технология может быть использована как для обработки асферической оптики, так и для коррекции формы оптических поверхностей (устранения отклонений формы). Технология также использовалась для обработки кремниевых пластин для полупроводниковой техники.

Магниты для МАО

В качестве источников магнитного поля в МАО могут использоваться редкоземельные постоянные магниты, к которым относятся неодимовые и самариевые магниты. По сравнению с ферритовыми магнитами редкоземельные магниты на основе самария имеют магнитную энергию в 6 раз выше, а на основе неодима – в 10 раз выше. В качестве материала самариевых магнитов используют интерметаллид (химическое соединение нескольких металлов) SmCo_5 , а в качестве материала неодимовых магнитов – $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Интерметаллиды получают прямым сплавлением компонентов в инертной атмосфере. Полученный материал измельчают с помощью шаровых мельниц до размера частиц 1–3 мкм, а затем формируют порошок методом прессования в магнитном поле и спекают при температуре 1000–1200 °С. Полученные магниты шлифуют и подвергают отжигу для повышения коэрцитивной силы (напряженности поля, необходимой для размагничивания магнита). В связи со слабой коррозионной стойкостью на спеченные неодимовые магниты обычно наносят гальванические покрытия из меди, никеля или цинка. Помимо спеченных используют композиционные неодимовые магниты, в которых магнитный порошок связывается резиной, винилом, нейлоном или другими полимерными материалами в композиционную массу, изделия из которой получают прессованием или литьем под давлением. Такие магниты имеют несколько более низкие магнитные свойства по сравнению со спеченными, однако не требуют нанесения гальванических покрытий. Самариевые магниты являются более дорогостоящими по сравнению с неодимовыми. Они устойчивы при более высоких температурах и к коррозии.

Описание экспериментальных установок

Устройство магнитно-абразивной обработки с использованием постоянных магнитов

На рис. 12.15 представлена принципиальная схема данного устройства.

На массивном деревянном основании 1 закреплена стальная стойка 7. На ней с возможностью вертикально перемещаться и поворачиваться установлен кронштейн 6, изготовленный из алюминиевого (немагнитного) сплава Д16Т. С помощью стопорного винта 8 кронштейн фиксируется на стойке в необходимом положении. На свобод-

ном конце кронштейна с помощью эпоксидной смолы приклеен постоянный магнит 5 диаметром 20 мм и толщиной 3 мм (рис. 12.16).

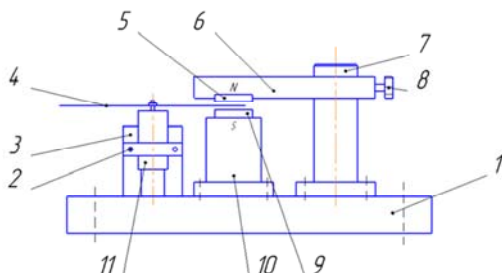


Рис. 12.15. Принципиальная схема устройства магнитно-абразивной обработки с использованием постоянных магнитов:
1 – основание; 2 – хомут; 3 – призма; 4 – образец; 5, 9 – постоянные магниты;
6 – кронштейн; 7 – стальная стойка; 8 – стопорный винт;
10 – фланец; 11 – электродвигатель



Рис. 12.16. Фотография постоянного магнита, применяемого в устройстве

Второй аналогичный магнит 9 с помощью эпоксидной смолы приклеен к торцевой поверхности фланца 10, изготовленного также из сплава Д16Т. Последний прикреплен к деревянному основанию устройства таким образом, чтобы постоянные магниты на нем и на кронштейне располагались соосно друг относительно друга. В зазоре между ними помещается магнитно-абразивный порошок.

К деревянному основанию прикреплена призма 3, в которой с помощью хомута 2 закреплен валом вверх электродвигатель 11 постоянного тока с встроенным редуктором (МН145А). На его валу закрепляется обрабатываемый образец в виде тонкого диска 4, из немагнитного материала. При вращении диска в зазоре между маг-

нитями его боковая поверхность подвергается магнитно-абразивной обработке. На рис. 12.17 представлена фотография общего вида устройства с указанием основных его узлов.

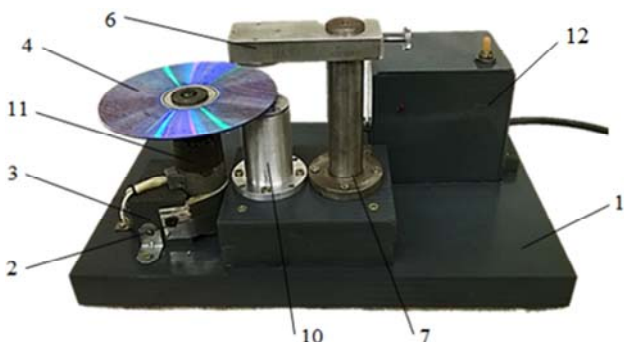


Рис. 12.17. Фотография общего вида устройства магнитно-абразивной обработки с использованием постоянных магнитов:

12 – тумблер

Порядок выполнения работы

1. Положить на светлую бумагу несколько зерен магнитно-абразивного порошка.

2. Пользуясь микроскопом МИМ-5 измерить размеры зерен в двух взаимно перпендикулярных направлениях и по их результатам вычислить средний размер зерна магнитно-абразивного порошка (рис. 12.18).



Рис. 12.18. Фотография зерен магнитно-абразивных порошка под микроскопом

3. Снять со стойки кронштейн.
4. Заклеить магниты клейкой лентой (скотчем).
5. Насыпать магнитно-абразивный порошок на магниты (рис. 12.19).



Рис. 12.19. Фотография магнитов с насыпанным на их поверхность магнитно-абразивным порошком

6. Установить испытуемый диск на валу электродвигателя (рис. 12.20).



Рис. 12.20. Фотография диска, установленного на валу электродвигателя

7. Установить на стойку кронштейн до касания магнитно-абразивного порошка с поверхностью испытуемого диска (рис. 12.21).

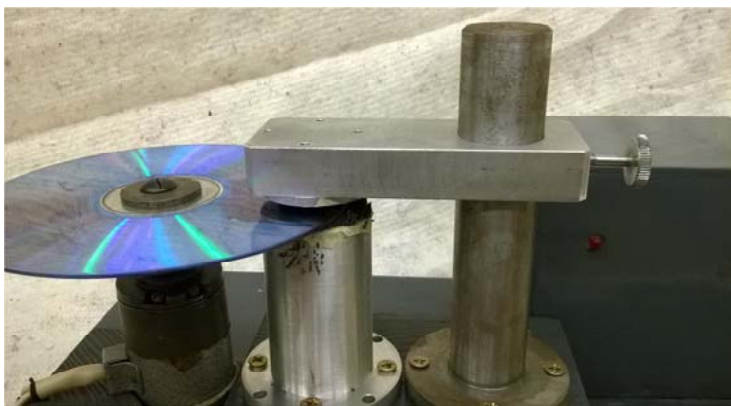


Рис. 12.21. Фотография положения диска относительно постоянных магнитов

8. Включить тумблер *I2* на блоке питания (см. рис. 12.17).

9. В течении 1–2 минут наблюдать за обработкой и образовавшейся щеткой из зерен магнитно-абразивного порошка.

10. Выключить тумблер питания, снять диск и изучить состояние его поверхности (рис. 12.22).



Рис. 12.22. Фотография состояния поверхности диска из картона, после ее магнитно-абразивной обработки

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Результаты по исследованию поверхности диска после магнитно-абразивной обработки.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Дать краткую характеристику методов абразивной обработки материалов.
2. В чем заключается сущность процесса магнитно-абразивной обработки?
3. Какими особенностями характеризуется процесс магнитно-абразивной обработки?
4. Что из себя представляют магнитно-абразивные порошки и как их получают?
5. Какова роль поверхностно-активных веществ (ПАВ) в процессе магнитно-абразивной обработки?
6. По каким признакам классифицируются технологические схемы магнитно-абразивной обработки?
7. Приведите примеры технологических схем магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей вращения.
8. Приведите примеры технологических схем магнитно-абразивной обработки внутренних поверхностей вращения.
9. Приведите пример технологической схемы для одновременной магнитно-абразивной обработки наружной и внутренней поверхностей вращения.
10. Приведите примеры магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей.
11. В чем заключается технология магнитореологического полирования с использованием магнитореологических жидкостей?
12. Из каких материалов изготавливаются постоянные магниты для магнитно-абразивной обработки?

13. Каким образом осуществляется наладка устройства для магнитно-абразивной обработки, примененного в данной лабораторной работе?

Литература

1. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.
2. Акулович, Л. М. Ферроабразивные порошки для магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2015. – 284 с.
3. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1986. – 176 с.

Лабораторная работа № 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА ТИТАНОВОГО ИМПЛАНТАТА С ИМИТАТОРОМ КОСТНОЙ ТКАНИ И ЕЕ СМАЧИВАЕМОСТИ РАЗЛИЧНЫМИ ЖИДКОСТЯМИ

Цель работы

1. Изучить основные сведения об имплантатах, предъявляемых к ним требованиях и применяемых для их изготовления материалах.
2. Изучить основные факторы, влияющие на протекание процесса интеграции имплантата в организм человека.
3. Изучить применяемые методы модифицирования поверхности металлических имплантатов.
4. Изучить конструкцию имитатора костной ткани и конструкцию образцов титановых имплантатов.
5. Изучить конструкцию и принцип работы устройства для определения прочности соединения поверхности образца имплантата с имитатором костной ткани.
6. Провести измерения прочности соединения поверхности образца имплантата, имеющей различную шероховатость, с имитатором костной ткани.
7. Изучить сущность определения смачиваемости поверхности твердого тела жидкостью методом свободно лежащей капли.
8. Провести измерения краевого угла смачивания испытуемыми жидкостями поверхности образцов с различной шероховатостью.

Оборудование и принадлежности к работе

1. Образцы титановых имплантатов.
2. Имитаторы костной ткани.
3. Цемент стоматологический «Уницем».
4. Шарик нагрузочный.
5. Устройство определения прочности соединения поверхности образца титанового имплантата с имитатором костной ткани.
6. Емкости с испытуемыми жидкостями.
7. Пипетки.

8. Металлические образцы с различной шероховатостью поверхности.

9. Фотоаппарат.

Теоретическая часть

Основные сведения об имплантатах, предъявляемых к ним требованиях и применяемых для их изготовления материалах

Имплантат – это изделие из биосовместимого материала, которое вводится в организм хирургическим путем для замены какого-либо органа или его части и выполняет утраченную этим органом функцию. На сегодняшний день существует большое разнообразие конструкций имплантатов: эндопротезы тазобедренного, коленного, голеностопного, локтевого суставов, ортопедические пластины, протезы для челюстно-лицевой хирургии, а также дентальные имплантаты, предназначенные для устранения дефектов зубных рядов.

К имплантатам, с учетом условий их эксплуатации, предъявляются следующие основные требования:

– остеоинтегрирующая способность (способность поверхности металлического имплантата образовывать тесный контакт с костной тканью);

– простота установки имплантата и надежность его закрепления;

– длительность функционирования имплантата.

Поверхность имплантата должна обеспечивать адсорбцию и адгезию органической и минеральной составляющих кости и не угнетать деятельность остеобластов и остеоцитов. В этой связи различают три понятия: биоинертность, биосовместимость и биоактивность.

Биоинертность – это свойство материала имплантата, при котором отсутствуют определяемые аппаратурно или гистологически какие-либо реакции живых тканей на материал имплантата и на сам имплантат в целом, а также какое-либо заметное влияние тканей и жидкостей, приводящее к изменению микроструктур и снижению комплекса физико-механических свойств материала.

Биосовместимость – это способность материала при ограниченном взаимодействии с тканями и жидкостями в организме не оказывать на них токсического влияния, а также сохранять максимально длительное время свои собственные физико-механические и иные свойства, необходимые для исполнения функций.

Биоактивность – это способность материала имплантата в целом (или, по крайней мере его поверхности) вступать в минеральный обмен с окружающими тканями (преимущественно костными), образуя прочную химическую связь «имплантат-ткань», которая должна обеспечить высокую стабильность имплантата.

Степень удовлетворения указанных характеристик, в первую очередь, определяется применяемыми для изготовления имплантатов материалами. В настоящее время, согласно международному стандарту ИСО 5832:1996, в имплантационной технологии используются материалы, которые в той или иной степени соответствуют выше приведенным требованиям и разрешены для изготовления имплантатов.

К ним относятся:

– *биотолерантные*: коррозионо-стойкие стали, хром-кобальтовый сплав;

– *биоинертные*: титан, цирконий, золото, корундовая керамика, стеклоуглерод, никелид титана, сплавы титана Ti_6Al_4V , Ti_6Al_7Nb ;

– *биоактивные*: покрытия металлических имплантатов гидроксиапатитом, трикальцийфосфатной керамикой и т. п.

Основные факторы, влияющие на протекание процесса интеграции имплантата в организме человека

Первостепенное влияние на процесс адсорбции белков сыворотки крови, которые первыми вступают в контакт с поверхностью титанового имплантата, указывает степень ее смачиваемости биологическими жидкостями. Дело в том, что от этого показателя зависят условия гарантированной доставки (транспортирования) биомолекул к поверхности имплантата. Поэтому ее геометрические и физические характеристики должны обеспечивать максимальную смачиваемость поверхностей имплантата, вступающих с ней в контакт биологическими жидкостями.

Современные представления о механизме реакций живых тканей на имплантат предполагают, что граница между ними динамична и насыщена многими элементами. В результате механической обработки, экспозиции на воздухе, стерилизации и воздействия биологического окружения поверхностный слой имплантата всегда отличается от состава материала в его объеме: поверхность имплантата покрывается оксидным слоем.

Первой в контакт с имплантатом вступает сыворотка крови, белки которой адсорбируются на оксидах (рис. 13.1).

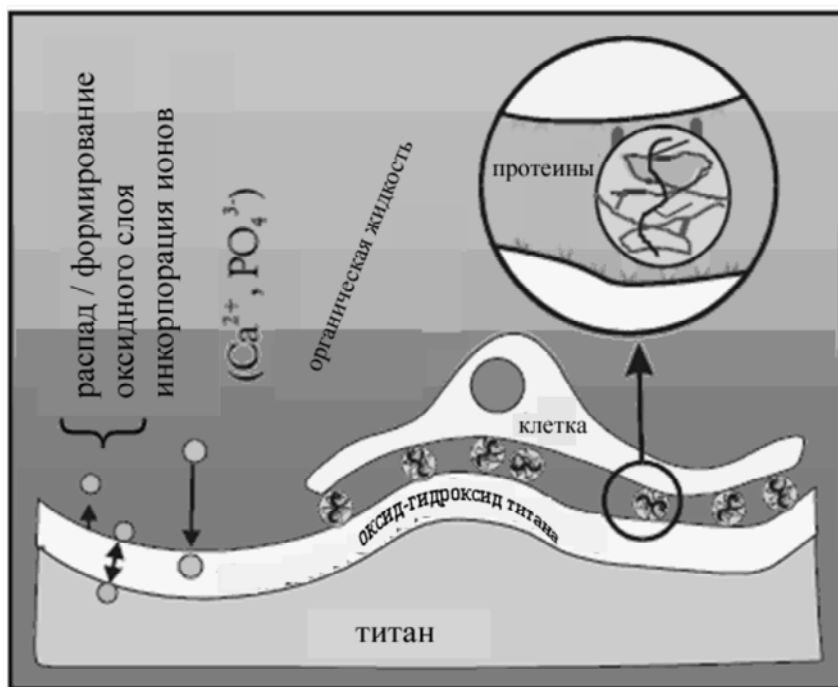


Рис. 13.1. Схема процессов, происходящих на границе раздела «титановый имплантат–организм».

В результате поверхность имплантата покрывается плотным слоем протеинов. Любой материал, такой как клетки, достигает поверхности через более позднее время и не соприкасается с фактической поверхностью имплантата, а уже контактирует со слоем адсорбированных на ней протеинов. Процесс адгезии клеток включает в себя соприкосновение и их распространение на поверхности с последующим более поздним дифференцированием и ростом клеток. Они присоединяются к протеинам, адсорбированным на поверхности имплантата, через определенные трансмембранные молекулы адгезии и к определенным участкам на этих протеинах. Таким образом, процесс взаимодействия ткани организма с поверхностью им-

плантата характеризуется последовательным протеканием следующих основных стадий, которые условно показаны на рис. 13.2:

- поверхность титанового имплантата имеет поверхность раздела с соответствующими свойствами твердого тела и окружающей жидкой фазы;

- слой протеинов адсорбируется и структурируется, в соответствии с физико-химическими свойствами поверхности в равновесном состоянии;

- клетки распознают цепочки протеинов и вступают в реакции с ними;

- ткань структурируется, в соответствии со свойствами протеинов и слоем клеток на поверхности.



Рис. 13.2. Основные стадии взаимодействия ткани организма с поверхностью имплантата в процессе его интеграции

Отсюда следует, что первостепенное влияние на процесс успешной интеграции имплантата в организме человека оказывает стадия, на которой происходит формирование на его поверхности слоя белков (протеинов).

В свою очередь, основными факторами, определяющими эффективное протекание этой стадии, являются высокая смачиваемость поверхности имплантата биологическими жидкостями и ее наибольшая удельная поверхность, которая зависит от параметров ее шероховатости. Развитый рельеф поверхности имплантата способствует тому, что микронеровности на его поверхности служат своего рода замком (сцеплением) между новообразованной костной тканью и поверхностью самого имплантата.

Поэтому основным параметром, определяющим возможное адсорбирование частиц, является фактическая (активная) площадь поверхности подложки, которая, в свою очередь, зависит от ее то-

пографии и, в частности, от ее шероховатости, которая определяет принятой технологией окончательной обработки (модифицирования) поверхности имплантата.

Основные методы модифицирования поверхности металлических имплантатов

На сегодня данная операция может выполняться с использованием самых различных методов поверхностной обработки материалов, включая механические, химические, электрохимические и электрофизические методы, а также путем формирования на ней различных пористых и биоактивных покрытий. Учитывая столь значительный арсенал известных способов модифицирования поверхности имплантатов, ниже отметим только тех из них, которые нашли наибольшее применение при производстве имплантатов.

Химическое оксидирование как способ модифицирования поверхности применяется для создания оксидной пленки на поверхности изделия или заготовки в результате окислительно-восстановительной реакции. Оксидирование титана и его сплавов характеризуется интенсивным взаимодействием металла с воздушной средой и быстрым ростом толщины покрытия за счет высокой химической активности титана.

Кислотное травление – травление высококонцентрированными растворами кислот; осуществляется с целью придания поверхности имплантата развитой, шероховатой топографии. Для этого используются следующие кислоты: HCl, H₂SO₄, HNO₃ и HF. Кислотное травление приводит к образованию на поверхности имплантата микроскопических пор, размер которых находится в пределах от 0,5 до 2 мкм в диаметре.

Микродуговое оксидирование (МДО) позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионностойкие, теплостойкие, электроизоляционные покрытия.

Отличительной особенностью МДО является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микрозарядов, оказывающих весьма существенное и специфическое воздействие на формирующееся покрытие, в результате которого состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличаются, а свойства значительно повышаются, по сравнению с обычными анодными пленками.

Струйно-абразивная обработка. Ее сущность заключается в том, что на обрабатываемую поверхность направляется струя твердых абразивных частиц из разных материалов и разных размеров, которые, обладая определенной кинетической энергией при соударении с ней совершают работу, изменяя состояние поверхности. Струйно-абразивной обработке могут подвергаться как простые поверхности (плоские, цилиндрические), так и фасонные. Формируемая в этом случае шероховатость поверхности не имеет однонаправленных следов обработки, и на ней наблюдается однородная (гомогенная) хлопьевидная структура с размеров выступов порядка 20–40 мкм (рис. 13.3).

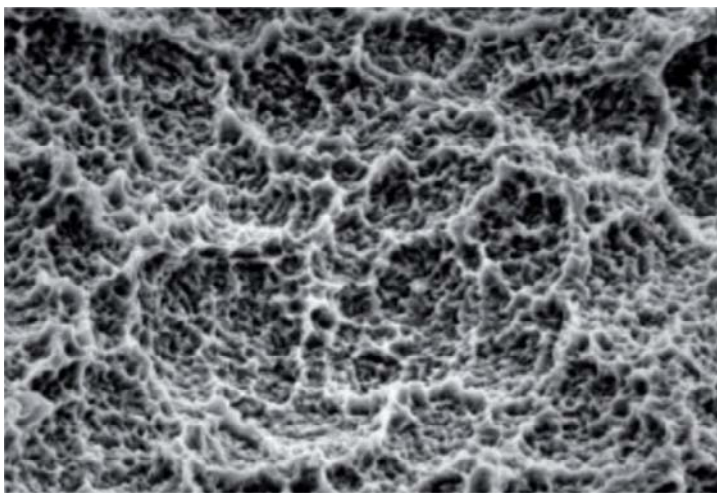


Рис. 13.3. Фотография поверхности имплантата из титанового сплава после пескоструйной обработки (увеличение 1000^х)

Дробеструйная обработка является разновидностью струйно-абразивной и заключается в нагнетании на обрабатываемую поверхность имплантата твердых керамических частиц с большой скоростью в струе сжатого воздуха. В качестве материалов для дробеструйного модифицирования поверхности имплантатов используют оксид алюминия, оксид титана и частицы кальций-фосфатной керамики. Формируемая в этом случае шероховатость определяется, главным образом, дисперсностью используемых частиц (рис. 13.4).

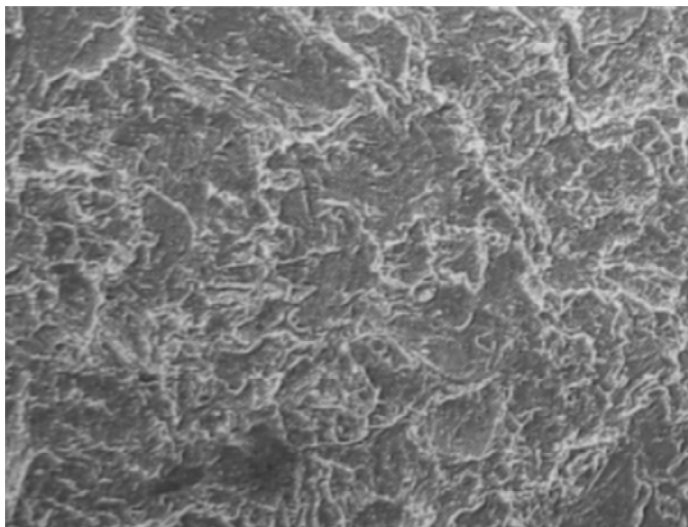


Рис. 13.4. Фотография поверхности имплантата из титанового сплава после дробеструйной обработки (увеличение 1000^х)

Сущность плазменного напыления (рис. 13.5) заключается в том, что в электрическую дугу, горящую между двумя электродами подается поток плазмообразующего газа, в качестве которого может использоваться воздух, аргон, смесь аргона и водорода. Проходя через дугу, газ ионизируется и получается плазма – высокоэнтальпийная система, состоящая из ионов, атомов и молекул, которая стремится уменьшить свою энтальпию, т. е. перейти в равновесие за счет передачи энергии в окружающую среду. Поэтому частицы порошка, подаваемые в плазменную струю, разогреваются до высокой температуры и ускоряются потоком газа до высокой скорости. Оплавленные или расплавленные частицы порошка в результате столкновения с поверхностью имплантата формируют на ней покрытие.

В качестве напыляемых покрытий могут применяться порошковый титан, гидроксиапатит, смесь гидроксиапатита и порошкового титана, а также другие биоактивные материалы. Получаемые в этом случае на поверхности имплантата покрытия (рис. 13.5) имеют пористую структуру, что в значительной степени определяет эффективность прорастания в него костной ткани.

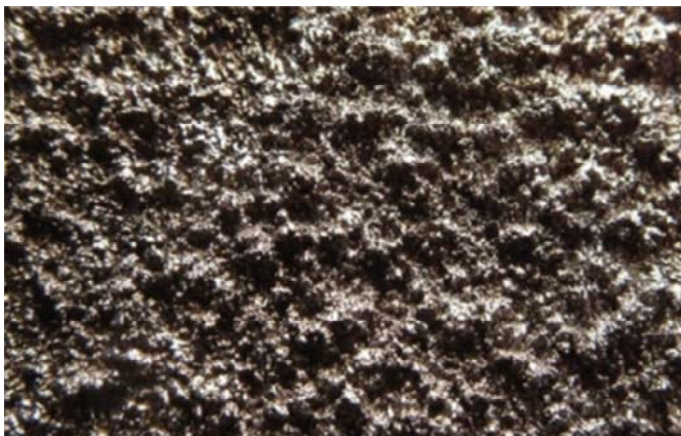


Рис. 13.5. Фотография поверхности дентального имплантата, полученная плазменным напылением титанового порошка (увеличение 500^x)

В последние годы с целью улучшения качества стоматологических имплантатов стал применяться способ лазерной обработки их поверхности. В этом случае луч лазера, воздействуя на поверхность, приводит к нагреву, плавлению и испарению титана (рис. 13.6).

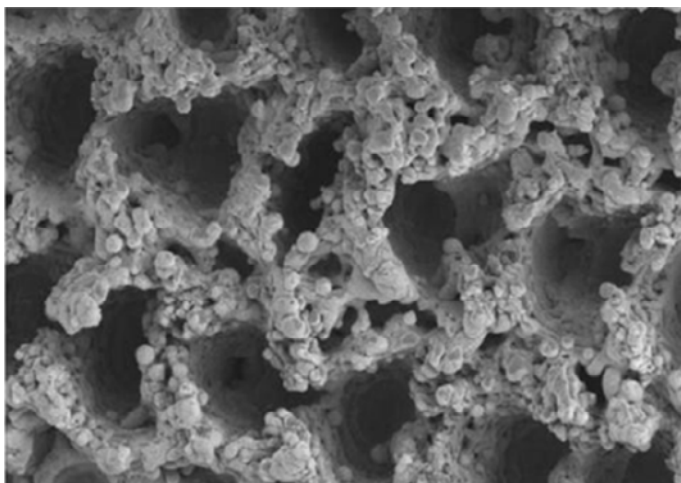


Рис. 13.6. Фотография поверхности имплантата из титанового сплава после лазерной обработки (увеличение 10000^x)

По результатам проведенных исследований показано, что на структуру поверхностного слоя и количество элементов на поверхности (выступы) существенное влияние оказывают длительность и частота следования импульсов. При длительности импульсов 8 мс поверхностный слой обладает большим количеством выступов со средним значением 0,51 и равномерностью распределения пор по поверхности. Среднее значение процентного соотношения количества углублений на модифицированной поверхности образцов составляет диапазон от 51 до 63 %, что приближено к аналогичным характеристикам костной ткани.

Изменяя режимы лазерной обработки и закон перемещения луча по поверхности имплантата, можно получить поверхность с заданным диаметром пор, их расположением и параметрами шероховатости.

Применение электроэрозионной обработки

В процессе ЭЭО на поверхности образуются углубления в виде сферических лунок. При воздействии серии разрядов поверхность приобретает кратерообразную форму с четко выраженными углублениями. При этом за счет управляемого расположения лунок на модифицированной поверхности можно целенаправленно управлять параметрами формируемого микрорельефа. В частности, получать поверхность с частично регулярным микрорельефом (рис. 13.7), который положительно сказывается на ее эксплуатационных показателях.

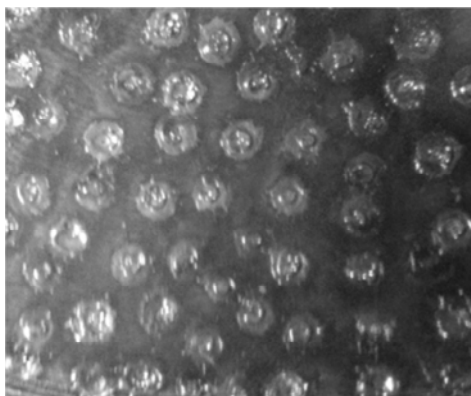


Рис. 13.7. Фотография поверхности с частично регулярным микрорельефом, полученным путем ее электроэрозионной обработки (увеличение 20^х)

Определение смачиваемости поверхности твердого тела жидкостью методом свободно лежащей капли

Смачиваемость твердого тела жидкостью – это способность жидкости растекаться по поверхности твердого тела под влиянием поверхностно-молекулярных сил. Контур капли на поверхности твердого тела, по которому происходит соприкосновение трех фаз – твердой, жидкой и газообразной – называется *периметром смачивания*.

Смачивание зависит от соотношения между силами сцепления молекул жидкости с молекулами (или атомами) смачиваемого тела (*адгезия*) и силами взаимного сцепления молекул жидкости (*когезии*).

Если жидкость контактирует с твердым телом, то существуют 2 возможности:

1. Молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого тела. В результате силы притяжения между молекулами жидкости собирают ее в капельку. Так ведет себя ртуть на стекле, вода на парафине или «жирной» поверхности. В этом случае говорят, что жидкость не смачивает поверхность.

2. Молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого тела. В результате жидкость стремится прижаться к поверхности и расплывается по ней. Так ведет себя вода на чистом стекле или дереве. В этом случае говорят, что жидкость смачивает поверхность.

На рис. 13.8 показана форма капли на поверхности твердого тела при различной смачиваемости.

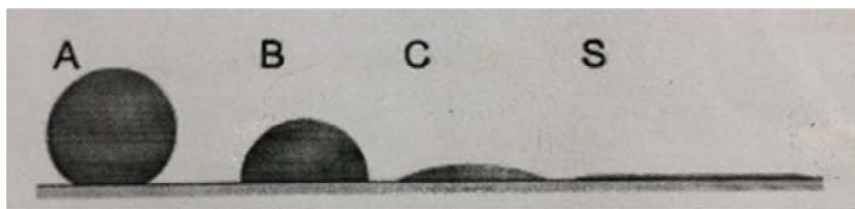


Рис. 13.8. Форма капли жидкости на поверхности твердого тела при различной степени смачиваемости:

- A* – очень слабое смачивание, капля практически шарообразна;
- B, C* – смачивание с большей площадью контакта капли жидкости с твердой поверхностью;
- S* – полное смачивание, жидкость растекается по поверхности

Мерой смачивания твердого тела жидкостью служит краевой угол смачивания θ , образованный поверхностью твердого тела и касательной к поверхности капли в точке ее соприкосновения с телом (рис. 13.9).

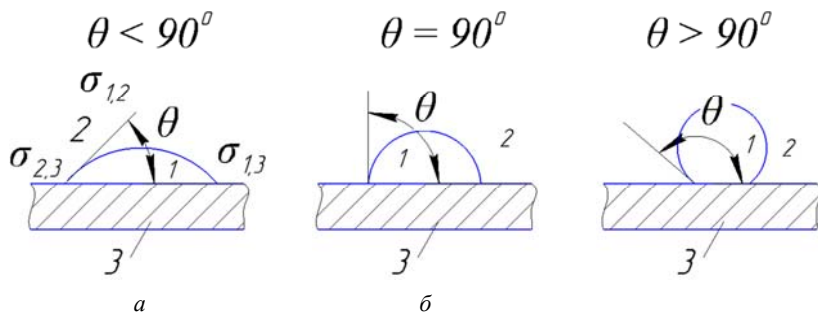


Рис. 13.9. Различные случаи смачивания твердого тела жидкостью:
 а – жидкость смачивает твердое тело; б – промежуточное состояние;
 в – жидкость не смачивает твердое тело;
 1 – жидкость; 2 – воздух; 3 – твердое тело

Если краевой угол $\theta < 90^\circ$, то жидкость смачивает твердую поверхность; если угол $\theta > 90^\circ$, то жидкость не смачивает твердую поверхность; если угол $\theta = 90^\circ$, то жидкость находится в промежуточном состоянии.

Смачиваемая водой поверхность твердого тела, для которой $\theta < 90^\circ$, называется *гидрофильной*. Не смачиваемая водой поверхность твердого тела, для которой $\theta > 90^\circ$, называется *гидрофобной*. Смачивание происходит в результате проявления молекулярных сил, действующих на разделе трех фаз: твердой – 3, газообразной – 2, жидкой – 1.

При равновесии сил, приложенных к единице длины периметра смачивания, будем иметь:

$$\delta_{1-3} + \delta_{1-2} \cos \theta = G_{2-3}; \quad (13.1)$$

$$\cos \theta = \frac{G_{2-3} - G_{1-2}}{G_{1-2}}, \quad (13.2)$$

где G_{1-2} , G_{1-3} и G_{2-3} – поверхностные натяжения на границе фаз 1–2, 1–3, 2–3.

Для определения краевого угла смачивания на исследуемую поверхность наносят каплю соответствующей жидкости, фотографируют ее и по полученной фотографии определяют необходимые для расчета краевого угла смачивания параметры (рис. 13.10). В частности, l, h – диаметр и высота капли, лежащей на полированной (исходной) поверхности, а l_1, h_1 – диаметр и высота капли, лежащей на исследуемой поверхности.

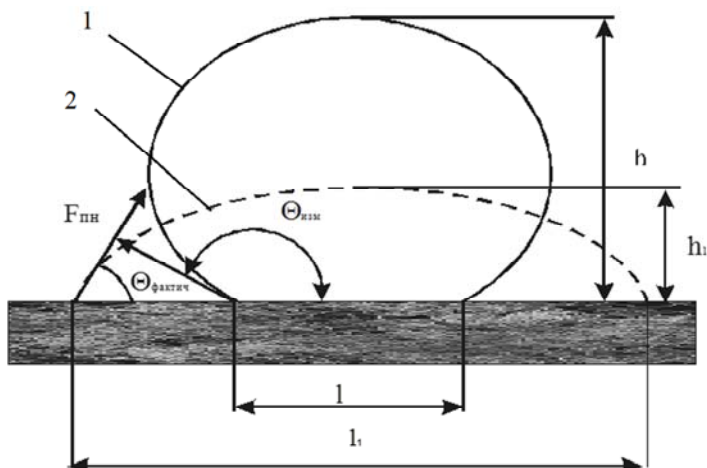


Рис. 13.10. Геометрические параметры свободно лежащей капли:
 l – на полированной поверхности;
 2 – на исследуемой шероховатой поверхности

Кроме того, для расчета данного краевого угла смачивания необходимо располагать данными как профиля капли 1 , лежащей на полированной поверхности, так и профиля капли 2 , лежащей на исследуемой (шероховатой) поверхности.

Краевой угол смачивания (угол θ) образуется векторами сил поверхностного натяжения, направленными по касательной к поверхностям раздела «твердое тело–жидкость» и «жидкость–воздух». При полном смачивании $\theta = 0^\circ$, а при полном несмачивании $\theta = 180^\circ$. Значение угла θ вычисляют по формуле

$$\sin(\theta_{\text{расч}} / 2) = \frac{l_1 h_1 k^2}{(l_1/2)^2 k^4 + h_1^2}; \quad (13.3)$$

$$k = \frac{Ra}{Ra_{исх}},$$

где Ra – параметр шероховатости обработанной поверхности;

$Ra_{исх}$ – параметр шероховатости полированной (исходной) поверхности.

Из формулы (13.3) определяется значение расчетного краевого угла смачивания:

$$\theta_{расч} = 2 \arcsin \left(\frac{l_1 h_1 k^2}{(l_1/2)^2 k^4 + h_1^2} \right). \quad (13.4)$$

Описание конструкции имитатора костной ткани и конструкции образца титанового имплантата

При разработке конструкции имитатора костной ткани, в первую очередь, необходимо было решить задачу по выбору материала, который в наибольшей степени соответствует костной ткани. В частности, по механическим свойствам и структуре поверхности.

В наибольшей степени указанным требованиям соответствует пемза (табл. 13.1), которая, как и костная ткань, имеет пористую структуру, хотя уступает ей по прочности, но при этом характеризуется постоянным с точки зрения рельефа состоянием исходной поверхности.

Таблица 13.1

Основные физико-механические свойства
пемзы и костной ткани

Физико-механические характеристики	Пемза	Костная ткань
Плотность, кг/м ³	300–900	1800–2000
Предел прочности при сжатии, МПа	2,5–40	120–140
Пористость, %	до 85	до 80
Размеры пор, мм	0,01–3	0,1–0,2

Таким образом, использование пемзы в качестве имитатора костной ткани позволяет обеспечить постоянные и близкие к реальным условиям ее взаимодействия с поверхностью имплантата.

Конструкция имитатора костной ткани и его фотография представлены на рис. 13.11.

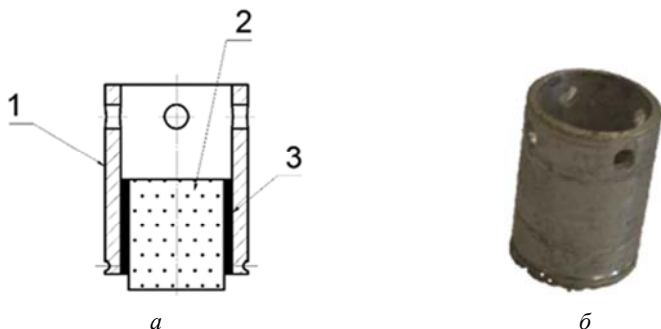


Рис. 13.11. Конструкция имитатора костной ткани (а) и его фотография (б):

1 – стальная цилиндрическая трубка; 2 – цилиндр из пемзы;
3 – эпоксидная смола

Он состоит из стальной цилиндрической трубки (оправки) 1, внутри которой с гарантированным зазором установлен цилиндр 2 из пемзы диаметром 7 мм. С помощью эпоксидной смолы 3 он приклеивается к внутренней поверхности оправки с таким расчетом, чтобы торец пемзы выступал из трубки на 2–2,5 мм. Этот припуск необходим для окончательной обработки торцевой поверхности пемзы, в результате которой этот размер уменьшается до 1–1,5 мм. На наружной поверхности оправки, на расстоянии 1,5 мм от ее торца, выполнена проточка, которая предназначена для закрепления нити, связывающей образец с устройством нагружения при проведении испытаний на сдвиг. На противоположном конце оправки выполнены четыре равно расположенных отверстия, выполняющих ту же функцию, но при проведении испытаний на отрыв.

На рис. 13.12 приведены конструкции образца титанового имплантата и его фотография.

Он выполнен в виде плоской шайбы шириной $B = 5$ мм, имеющей две наружных цилиндрических поверхности разного диаметра и центральное отверстие. Торцевая поверхность Б и прилегающий

к ней буртик служат для закрепления образца в приспособлении при обработке его рабочей поверхности А, которая представляет собой кольцеобразную дорожку шириной 7,5 мм, поверхность которой моделирует поверхность имплантата.

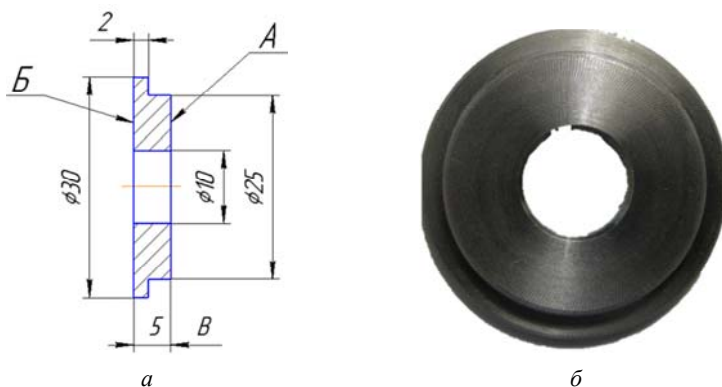


Рис. 13.12. Конструкция образца титанового имплантата (а) и его фотография (б)

Описание экспериментальных установок

Устройство измерения прочности соединения поверхности образца титанового имплантата с имитатором костной ткани

На рис. 13.13 представлены принципиальная схема и фотография устройства измерения прочности соединения поверхности образца титанового имплантата с имитатором костной ткани, созданного на кафедре «Конструирование и производство приборов» БНТУ.

На массивном основании 1 закреплены две вертикальные стойки 2, связанные между собой верхней поперечной планкой 3, что обеспечивает высокую жесткость конструкции. Механизм нагружения собран на опорной плите 4, которая прикреплена к вертикальным стойкам в верхней части конструкции. Он состоит из реверсивного электродвигателя 5 (РД-09), на валу которого закреплен винт 6, соединенный с гайкой 7, жестко связанной с направляющей 8. При работе электродвигателя последняя с очень малой скоростью (2,19 мм/мин) перемещается вдоль вертикальной оси, что обеспечивает статический режим нагружения.

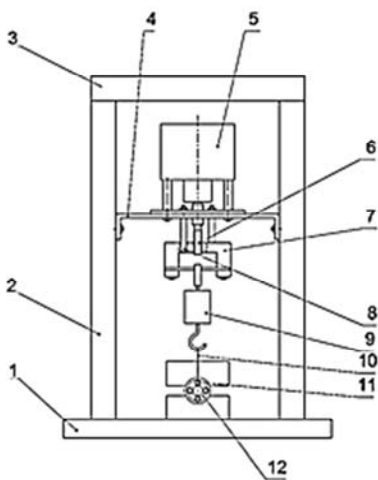


Рис. 13.13. Принципиальная схема (а) и фотография (б) устройства измерения прочности соединения поверхности образца титанового имплантата с имитатором костной ткани:

- 1 – основание; 2 – вертикальная стойка; 3 – верхняя поперечная планка;
 4 – опорная плита; 5 – реверсивный электродвигатель; 6 – винт;
 7 – гайка; 8 – направляющая; 9 – динамометр; 10 – нить;
 11 – металлическая оправка; 12 – металлический имплантат

Для измерения усилия разрушения исследуемого соединения используется электронный динамометр растяжения 9 (Wei Heng WH-A05) с ценой деления 0,1 Н. Одним зацепом он соединен с подвижной направляющей механизма нагружения, а вторым, с помощью нити 10 связан с металлической оправкой 11 имитатора костной ткани. При этом, в зависимости от условий испытания исследуемого соединения (на сдвиг или на отрыв), образец металлического имплантата 12 соответствующим образом ориентируется и неподвижно закрепляется на основании установки.

В процессе перемещения подвижной направляющей вверх (рабочий ход) происходит плавное нагружение испытываемого соединения вплоть до его разрушения, а соответствующее этому моменту значение нагрузки фиксируется по показаниям динамометра. После этого изменяется направление вращения вала электродвигателя на противоположное и направляющая механизма нагружения переме-

щается вниз (холостой ход) до своего начального положения. Затем образец металлического имплантата переустанавливается на основании установки таким образом, чтобы провести испытания следующего из четырех сформированных на его поверхности соединений. За окончательное значение прочности исследуемого соединения (на сдвиг или отрыв) принимается среднее арифметическое четырех значений разрушающей нагрузки, полученных при испытаниях одного образца металлического имплантата, т. е. при неизменных параметрах шероховатости его поверхности.

Методика получения соединения поверхности образца титанового имплантата с имитатором костной ткани с использованием фиксирующего материала

В качестве фиксирующего материала используется стоматологический цемент «Уницем». Процедура формирования испытуемого соединения заключается в следующем.

На горизонтально расположенную поверхность пемзы равномерным слоем наносится фиксирующий материал. Затем она в соответствующем месте устанавливается на предварительно обезжиренную и горизонтально расположенную поверхность образца имплантата. После фиксирования на ней всех четырех образцов пемзы, последние с помощью стальных шариков диаметром 12 мм, установленных в цилиндрические отверстия оправок имитаторов костной ткани, с постоянным усилием (0,56 Н) прижимаются к поверхности образца имплантата (рис. 13.14).



Рис. 13.14. Схема расположения соединений, получаемой на металлической поверхности образца имплантата (а) и фотография общего вида собранной конструкции (б):

1 – образец металлического имплантата; 2 – образцы имитатора костной ткани; 3 – стальные шарики, установленные в отверстия оправок

При этом излишки материала, вытесненные из зоны соединения, аккуратно удаляются вручную с помощью деревянной зубочистки. По истечении времени, необходимого для затвердевания цемента «Уницем» (15–20 минут) прижимные грузы (шарики) снимаются, а полужесткие соединения подвергаются испытаниям на сдвиг и на отрыв.

Порядок выполнения работы

Определения прочности соединения поверхности образца титанового имплантата с имитатором костной ткани

1. Получить у преподавателя образцы титановых имплантатов с различной шероховатостью поверхности, имитаторы костной ткани, стоматологический цемент «Уницем», моток х/б ниток.

2. Используя стоматологический цемент «Уницем», получить соединение поверхности образцов титановых имплантатов с имитатором костной ткани.

3. С использованием устройства (см. рис. 13.13), провести измерения прочности соединения поверхности образцов титановых имплантатов, имеющих различную шероховатость, с имитатором костной ткани на сдвиг и на отрыв для чего необходимо:

– закрепить образец титанового имплантата в оправке 1 с помощью винтов 2 (рис. 13.15 – имитаторы костной ткани не показаны);

– соединить имитаторы костной ткани с зацепом динамометра посредством нити;

– включить динамометр клавишей ON/OFF (рис. 13.16);

– подсоединить устройство в сеть 220В, перевести левый и правый тумблер в верхнее положение (рис. 13.17);

– дождаться пока соединение не разрушится (произойдет отрыв имитатора костной ткани от поверхности образца титанового имплантата);

– перевести левый тумблер в нижнее положение и дождаться, пока динамометр не опустится в исходное положение;

– перевести правый тумблер в нижнее положение, отсоединить имитатор костной ткани от крюка динамометра;

– повторить испытания на отрыв для других образцов.

4. По результатам проведенных измерений сделать вывод о влиянии шероховатости поверхности титанового образца на прочность ее соединения с имитатором костной ткани.

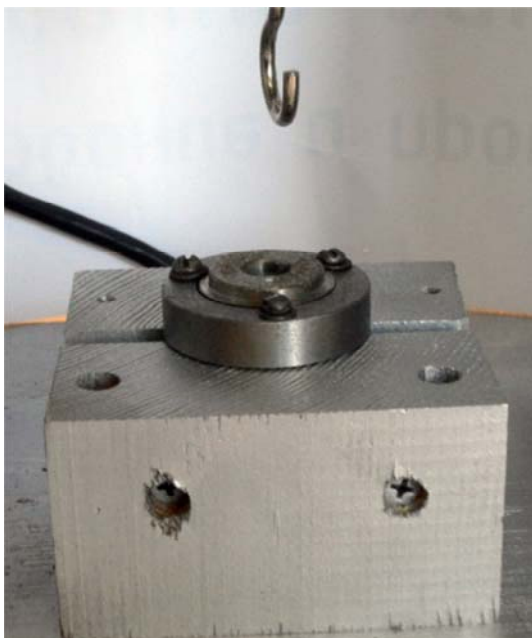


Рис. 13.15. Фотография положения образца титанового имплантата на устройстве измерения прочности



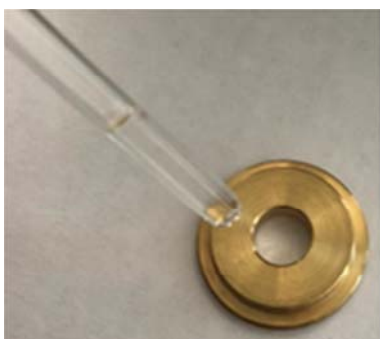
Рис. 13.16. Фотография динамометра



Рис. 13.17. Фотография пульта управления на устройстве измерения прочности

Определение влияния вида жидкости и шероховатости рабочей поверхности образца на значение краевого угла смачивания

1. Расположить образцы на стенде в ряд вдоль измерительной линейки.
2. Набрать жидкость в пипетку.
3. Нанести с помощью пипетки на поверхность образцов имплантатов дозированную каплю жидкости (рис. 13.18).



a



б

Рис. 13.18. Фотография нанесения капли жидкости на поверхность образца имплантата дозированной капли жидкости (*a*) и капля жидкости на поверхности образца имплантата (*б*)

4. Сфотографировать образцы таким образом, чтобы в кадр попала измерительная линейка, которая на снимке будет использоваться как масштабная шкала (рис. 13.19).

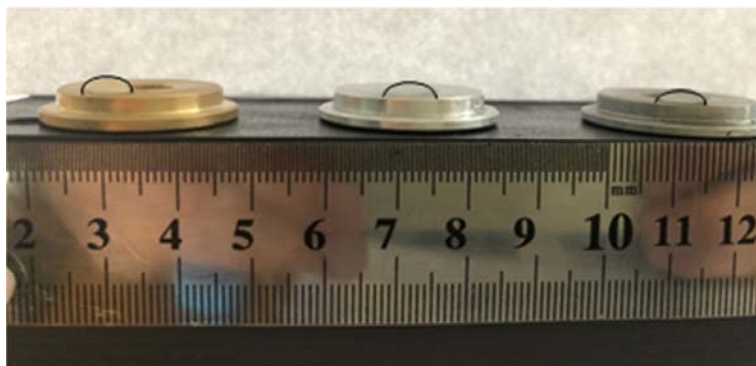


Рис. 13.19. Фотография стенда с образцами имплантатов с нанесенными на них дозированными каплями жидкости

5. Произвести измерения геометрических параметров капли жидкости на поверхности образцов имплантатов с помощью программного средства «Компас 16.1» (рис. 13.20).

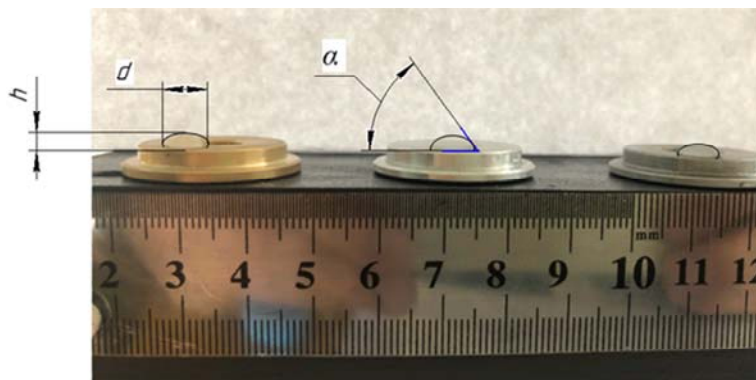


Рис. 13.20. Фотография измерения геометрических параметров капель, нанесенных на образцы имплантатов

6. Результаты измерений занести в табл. 13.2.

Результаты измерения краевого угла смачивания

Испытуемые жидкости	Значение краевого угла смачивания θ при взаимодействии жидкости с рабочей поверхностью образца, обработанного разными способами		
	полированная поверхность	поверхность после точения	поверхность после электроэрозионного модифицирования
Дистиллированная вода			
Оливковое масло			
Глицерин			

7. На основе анализа полученных экспериментальных данных сделать соответствующий вывод о влиянии вида жидкости и шероховатости рабочей поверхности образца на значение краевого угла смачивания.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Схема устройства для измерения прочности соединения поверхности образца титанового имплантата с имитатором костной ткани.
 - 4.2. Экспериментальные данные, отражающие влияние шероховатости поверхности образца титанового имплантата на прочность ее соединения с имитатором костной ткани.
 - 4.3. Экспериментальные данные, отражающие влияния вида жидкости и шероховатости рабочей поверхности образца на значение краевого угла смачивания.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что означают понятия «биоинертность», «биосовместимость» и «биоактивность»?
2. Назовите основные стадии взаимодействия тканей организма с поверхностью имплантата в процессе его интеграции.
3. Назовите основные методы модифицирования поверхности титановых имплантатов.
4. Почему в качестве материала имитатора костной ткани выбрана пемза?
5. Каким образом проводятся измерения прочности соединения поверхности титанового образца с имитатором костной ткани при его испытаниях на сдвиг и на отрыв?
6. Каким образом влияет шероховатость поверхности образца титанового имплантата на прочность ее соединения с имитатором костной ткани?
7. В чем заключается определение смачиваемости поверхности твердого тела жидкостью методом свободно лежащей капли?

Литература

1. Киселев, М. Г. Особенности формирования следов обработки на поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, П. С. Богдан, С. Г. Монич // Наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 23–27.
2. Савич, В. В. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В. В. Савич, Д. И. Сарока, М. Г. Киселев, М. Г. Макаренко; под научн. ред. В. В. Савича. – Минск : «Беларус. навука». – 2012. – 244 с.
3. ГОСТ Р 52641-2006. Имплантаты для хирургии. Стандартный метод испытаний для проверки на сдвиг фосфатно-кальциевых и металлических покрытий. – М. : «СтандартИнформ». – 2007. – 15 с.

Лабораторная работа № 14

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС, СВАРКА ПЛАСТМАСС ТРЕНИЕМ И НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

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 нагретым инструментом, а также применяемые технологические схемы их выполнения.
4. Произвести соединение образцов из термопластичной пластмассы сваркой трением и термоимпульсной сваркой.
5. Оценить характер полученных соединений в отношении их прочности и состояния поверхности образцов в местах сварки.

Инструменты и принадлежности для работы

1. Лабораторная установка для сварки пластмасс трением.
2. Лабораторная установка для термоимпульсной сварки пластмасс.
3. Образцы из термопластичной пластмассы и полиэтиленовой пленки.
4. Ножницы.

Теоретическая часть

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. 14.1 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.

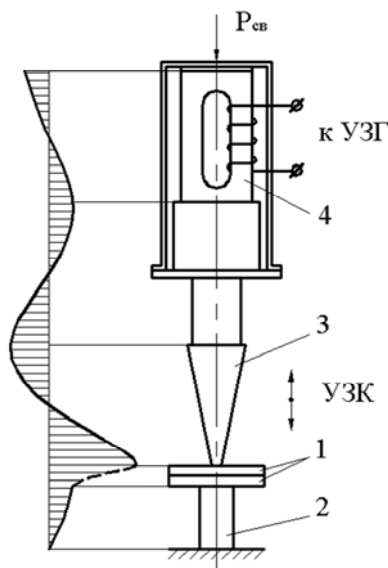


Рис. 14.1. Схема ультразвуковой сварки пластмасс:

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*

(рис. 14.1) отражается наличием в этом месте характерного скачка. В результате происходит нагрев зон соединяемых деталей до температуры вязко-текучего 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.

Весь процесс образования соединения пластмасс при ультразвуковой сварке условно можно разделить на две стадии. На первой 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 второй стадии между нагретыми до температуры вязко-текучего 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.

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.

Влияние режимов ультразвуковой сварки пластмасс на прочность соединения

Традиционно в сварочном производстве параметры режима сварки разделяются на основные и дополнительные. При ультра-

звуковой 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 случаях, когда дозирование вводимой механической энергии осуществляется по специальным схемам, к примеру, 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. Это 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 его оптимальное значение, уменьшение прочности соединения обусловлено нарушением резонансного режима работы акустической колебательной системы, а 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 утончение 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. 14.2, *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. Сле-

дует подчеркнуть, что охлаждение под давлением существенно повышает прочность сварных соединений. Время $t_{п}$ определяется при прочих равных условиях толщиной свариваемых материалов и составляет порядка 0,1–0,2 с.

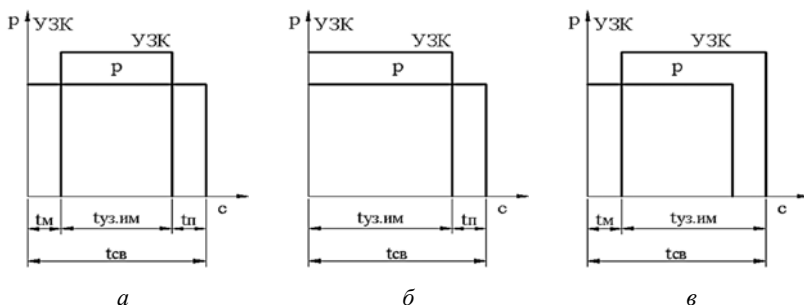


Рис. 14.2. Циклы ультразвуковой сварки

В случае использования рабочего цикла ультразвуковое воздействие – сварочное давление (рис. 14.2, 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 рис. 14.2, в приведен 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 ведет к ухудшению сварного соединения, в частности, к значительному вспучиванию привариваемой поверхности.

Технология ультразвуковой сварки пластмасс

В настоящее время существует большое количество 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*.

При контактной сварке вводимая концентратором механическая энергия равномерно распределена по всей площади контакта свариваемых деталей, как показано на рис. 14.3, а. Это достигается тем, что рабочий торец концентратора, 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 концентратор–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*.

При реализации *передаточной сварки* механические колебания вводятся в отдельной точке или на небольшом участке поверхности верхней детали (рис. 14.4). 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 в тавр.

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*.

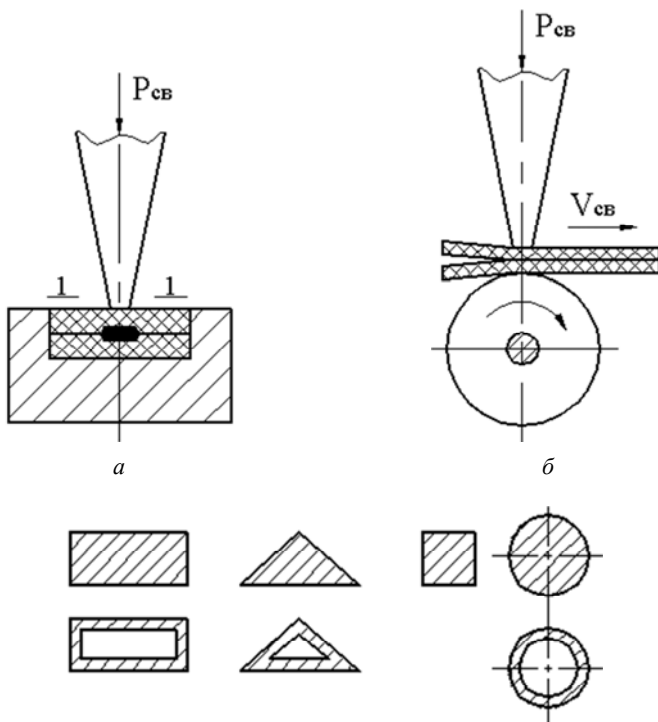


Рис. 14.3. Схемы контактной ультразвуковой сварки:
a – прессовая; *б* – шовная

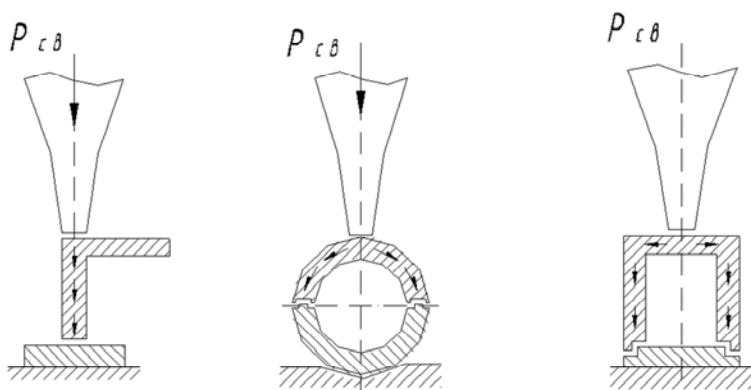


Рис. 14.4. Схемы передаточной ультразвуковой сварки

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

Прессовая сварка выполняется за одно рабочее движение концентратора. 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, к примеру, в виде круга, квадрата, прямоугольника, треугольника, эллипса и т. д. (рис. 14.3, 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 концентраторов максимальный диаметр контура шва составляет порядка 120 мм; для точечного концентратора оптимальный диаметр точки составляет 10 мм.

Контактная прессовая ультразвуковая сварка пластмасс может выполняться с фиксированными временем сварки, зазором и 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 концентратора 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 приво-

доть к прижогам. Ручную сварку можно применять для соединения в труднодоступных местах (рис. 14.5), а также для прихвата деталей перед механизированной сваркой.

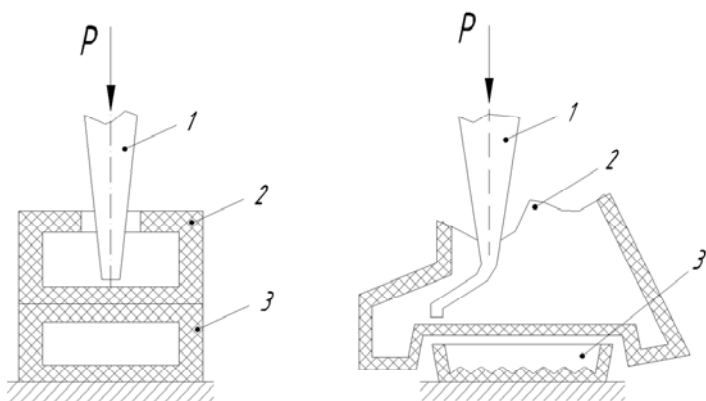


Рис. 14.5. Схемы ультразвуковой сварки в труднодоступных местах:
 1 – концентратор; 2 – деталь, затрудняющая доступ к месту сварки;
 3 – нижняя деталь

В процессе *механизированной непрерывной сварки* перемещается, как правило, свариваемое изделие, а сварочный концентратор остается неподвижным.

В зависимости от способа перемещения свариваемого материала механизированная сварка делится на *шовно-шаговую* и *шовную*.

Шовно-шаговая 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.

Шовная сварка может осуществляться по схеме «на протяг» (рис. 14.6, а), когда изделие протягивается между неподвижной опорой и колеблющимся торцом концентратора или между двумя загнутыми концентраторами (рис. 14.6, б). Во всех этих случаях для ограничения вводимой акустической энергии можно применять схему с «фиксированным зазором».

Сварка «на протяг» между двумя загнутыми концентраторами 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 концентраторами 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.

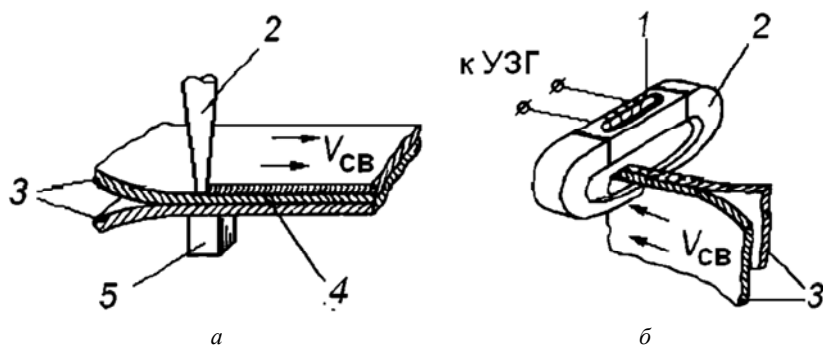


Рис. 14.6. Схемы шовной сварки «на протяг» с подводом ультразвуковых колебаний:

а — односторонним; *б* — двусторонним;

1 — магнитострикционный 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 облегчает сварку, но и способствует повышению прочности шва, увеличивает производительность сварки и позволяет 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. 14.7). 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.

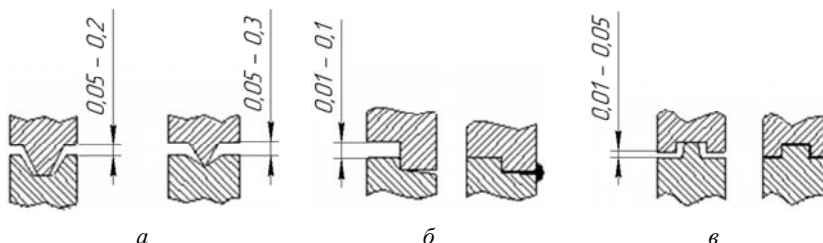


Рис. 14.7. Типы разделки кромок свариваемых поверхностей изделия

Наиболее приемлемой является V-образная разделка свариваемых кромок, которая используется для соединения деталей, показанных на рис. 14.7, *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 0,05–0,03 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 (рис. 14.7, *б*). Если по техническим условиям грат недопустим, то используют специальные конструкции шва, предотвращающие выплески пластмассы (рис. 14.7, *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 (световозврататели, 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 нашла применение 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. К примеру, 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.).

Применение ультразвука для сварки биологических тканей и наплавки

Низкочастотный ультразвук применяется для сварки (остеосинтеза) отломков костей, поврежденных в результате травмы или намеренно рассеченных в ходе операций. Соединение отломков осуществляется с помощью стыковых швов или костных трансплантатов в виде накладок (рис. 14.8).

Стыковые швы формируются путем укладки присадочного материала на место стыка отломков после предварительной подготовки кромок. В качестве присадочного материала используется жидкий мономер этил- α -цианакрилат (циакрин), безвредный для организма. Для повышения прочности соединения циакрин смешивается с костной стружкой. Под действием ультразвука циакрин проникает в поры костной ткани и полимеризуется с образованием твердого полиэтилцианакрилата, который надежно соединяет отломки костей между собой. При ультразвуковой сварке глубина проникновения циакрина в костную ткань достигает 150–200 мкм, в то время как при склеивании костей циакрином глубина проникновения исчисляется единицами микрометров. Увеличение глубины проникновения приводит к повышению прочности соединения. При этом время, необходимое для полимеризации циакрина, сокращается под действием

ультразвука в десятки раз, что объясняется разрывом макромолекул в результате кавитации. В местах разрыва молекул образуются свободные радикалы, наличие которых ускоряет процесс полимеризации. В отличие от традиционных методов остеосинтеза при ультразвуковой сварке не требуется применения металлических конструкций, которые необходимо извлекать из организма после срастания отломков костей.

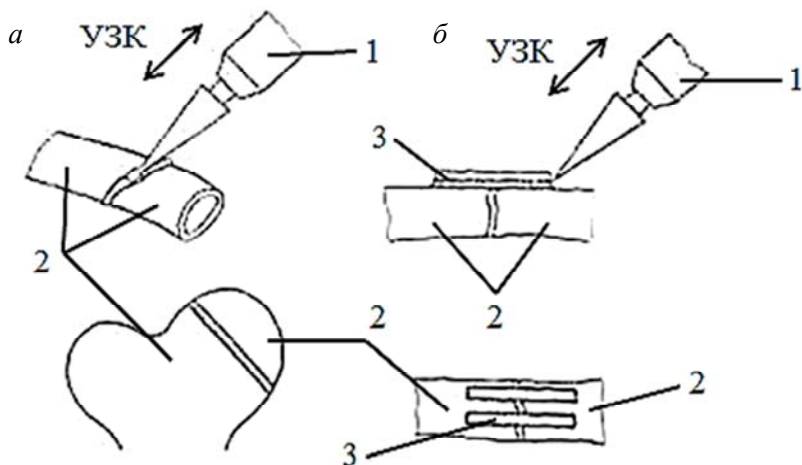


Рис. 14.8. Схемы остеосинтеза с помощью ультразвука:
а — путем стыковых швов; *б* — с применением трансплантатов в виде накладок;
 1 — концентратор ультразвукового преобразователя; 2 — отломки костей;
 3 — костные трансплантаты в виде накладок

При операциях по резекции (частичного иссечения больного органа) костей с целью удаления опухолей и других поражений костной системы часто возникает необходимость замещения дефектов костной ткани. Традиционные методы замещения дефектов используют костные трансплантаты и требуют применения металлического крепежа для их соединения с костями реципиента.

Известен метод замещения дефектов костной ткани наплавленным костным конгломератом, основанный на применении смеси циакрина и костной стружки, полимеризующейся под действием ультразвука. Схема процесса наплавки костного конгломерата с применением ультразвука приведена на рис. 14.9.

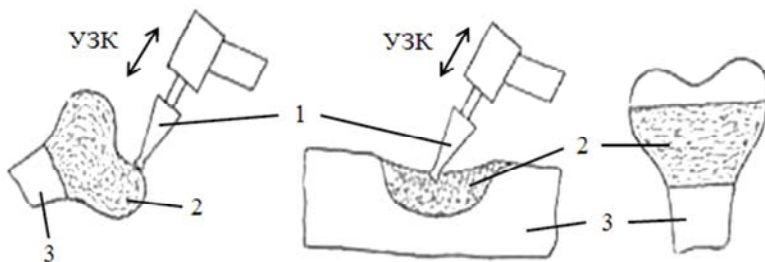


Рис. 14.9. Схема процесса наплавки костного конгломерата с применением ультразвука:

1 – концентратор ультразвукового преобразователя;
2 – костный конгломерат; 3 – кость

Для ускорения замещения конгломерата костной тканью в состав смеси вводят порообразователи (например, углекислый аммоний NH_4CO_2). Для повышения прочности конгломерат может армироваться костными пластинами.

Костная стружка помимо придания конгломерату дополнительной прочности участвует в процессе регенерации костной ткани, возникающей по мере выведения полицианакрилата из организма. При гидролизе присадочного материала между костной стружкой проникает остеобластическая грануляционная ткань, которая соединяет стружку при помощи костных мозолей. Стружка также участвует в процессе минерального обмена с новообразованной костной тканью. Недостатком данной технологии наплавки является то, что циакрин проникает в костную стружку и подавляет ее биологическую активность. Для решения этой проблемы используются способы микрокапсулирования стружки, изолирующие ее от проникновения циакрина и позволяющие сохранить ее биологическую активность. С этой целью применяются композиции конгломерата, содержащие быстрорастворимое вещество, в частности, глюкозу, позволяющее ускорить вовлечение конгломерата в процесс регенерации костной ткани.

Сварка пластмасс 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 рас-

плавы имеют среднюю вязкость в довольно широком интервале температур. К примеру, полиэтилен низкой плотности, полистирол, полиамиды, капрон, 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 удаляется окисная пленка и инородные включения. Сварное соединение получается прочным с высокими механическими свойствами.

Основным достоинством сварки трением является 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. 14.10); 2 – вибрацией свариваемых деталей или промежуточного элемента – сварка вибротрением; 3 – вращательно-вибрационным движением свариваемых деталей или промежуточного элемента. При сварке вращением одна деталь закреплена, а вторая вращается (рис. 14.10, а). На сопряженных торцевых поверхностях возникают силы трения, вызывающие их интенсивный нагрев. Может применяться схема сварки трением, когда вращение сообщается одновременно двум деталям в противоположном направлении (рис. 14.10, б).

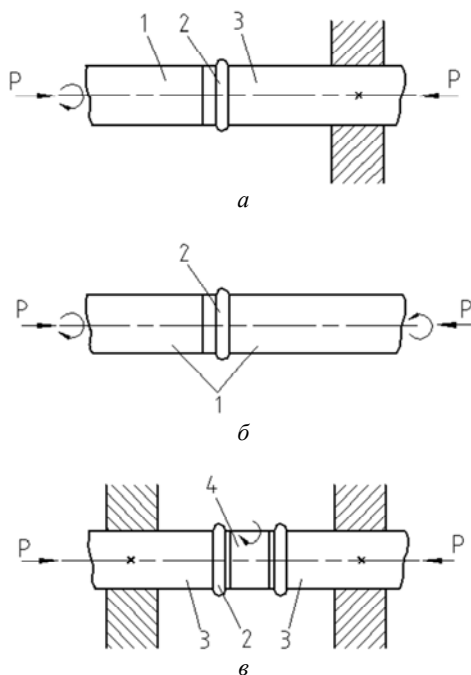


Рис. 14.10. Схемы сварки трением:

- а – с использованием вращения одной детали;
- б – с использованием 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 особенно быстрое торможение затруднительно, можно применять сварку с по-

мощью третьей промежуточной детали (вставки) 4. Для этого длинные детали закрепляют неподвижно, а вставку вращают вокруг общей оси свариваемых деталей (рис. 14.10, в).

Этот способ сварки применяют для соединения стрежней, 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 изготавливать 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.

Сварка пластмасс нагретым инструментом

Сущность способа сварки пластмасс нагретым инструментом заключается в том, что свариваемые детали в месте соединения нагреваются до температуры вязко-текучего состояния специальными инструментами-нагревателями, передающими тепло свариваемым поверхностям при контакте с ними. После разогрева свариваемых поверхностей нагреватель выводят из зоны соединения, и под действием давления P детали свариваются. Такой способ нагрева называют *контактным*.

Способ сварки нагретым инструментом применяется для большинства термопластичных материалов: полиэтилена, полипропилена, фторопласта и др. При этом прочность сварных соединений высокая и, как правило, составляет 90–100 % прочности основного материала.

На рис. 14.11 приведены схемы сварки пластмасс нагретым инструментом. Следует отметить, что при контактной сварке нагрев свариваемых деталей осуществляется двумя способами:

- нагреватель соприкасается с внешней поверхностью изделия, и тепло передается к свариваемой поверхности через толщину верхнего слоя пластмассы (рис. 14.11, *а, б*);
- нагреватель непосредственно соприкасается со свариваемыми поверхностями (рис. 14.11, *в, г, д*)

Первый способ применяется для сварки изделий из пленок и тонких листов, второй – для сварки пластмассовых труб, стержней, для приварки арматуры к трубопроводам, для сварки фасонных пластмассовых конструкций.

Сварка нагревом внешней поверхности изделия осуществляется инструментом-нагревателем, который одновременно спрессовывает

соединяемые детали. В этой связи данный способ получил название *контактно-тепловой* сварки прессованием. При этом изделие можно нагревать с одной или с обеих сторон. Двусторонний нагрев материала облегчает условия сварки, так как позволяет ускорить разогрев материала до требуемой температуры. Однако этот способ применим в тех случаях, когда конструкция свариваемого изделия позволяет подводить нагреватели с двух сторон.

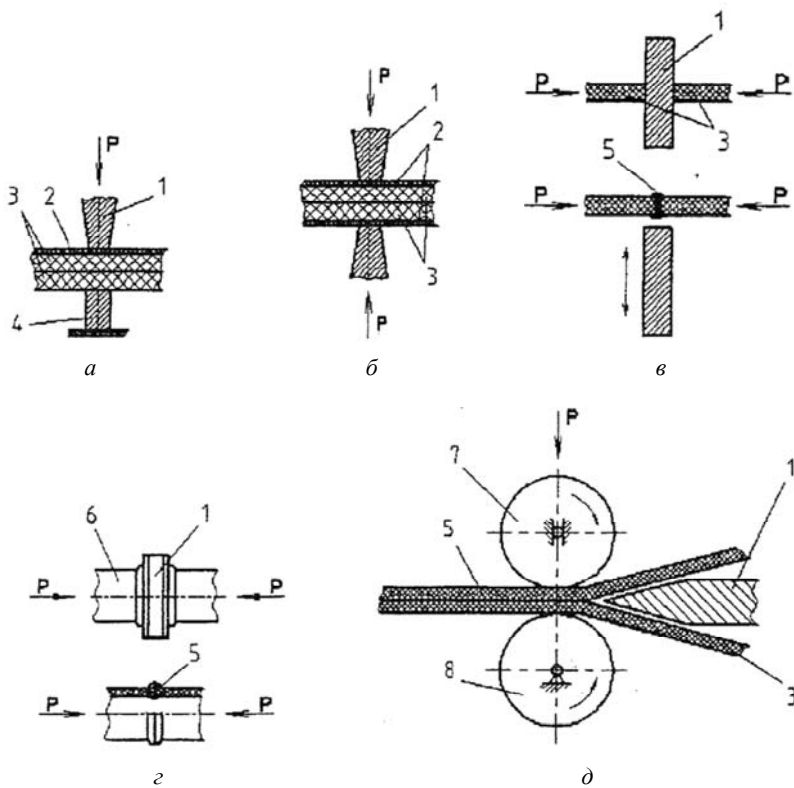


Рис. 14.11. Сварка нагретым инструментом:
а – с односторонним нагревом; *б* – с двусторонним нагревом;
в – сварка листов нагретым инструментом;
г – сварка труб нагретым инструментом; *д* – сварка нагретым клином;
 1 – нагретый инструмент; 2 – изоляционная накладка;
 3 – свариваемые листы; 4 – опора; 5 – сварной шов;
 6 – свариваемые трубы; 7 – ведущий ролик; 8 – ролик-опора

Способ сварки прессованием позволяет за один цикл соединять изделие по всей длине или проводить шаговую сварку при соединении длинных швов. Изделия сваривают на прессовых устройствах с нагреваемыми губками, в которых для поддержания требуемой температуры установлены терморегуляторы.

Для исключения прилипания свариваемой пленки к нагреваемым губкам или к рабочему столу сварку выполняют через различные разделительные прокладки толщиной до 0,1 мм из лент фторопласта-4, целлофана или ацетатной пленки.

В зависимости от свойств свариваемого материала, толщины прокладок и температуры нагретого инструмента продолжительность сварки составляет 3–5 секунд. Для того, чтобы исключить коробление свариваемых деталей, их охлаждают под давлением, что снижает производительность процесса. По этой причине этот способ применяют в мелкосерийном производстве, при ремонтных работах, а также при сварке фторопласта-4.

Способ сварки с непосредственным нагревом соединяемых поверхностей изделия заключается в том, что место соединения свариваемого материала нагревают до температуры вязко-текучего состояния при непосредственном контакте нагревателя со свариваемыми поверхностями. После того, как нагреватель оплавит свариваемые поверхности, его выводят из места соединения, а нагретый материал выдерживают некоторое время под давлением 0,1–0,3 Мпа. Нагреватели, изготавливаемые из алюминия и нержавеющей стали, представляют собой приборы типа электропаяльников, имеющих различную форму в зависимости от конструкции свариваемых изделий. Мощность таких электронагревателей составляет от 100 до 400 Вт.

При использовании дисковых нагревателей этот способ иногда называют *стыковой сваркой горячим «лезвием»*. Металлическая пластина – «лезвие» зажимается между свариваемыми поверхностями и нагревается электрическим током (рис. 14.11, в, г). После оплавления контактирующих поверхностей деталей с нагревателем последний выводится из зоны сварки, а соединяемые детали сжимаются с определенным давлением до полного отведения сварного шва.

Сварка горячим «лезвием» нашла широкое применение при изготовлении различных емкостей, деталей машин, при соединении труб и т. д. Стыковая сварка горячим «лезвием» применяется для соединения деталей толщиной 2–20 мм (см. рис. 14.11, в). Этот способ

широко применяется для соединения труб встык диаметром 100 мм и выше. Торцы труб оплавливают плоским нагревательным элементом и затем соединяют при некотором давлении. Основное преимущество контактной сварки нагретым инструментом – это простота его реализации.

Для соединения тонкостенных изделий или пленок применяется сварка внахлестку. Этот способ находит применение в тех случаях, когда сварка встык затруднена. В этом случае применяется нагревательный элемент в виде паяльника или клина (см. рис. 14.11, *д*). Соприкасающиеся поверхности соединяемого материала разогреваются до вязко-текучего состояния с помощью клиновидного нагревательного элемента, входящего в щель, образуемую двумя роликами.

Для сварки пластмасс с использованием нагревательного клина применяются специальные установки, в которых нагревательный клин представляет собой электрический элемент сопротивления. Давление на свариваемое изделие осуществляется роликами. Вращающиеся ролики перемещают свариваемый материал и одновременно передают необходимое давление, создаваемое пружинами. За счет их регулирования можно в широком диапазоне изменять величину давления. Привод роликов осуществляется электродвигателем с плавно регулируемым числом оборотов.

Такие машины предназначены для сварки длинных швов любых контуров, при этом их прочность составляет 90–100 % прочности основного материала. Важно подчеркнуть, что при этом способе верхнего предела толщины листов не существует, так как нагрев происходит со стороны соединяемых поверхностей и не зависит от толщины свариваемого материала.

Разновидностью способа контактно-тепловой сварки прессованием является *термоимпульсная сварка*, схема которой приведена на рис. 14.12.

При этом способе сварки нагревательные элементы получают кратковременные, но мощные импульсы тока, обеспечивающие нагрев свариваемых пленок. В паузах между импульсами сварной шов остывает под давлением. Свариваемые пленки 6 размещают на неподвижном столе сварочной установки между электродами. Верхний связан с механизмом вертикального возвратно-поступательного движения. Каждый электрод состоит из оправки 2, электро- и теплоизоляционного наконечника 4, металлической шины-электрода 5, фто-

ропластовой прокладки 7 и изоляционных накладок 3, прикрепленных к оправке 2 винтами.

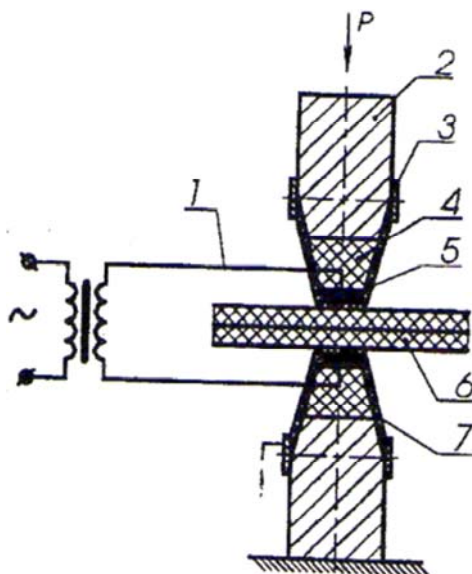


Рис 14.12. Схема термоимпульсной сварки:

- 1 – понижающий трансформатор; 2 – оправка; 3 – изоляционная прокладка;
4 – электро- и теплоизоляционный наконечник; 5 – шина-электрод;
6 – пленка; 7 – фторопластовая прокладка

Установка оснащена понижающим трансформатором 1, ток напряжением 12–36 В подается импульсами на электроды 5 через токоподводы. Периодичность и длительность импульсов регулируют элементами электрической схемы. В зависимости от толщины свариваемого материала длительность импульса составляет от 0,1 до 1 с, а число импульсов может достигать 60 в минуту при удельной мощности порядка 300 Вт/см^2 . Вся установка монтируется на столе, и при автоматической шаговой подаче материала ее производительность достигает 1,5 м/мин.

После отключения источника электрического тока направление потока тепла меняется на обратное. Остаточное тепло из сварного шва отводится через ленту, которая в силу малой теплоемкости охлаждается достаточно быстро. Охлаждение под давлением – это

основное преимущество термоимпульсной сварки. Охлажденные поверхности не прилипают к нагревательному инструменту, поэтому сваривать термоимпульсным методом можно без антиадгезионных прокладок.

При термоимпульсной сварке нагревательные элементы имеют температуру, равную температуре размягчения свариваемого материала, при этом характер нарастания температуры в материале определяется конструктивными элементами нагревательных элементов.

Преимуществом термоимпульсной сварки является то, что этим способом можно соединять очень тонкие пленки толщиной менее 100 мкм, причем с уменьшением ее толщины скорость сварки возрастает. При соединении очень тонких пленок используется односторонний нагрев.

Недостатком контактной сварки прессованием и термоимпульсной сварки является то, что распределение температуры начинается от поверхности свариваемой пластмассы. Поэтому, чтобы довести температуру внутренних поверхностей материала до температуры сварки за короткий промежуток времени, необходимо сильно перегреть ее внешние поверхности. Способ термоимпульсной сварки нашел применение при соединении тонких пленок из полиэтилена, полипропилена и т. д.

Описание экспериментальных установок

Лабораторная установка для сварки пластмасс трением

Она создана на базе настольного токарного станка Т-28. Принципиальная схема установки и фотография ее общего вида приведены на рис. 14.13.

От электродвигателя 1 вращение через ременную передачу общается 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.

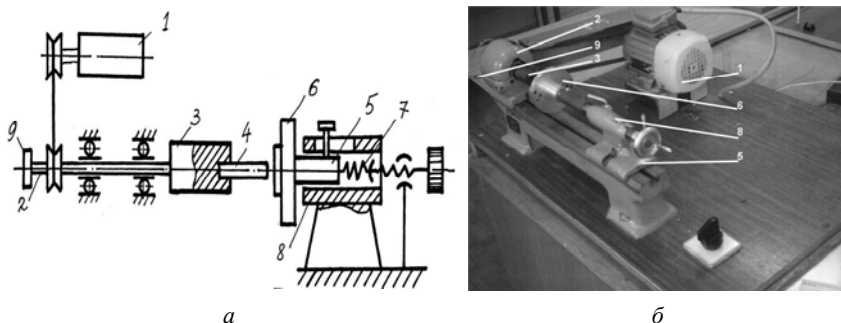


Рис. 14.13. Лабораторная установка для сварки пластмасс трением:
а – схема; *б* – фотография общего вида;
 1 – электродвигатель; 2 – шпиндель; 3, 8 – втулки; 4 – заготовка;
 5 – задняя бабка; 6 – планшайба; 7 – пружина; 9 – ручной тормоз

Лабораторная установка для термоимпульсной сварки пластмасс

Устройство термокомпрессионной импульсной сварки пластмасс предназначено для сварки внахлест полиэтиленовой, полипропиленовой и других лент из термопластичных пластмасс толщиной от 0,03 до 0,3 мм.

Устройство собрано на массивном деревянном основании 1 (рис. 14.14) и состоит из двух головок: сварочной 2 и прижимной 3, а также блока питания и управления 4



Рис. 14.14. Фотография общего вида:
 1 – основание; 2, 3 – сварочная и прожимная головка;
 4 – блок питания и управления

Сварочная головка предназначена для нагрева материала до температуры размягчения пластмассы, при которой происходит варка изделия, и отвода тепла от сварного шва после завершения сварки.

Прижимная головка предназначена для создания в процессе сварки необходимого сварочного давления на материал свариваемых лент и отвода тепла от сварного шва после завершения сварки.

На рис. 14.15, *а* показано трехмерное изображение сварочной головки, с указанием ее основных элементов, и фотография ее общего вида (рис. 14.15, *б*).

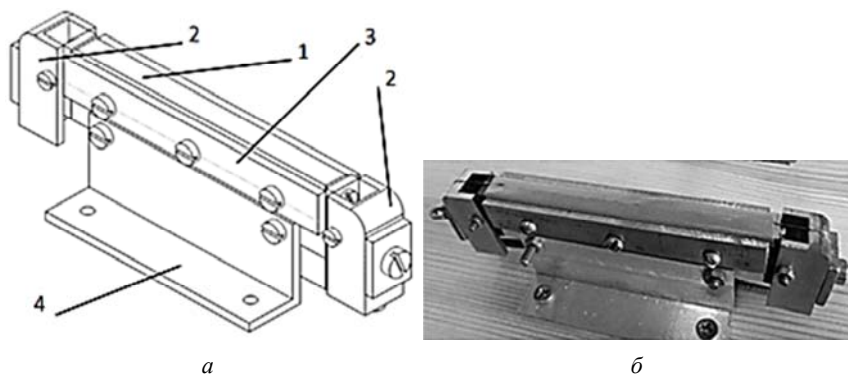


Рис. 14.15. Трехмерное изображение сварочной головки (*а*) и фотография ее общего вида (*б*):
1 – основание; 2 – компенсационное устройство; 3 – прижимные защитные прокладки; 4 – устройство крепления сварочной головки

На верхней плоскости рабочего основания сварочной головки через изолирующие прокладки установлен нагревательный элемент, предназначенный для подвода тепла к свариваемым поверхностям. В данном случае этот нагревательный элемент представляет собой проволоку из нихрома Х20Н80 диаметром 0,3 мм.

При подаче на нагревательный элемент импульса тока происходит его нагрев. Для сварки полиэтилена требуется удельная мощность на нагревателе, примерно от 0,15 до 0,24 Вт/мм².

Вследствие нагрева нагреватель (проволока) изменяет свои размеры, поэтому для компенсации изменения длины нихромовой проволоки в сварочной головке предусмотрено компенсационное устройство. Оно состоит из двух подпружиненных рычагов, уста-

новленных на изолирующем основании, между которыми закреплена нихромовая проволока (нагреватель). Рычаги компенсационного устройства создают необходимое усилие для натяжения нихромовой проволоки, удлиняющейся при сварке. К рычагам компенсационного устройства в момент осуществления сварки подводится напряжение от источника питания.

Для изоляции нагревателя от основания сварочной головки и свариваемых материалов используются защитные прокладки, изготовленные из термостойкого материала, имеющего низкую адгезию к свариваемым пленкам (лентам) и хорошо проводящего тепло (фторопласт).

Закрепление сварочной головки на основании устройства осуществляется с помощью двух уголков, имеющих соответствующие отверстия для крепежа.

Прижимная головка рис. 14.16 предназначена для создания необходимого сварочного давления в процессе выполнения сварочной операции.

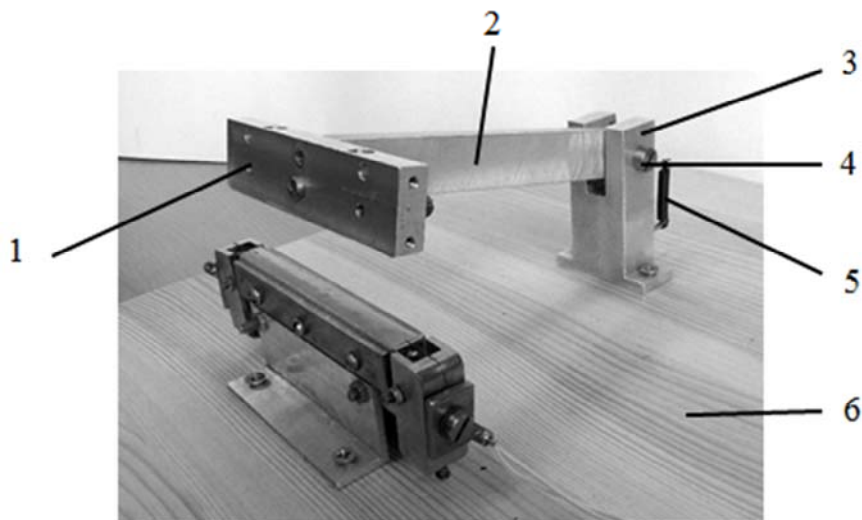


Рис. 14.16. Фотография узла прижимной головки с указанием его основных элементов:

1 – прижимная планка; 2 – рычаг; 3 – кронштейн; 4 – ось;
5 – пружина; 6 – основание

Для изоляции прижимной головки от свариваемых материалов используется защитная прокладка, изготовленная из термостойкого материала, имеющего низкую адгезию к свариваемым пленкам (лентам) и хорошо проводящего тепло (фторопласт).

Головка закреплена на рычаге 2, который установлен в кронштейне 3, связанном с основанием устройства 6. Рычаг имеет возможность поворачиваться в вертикальной плоскости относительно оси 4. В нерабочем (верхнем) положении рычаг с прижимной головкой поддерживается пружиной 5.

Блок питания включает понижающий трансформатор, выпрямитель и систему управления процессом сварки. На передней панели блока (рис. 14.17) установлены выключатель питания сети, два потенциометра регулирования времени сварки и времени остывания, кнопка «Пуск» процесса сварки и индикатор протекания процесса сварки.



Рис. 14.17. Фотография передней панели блока установки

Порядок выполнения работы

Сварка пластмасс трением

1. Получить у инженера пластмассовые образцы, предназначенные для сваривания: плоский 1 и стержневой квадратного сечения 2 (рис. 14.18).

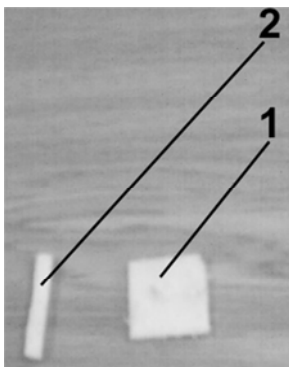


Рис. 14.18. Фотография образцов, используемых для сварки трением

2. Убедиться, что станок отключен от сети.
3. Установить до упора в квадратное отверстие шпинделя стержневой образец квадратного сечения (рис. 14.19).



Рис. 14.19. Фотография установленного на лабораторной установке стержневого образца квадратного сечения

4. На рабочую поверхность планшайбы 1 установить плоский образец 2, закрепив его двумя прихватами 3 (рис. 14.20).



Рис. 14.20. Фотография установленного на лабораторной установке плоского образца

5. Передвинуть заднюю бабку 1 влево до касания образцов и закрепить ее в этом положении с помощью фиксатора 2 (рис. 14.21).

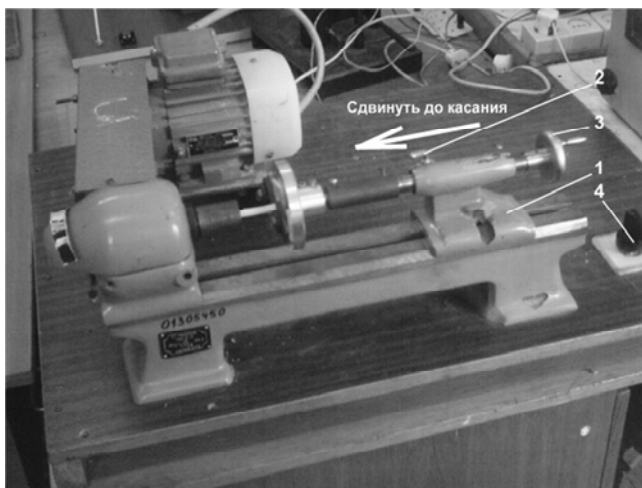


Рис. 14.21. Фотография лабораторной установки с установленными образцами

6. С помощью маховика 3 (рис. 14.21) на задней бабке создать необходимую величину осевой нагрузки за счет деформирования пружины.

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

8. Включить станок в сеть напряжением 220 В.

9. Включить электродвигатель станка с помощью тумблера 4, смонтированного на панели установки (рис. 14.21).

10. По истечении 1–2 мин работы станка, в результате нагрева взаимодействующих поверхностей образцов, пластмасса в зоне их контакта из твердого переходит в вязко-текучее 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. 14.13, б).

11. После выдержки образцов в неподвижном состоянии в течение 0,5–1 мин с помощью маховика 3 (рис. 14.21) на задней бабке отвести планшайбу вправо. При этом, если сварное соединение получилось прочным, вместе с плоским образцом должен переместиться из отверстия шпинделя и образец квадратного сечения. Сваренные образцы представлены на рис. 14.22.



Рис. 14.22. Фотография сваренных образцов

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 его.

Термоимпульсная сварка пластмасс

1. С помощью ножниц отрезать две полосы полиэтиленовой пленки длиной ≈ 100 мм и шириной не более 100 мм.

2. Уложить полосы друг на друга и поместить их на рабочую поверхность сварочной головки (рис. 14.23).



Рис. 14.23. Фотография свариваемых пленок, расположенных на рабочей поверхности сварочной головки

3. Вращая потенциометры «Время сварки» и «Время остывания» установить время сварки.

4. Прижать рукой прижимную головку к поверхности свариваемых образцов (рис. 14.24).



Рис. 14.24. Фотография рабочего положения прижимной головки

5. Нажав кнопку «Пуск сварки» дождаться выключения индикатора «Процесс сварки», что будет сигнализировать о произведенной сварке образцов.

6. Визуально произвести осмотр получившегося сварочного шва и сделать вывод.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть:
 - 4.1. Принципиальная схема установки для сварки пластмасс трением.
 - 4.2. Принципиальная схема сварочной головки для термоимпульсной сварки пластмасс.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Какими достоинствами обладает ультразвуковая сварка пластмасс, по сравнению с другими видами сварки?
2. Какова амплитуда и частота колебаний при ультразвуковой сварке пластмасс?
3. За счет каких явлений происходит переход механической энергии колебаний в тепловую в свариваемом шве?
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. Предоставьте схемы применения ультразвука для сварки биологических тканей и наплавки.
10. Какие виды пластмасс используются при сварке трением? В чем ее основные преимущества перед другими видами сварки?
11. Перечислите основные схемы сварки трением. Для каких деталей они используются?
12. Какие станки используются в технологическом процессе сварки трением?
13. В чем состоит сущность термоимпульсной сварки пластмасс?
14. Из каких основных элементов состоит сварочная головка для термоимпульсной сварки пластмасс?

Литература

1. Технология производства изделий из пластмасс : учебное пособие / М. Г. Киселев [и др.]. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 152 с.
2. Киселев, М. Г., Минченя, В. Т., Есьман, Г. А. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения : учеб. пособие. – Минск : Тесей, 2003. – 424 с.
3. Ультразвук / под ред. И. П. Голяминой. – М. : Сов. энцикл., 1979. – 400 с.

Лабораторная работа № 15

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ОБМОТОК

Цель работы

1. Изучить конструкции обмоток и применяемые для их изготовления провода.
2. Изучить кинематические схемы намоточных станков и технологию изготовления катушек.
3. Изучить вопросы технического контроля обмоток.
4. Изучить способы защиты катушек с обмотками от воздействия внешней среды.
5. Приобрести практические навыки изготовления обмоток и их контроля.

Инструменты и принадлежности к работе

1. Намоточный станок ПР159М или СМ5Л.
2. Ферритовое кольцо для намотки.
3. Челнок с проводами для намотки.
4. Устройство для контроля обмоток на короткозамкнутые витки.
5. Устройство определения числа витков катушки.

Теоретическая часть

Классификация и конструктивные исполнения обмоток

По конструктивным исполнениям обмотки делят на *каркасные* и *бескаркасные*. Основным элементом любой обмотки является виток, под которым понимается часть провода, уложенного по периметру обмотки (каркаса) за один оборот со смещением конца витка относительно его начала на величину шага.

Рядом, или *слоем*, называют витки, уложенные по ширине обмотки. Однослойные рядовые обмотки (рис. 15.1) можно уложить на цилиндрические или плоские каркасы: *вплотную*, виток к витку (рис. 15.1, а), *с шагом между витками* (рис. 15.1, б) и *с возрастающим шагом* (рис. 15.1, в).

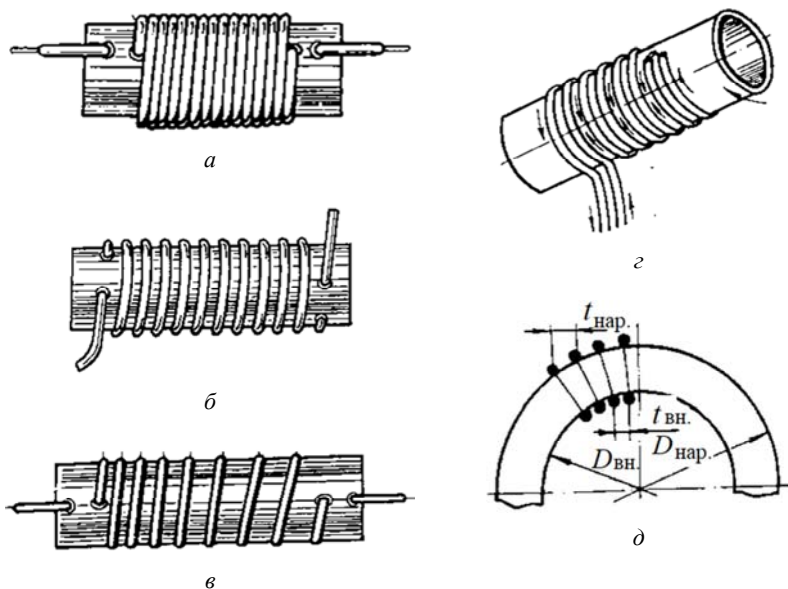


Рис. 15.1. Однослойные рядовые обмотки

Для изготовления проволочных безиндуктивных резисторов применяют бифилярную намотку (рис. 15.1, *з*), состоящую из двух изолированных проводов, соединенных между собой с одного конца.

Кольцевую тороидальную обмотку (рис. 15.1, *д*) укладывают на каркас или на тороидальный магнитопровод с шагом укладки витков вплотную по внутреннему диаметру и с произвольным шагом по наружному диаметру.

Многослойная простая рядовая обмотка (рис. 15.2, *а*) содержит несколько рядов уложенных витков *2* на каркасе *1*. Она характеризуется большой индуктивностью и емкостью, а также повышенной разностью потенциалов между витками в соседних рядах. С целью усиления изоляции между рядами *2* используются прокладки *3* из кабельной, конденсаторной или телефонной бумаги.

Секционную обмотку (рис. 15.2, *б*) применяют для уменьшения разности потенциалов между рядами с соседними витками, а также для уменьшения собственной емкости. Обмотку укладывают на каркас *1*, разделенный перегородками на секции *2*. Число уложенных рядов *3* в секции должно быть нечетным, что дает возможность прокладывать

провод из одной секции в другую. В случае катушек индуктивности провод во всех секциях укладывают в одном направлении.

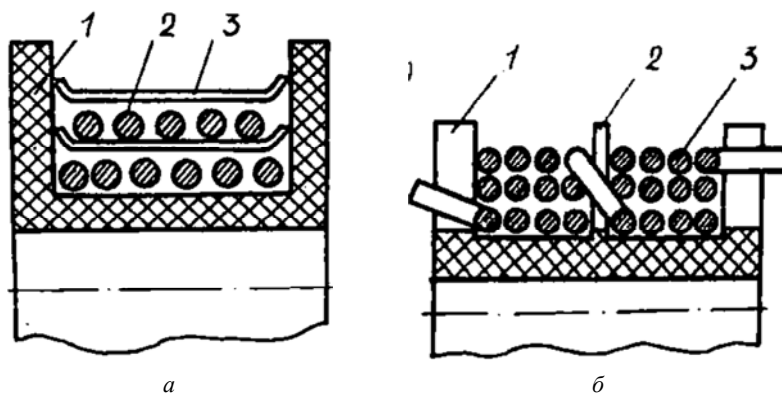


Рис. 15.2. Многослойные рядовые обмотки:
1 – каркас; 2 – ряд уложенных витков; 3 – прокладки

При изготовлении проволочных безиндуктивных сопротивлений для резисторов каркасы катушки применяют с четным числом секций и одинаковым числом витков в каждой секции, но направление обмотки должно быть противоположным в каждой секции. Поэтому после укладки витков в одной секции каркас снимают со шпинделя намоточного станка, поворачивают на 180° , затем снова устанавливают его на шпиндель и продолжают вести укладку витков в том же направлении. При прохождении тока по такой обмотке возникающие в соседних секциях магнитные поля взаимно компенсируются.

Галетные обмотки – бескаркасные многослойные; используют в случае сложной конфигурации (рис. 15.3). Обмотки наматывают на оправку (рис. 15.3, а), которую устанавливают и закрепляют на станке с помощью конуса 1. На оправке закрепляют щеку 2, втулку 7, определяющую внутренний контур обмотки. После этого устанавливают щеку 3 все вместе скрепляют шайбой 5 и барашковой гайкой б.

На шпильках 4 укрепляют начало обмотки и укладывают требуемое число витков. После завершения намотки катушку связывают тафтяной лентой, как показано на рис. 15.3, б. Затем бескаркасные катушки передают на пропитку лаком с последующей запечкой в печи для его полимеризации.

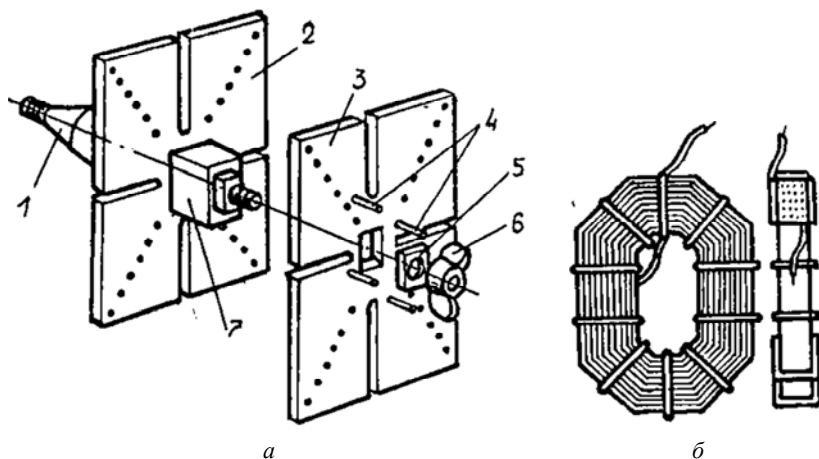
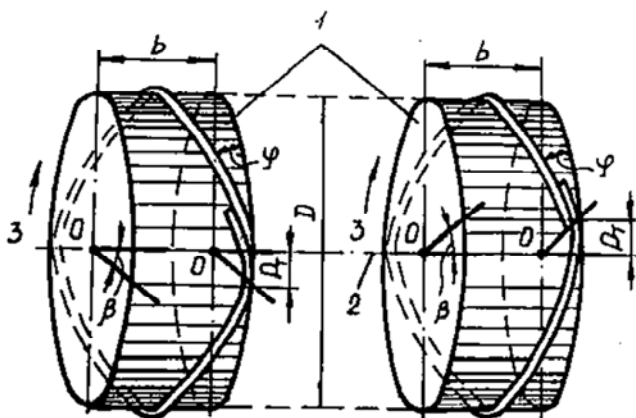


Рис. 15.3. Бескаркасная галетная обмотка:
 1 – конус; 2, 3 – щеки; 4 – шпилька; 5 – шайба; 6 – барабанная гайка

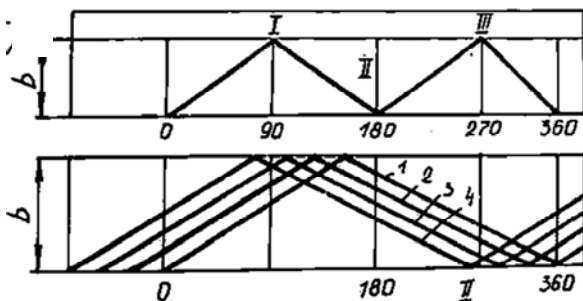
Универсальные обмотки характеризуются малой собственной емкостью при больших значениях индуктивности, характерной особенностью такой обмотки является наличие перегибов в каждой витке. Укладка провода под углом к торцам катушки создает большую радиальную толщину при малой ширине катушки.

Универсальная обмотка (рис. 15.4, *a*) выполняется на намоточном станке, у которого имеется возможность перемещения проводов от одного торца катушки к другому в пределах ширины обмотки *b*. В результате перемещения провода у торцов обмотки получают перегибы I, II, III, IV и перекрытия витков 1, 2, 3, 4 (рис. 15.4, *b*). При перемещении провода каркас катушки поворачивается на один оборот. Провод вместе с поводком может делать несколько возвратно-поступательных перемещений, в результате чего получается несколько перегибов. При следующем повороте каркаса провод продолжает укладываться, при этом точки перегибов смещаются на угол β или угловой шаг.

Провод может перегибаться, не доходя до предыдущего перегиба, на угол β , и намотка получается с опережением; при переходе на этот же угол намотка производится с запаздыванием. Чем больше перегибов в обмотке, тем меньше емкость катушки. Число перегибов может быть от 2 до 8.



a



б

Рис. 15.4. Универсальная обмотка

Для универсальной обмотки введено понятие цикл намотки, который отличается от витка на величину угла. Цикл включает повторяемость укладки провода.

Перекрестная обмотка (рис. 15.5) является разновидностью универсальной и применяется для намотки катушек с большой величиной индуктивности. Она отличается от универсальной наличием только двух перегибов. Цикл может продолжаться более двух витков, т. е. иметь несколько оборотов, поэтому и ширина обмотки не ограничена. Витки укладываются с опережением и запаздыванием. На рис. 15.5, а показана схема развертки обмотки, а на рис. 15.5, б общий вид перекрестной обмотки.

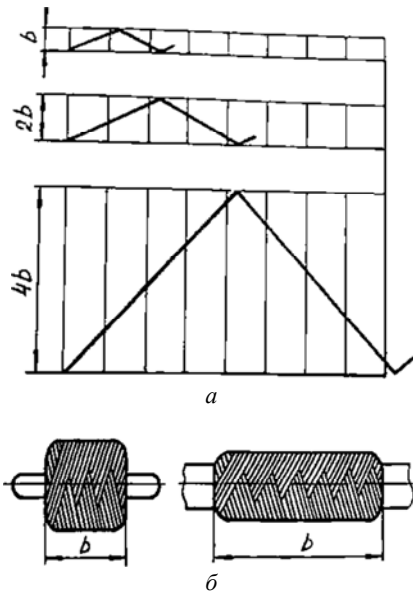


Рис. 15.5. Перекрестная обмотка

Провода для намотки катушек

В зависимости от конструкции катушек и условий их работы применяют обмоточные провода из чистой меди с соответствующей изоляцией, алюминия и высокоомных сплавов, например, нихрома с изоляцией и без изоляции.

Изоляция обмоточных проводов может быть из эмали, волокнистых и комбинированных материалов с небольшой толщиной, высокой электрической прочностью, температуростойкостью, химической стойкостью относительно пропиточных веществ, механической прочностью и эластичностью.

Для катушек индуктивности применяют провода из чистой меди с эмалевой изоляцией (ПЭЛ). Провода марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2, имеющие изоляцию на основе поливинилацетатных лаков, более теплоустойчивы, чем провода с изоляцией ПЭЛ. Они могут работать при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов. Провода с однослойной изоляцией ПЭВ-1 могут работать при напряжении 500 В; провод ПЭВ-2, имеющий толщину изоляции на $0,01\text{--}0,003$ мм больше, чем у ПЭВ-1, применяют для более высоких напряжений.

Провода марок ПЭЛР-1и ПЭЛК-2 с полиамидрезольной изоляцией обладают стойкостью к бензину; провода марок ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2 с полиуретановой изоляцией – повышенной теплостойкостью и допускают пайку без их зачистки и без флюса. Стеклопластиковая изоляция проводов (с диаметром жилы до 1 мм) допускает нагрев до 450 °С.

Провод ПЭЛБО – лакостойкий с эмалевой изоляцией и однослойной хлопчатобумажной оплеткой; провод ПЭЛШО – такой же, но с шелковой оплеткой.

Для высококачественных катушек индуктивности применяют многожильный провод (литцентрат), в котором содержится от 7 до 28 изолированных между собой жил в общей шелковой оплетке (ЛЕШО) или с двумя слоями шелковой оплетки (ЛЕШД). Подобные провода обладают малыми потерями на поверхностный эффект.

Выводы обмоток, намотанных тонким проводом, для повышения механической прочности выполняют с помощью многожильного гибкого провода типа МГШВ-гибкий провод с шелковой обмоткой и винилпластовой изоляцией ПМВГ-гибкий провод с винилитовой изоляцией.

Согласно ГОСТ 12182.3-71, число точечных повреждений изоляции на длине 15 м не должно превышать 5–15 штук. Электрическую прочность изоляции проводов проверяют на высоковольтной установке путем приложения напряжения к двум скрученным проводам. При этом пробивное напряжение не должно быть меньше значений, приведенных в табл. 15.1.

Таблица 15.1

Значения пробивного напряжения проводов

Номинальный диаметр провода без изоляции	Число скруток на длине 200 м	Пробивное напряжение различных проводов, В, не менее							
		ПЭЛ	ПЭЛУ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛР-2, ИЭТВ	ПЭЖ, ПЭММ, ПЭМГ	ПЭВКМ-1, ПЭВКТ-1, ПЭВМТ-1	ПЭВНХ-2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05–0,07	60	350	450	350	450	450	450	200	200
0,08–0,10	60	400	500	400	550	550	150	300	300

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,10–0,14	60	400	500	500	700	700	200	350	400
0,15–0,20	33	550	650	600	800	800	225	350	400
0,21–0,41	25	800	1000	800	1200	1000	250	400	450
0,44–0,53	25	800	1000	850	1200	1200	250	400	–
0,55–0,83	25	900	1100	1000	1500	1500	250	450	–
0,86–1,35	15	1000	1300	1200	1800	1800	300	450	–
1,4–2,44	8	1250	1000	1400	2000	2000	–	–	–

Намоточные станки и технология намотки катушек

По приводу и возможности производить различные намотки намоточные станки разделяются на станки с механическим и ручным приводами. Последние находят применение в исключительных случаях в экспериментальных работах.

Станки с механическим приводом разделяются на станки для рядовой намотки, универсальной и тороидальной.

Кинематика станка для рядовой намотки

Схема станка приведена на рис. 15.6. На шпинделе 19 укреплена оправка 17 с каркасом катушки 18. От электродвигателя 1 через ременную передачу и промежуточный вал 2 вращение сообщается шестерне 6, от которой через систему шестерен 7 оно передается на червячную пару 8. Это вызывает поворот кулачка 10 и смещение кулисной тяги 9, что приводит к смещению кулисы 12 на оси 14 поводка 15. Последний укладывает провод 13, проходящий через ролики 16 на каркас катушки 18. Для подсчета количества уложенных витков провода предусмотрен счетчик 20, кинематически связанный со шпинделем 19.

Для обеспечения укладки витков по всей ширине обмотки устанавливают соответствующий размах кулисы при помощи кулисного крепления 14, перемещаемого винтом 11. С помощью сменных шестерен 7 (Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4) настраивается требуемый шаг намотки. Рычагом 4, 5 и шестерней 3 осуществляется включение и выключение станка.

При подготовке намоточного станка к работе необходимо установить требуемое натяжение провода 8 (рис. 15.7), от которого зависит коэффициент заполнения катушки и ее габариты. Для этого

используется специальное приспособление, установленное на станке. Катушка с проводом 11 устанавливается в центрах 9. На одной оси с ней закреплен диск для ленточного тормоза 12, по которому скользит лента 10. Один ее конец закреплен неподвижно, а другой связан с рычагом 5, регулирующим натяжение. Рычаг укреплен неподвижно на оси 4 с пружиной натяжения 3, храповым колесом 1 и рукояткой 2, на которой закреплен второй конец пружины натяжения.

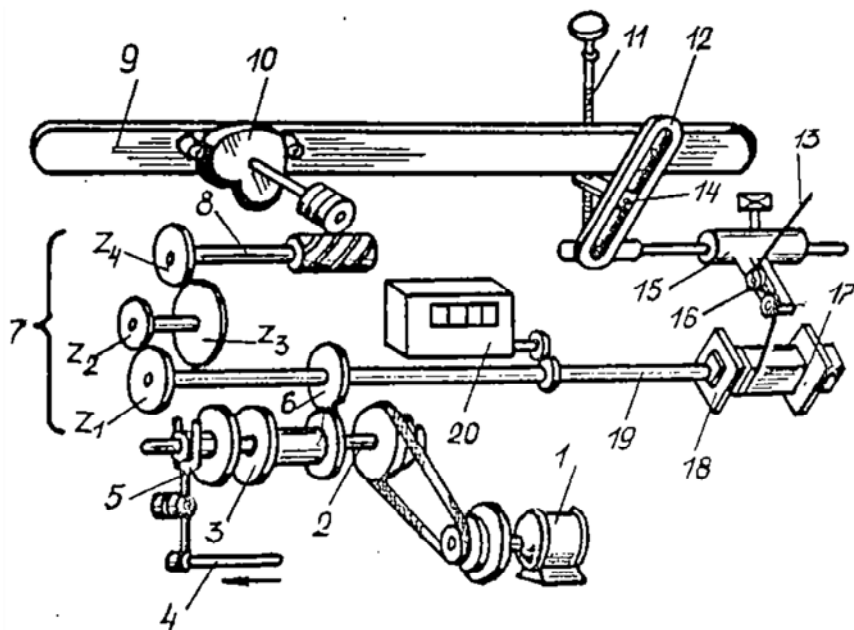


Рис. 15.6. Схема станка рядовой намотки:

- 1 – электродвигатель; 2 – вал; 3, 6 – шестерни; 4, 5 – рычаги;
 7 – система шестерен; 8 – червячная пара; 9 – кулисная тяга; 10 – кулачок;
 11 – винт; 12 – кулиса; 13 – провод; 14 – ось; 15 – поводок; 16 – ролики;
 17 – оправка; 18 – каркас катушки; 19 – шпиндель; 20 – счетчик

В процессе намотки провод скользит по ролику 6, установленному на оси 7, при этом усилие P , действующее на рычаг, опускает его, ослабляя торможение диска и освобождая катушку с проводом. Натяжение провода в этом устройстве обеспечивается закручиванием пружины ручкой через храповое колесо.

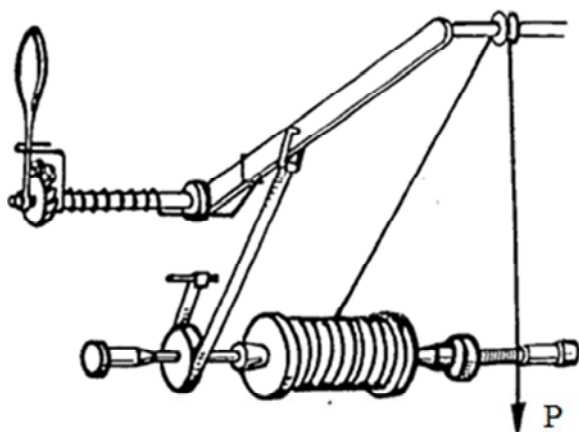


Рис. 15.7. Схема для приспособления натяжения провода

При намотке тонкими проводами на больших скоростях целесообразно применять электрическое устройство, схема которого приведена на рис. 15.8.

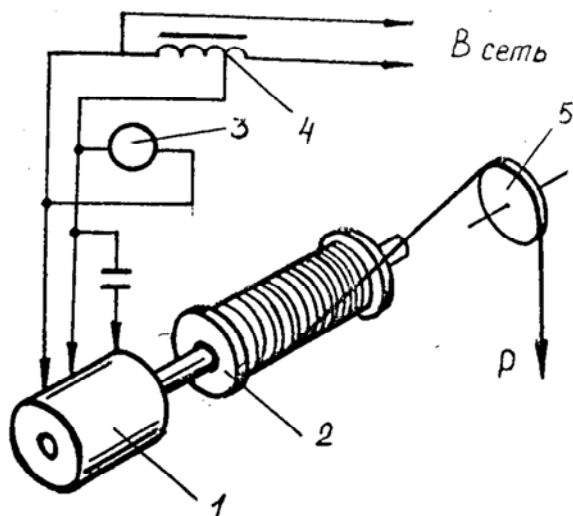


Рис. 15.8. Схема приспособления для натяжения провода:
 1 – электродвигатель; 2 – катушка с проводом; 3 – вольтметр;
 4 – трансформатор; 5 – провод

В этом устройстве натяжение создается с помощью индукционного однофазного электродвигателя, работающего в режиме торможения. Электродвигатель питается от сети через трансформатор 4. Для контроля напряжения питания в цепи установлен вольтметр 3. Катушка с приводом 2 установлена на оси электродвигателя 1, который стремится повернуть ее в направлении противоположном сматыванию провода 5, благодаря чему создается ее натяжение. По величине напряжения можно установить требуемое натяжение и регулировать его.

Натяжение привода определяют по эмпирической формуле в зависимости от материалов:

- для медного провода – $P_{\text{доп}} = 8,5 \cdot 10^3 d_2 = 85 \text{ Н}$;
- для проводов из константана и манганина – $P_{\text{доп}} = 19 \cdot 10^3 d_2 = 19 \text{ Н}$;
- для провода из нихрома – $P_{\text{доп}} = 27 \cdot 10^3 d_2 = 270 \text{ Н}$.

Здесь d – диаметр провода без изоляции, мм.

Кинематика станка для универсальной намотки

Станок для этой намотки отличается от станка для рядовой намотки тем, что поводок за один оборот каркаса перемещается по всей ширине в прямом и обратном направлениях столько раз, сколько в ней перегибов. Кроме того, в этом станке отсутствует постоянная червячная пара.

Схема станка для универсальной намотки приведена на рис. 15.9.

Схема включает поводок 12, закрепленный на тяге 11, на конце которой имеется ролик 9, прижимаемый к рабочей поверхности кулачка 10 с помощью пружины 8. Перемещение поводка зависит от формы и размера выступа кулачка, поэтому для каждой катушки должен быть отдельный кулачок. Поводок в процессе намотки плотно прилегает к поверхности кулачка. Шпиндель 3 вращается от электродвигателя 1 через ременную передачу и зубчатую пару 2. Через зубчатые колеса 7 вращение передается на кулачок 10, который перемещает тягу с поводком и водителем провода 13. При этом поводок укладывает провод 14 на каркас 15, установленный на оправке 16 на определенную ширину. С целью плавного пуска и остановки станка предусмотрена фрикционная муфта 4 с рычагом 5. Для подсчета количества витков предусмотрен счетчик 6, связанный со шпинделем станка 3.

Передаточное отношение от шпинделя к кулачку определяется подбором сменных шестерен (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4), исходя из требуемого числа перегибов в обмотке или числа витков в цикле.

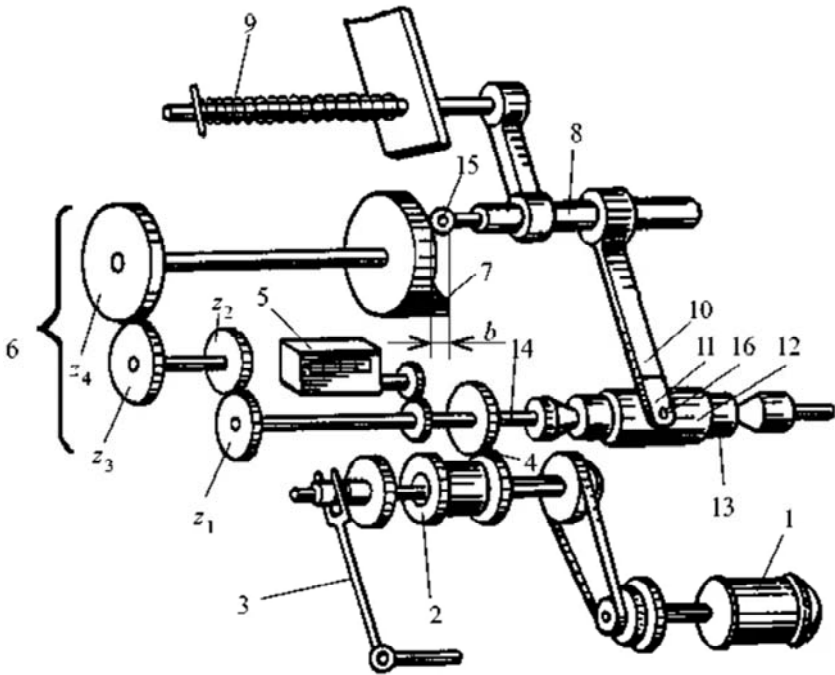


Рис.15.9. Схема станка для универсальной намотки:

- 1 – электродвигатель; 2 – зубчатая пара; 3 – шпиндель;
- 4 – фрикционная муфта; 5 – рычаг; 6 – счетчик; 7 – зубчатые колеса;
- 8 – пружина; 9 – ролик; 10 – кулачок; 11 – тяга; 12 – поводок;
- 13 – водитель провода; 14 – провод; 15 – каркас; 16 – оправка

Кинематика станка для тороидальной намотки

Намоточные станки для тороидальных катушек отличаются от станков для рядовой намотки как конструктивным исполнением, так и принципом намотки катушки.

Основным элементом этого станка является вращающийся челнок, на который перед намоткой провод требуемой длины укладывают непосредственно в паз челнока или на шпулю, укрепленную на его ободу (рис. 15.10).

В процессе намотки кольцевой каркас катушки 2 с помощью кинематической схемы станка поворачивается вокруг своей оси на требуемый угол в зависимости от шага намотки. Челнок 3 со шпулей 5 вращается с помощью зубчатых колес 6. При этом провод со шпули вращается с помощью зубчатых колес 6. При этом провод со шпули или из паза челнока сматывается через ролик 1 и укладывается в один виток на тороидальный каркас с требуемым натяжением от устройства 4 за один оборот челнока.

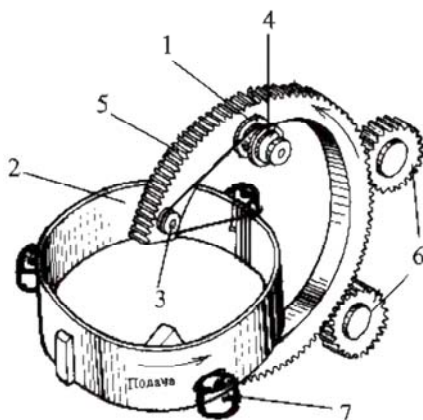


Рис. 15.10. Схема станка для тороидальной намотки:
1 – ролик; 2 – катушка; 3 – челнок; 4 – устройство;
5 – шпуля; 6 – зубчатые колеса

Описанная конструкция челночного механизма позволяет с одной стороны шпули мотать несколько катушек. Недостатком такой конструкции является невозможность намотки каркасов с малым внутренним диаметром и необходимость точной установки окружности каркаса по отношению к центру челнока для получения одинакового натяжения провода.

Плотность намотки катушек

При многослойной намотке стремятся к получению наиболее плотно уложенных витков в обмотку, зависящую от правильности их укладки и соответствующего натяжения провода. Многослойные намотки характеризуются коэффициентом заполнения k . Исходя из

схемы укладки витков обмотки (рис. 15.11), для коэффициента заполнения k приведем следующие выражения:

– коэффициент $k_{и}$ с учетом изоляции провода:

$$k_{и} = \frac{U_{и}}{U} = \pi \frac{d_{и}^2}{4d^2} = 0,787;$$

– коэффициент k_m без учета изоляции провода:

$$k_m = \frac{U_m}{U} = \pi \frac{d_m^2}{4d_{и}^2} = 0,787 \frac{d_m^2}{4d_{и}^2};$$

коэффициент $k_{и}$ при введении межслойной прокладки:

$$k_{и} = \pi \frac{d_{и}^2}{[4(d_{и} + \delta)]}; \quad k_m = \pi \frac{d_m^2}{[4d_{и}(d_{и} + \delta)]},$$

где U – объем обмотки без изоляции, мм³;

$U_{и}$ – объем обмотки с изоляцией, мм³;

$d_{и}$ – диаметр провода в изоляции, мм;

δ – толщина изоляционной прокладки, мм;

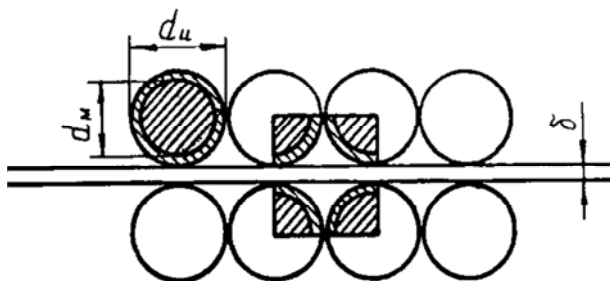


Рис. 15.11. Схема для расчета плотности укладки витков

Практически коэффициент заполнения при рядовой укладке обмоток составляет $k = 0,5-0,7$, а для перекрестно укладываемых коэффициент заполнения меньше.

Бандажирование обмоток применяют для защиты уложенных обмоток от механических повреждений и сохранения формы обмоток. Бандажирование проводят тафтяной или стеклянной лентой требуемой ширины. Бандаж укладывают на обмотку в перекрышку с числом слоев, заданных чертежом.

Обмотки круговой цилиндрической формы бандажируют при их вращении на намоточном станке. Галетные обмотки и обмотки тороидальной формы бандажируют, как правило, вручную.

Технический контроль обмоток

Обмотки (катушки) после намотки их изоляции подвергают проверке, в соответствии с данными чертежей и технических условий.

В состав технического контроля входят внешний осмотр, проверка прочности крепления выводных концов, измерение омического сопротивления обмоток, проверка на отсутствие короткозамкнутых витков и определение числа витков обмоток.

Проверку на короткозамкнутые витки выполняют на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 15.12.

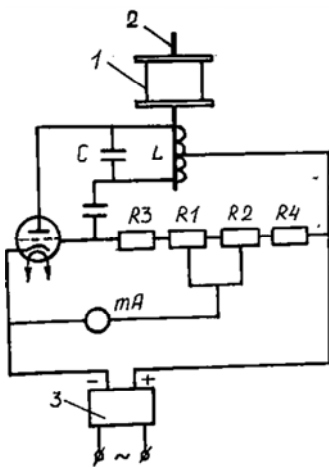


Рис. 15.12. Схема установки для проверки обмоток на короткозамкнутые витки и измерения числа витков:

1 – обмотка; 2 – удлиненный магнитный сердечник; 3 – диодный мост

Установка содержит генератор звуковой частоты и выпрямитель, питаемый от сети с частотой 50 Гц. Контурная катушка генератора имеет удлиненный магнитный сердечник 2, на который надевают

испытуемую обмотку l . Возникающий в короткозамкнутых витках ток создает электромагнитное поле, противодействующее полю контурной катушки. В результате индуктивность контурной катушки и режим работы генератора изменяются, отклоняя стрелку индикатора от нулевого значения, что указывает на короткозамкнутые витки в испытуемой обмотке. Данная схема обладает чувствительностью до одного короткозамкнутого витка.

Число витков в обмотке измеряют методом сравнения с эталонной катушки с помощью прибора, схема которого приведена на рис. 15.13.

Испытуемую $k_{и}$ и эталонную $k_{э}$ катушки помещают на стержень общего магнитопровода M . Катушки соединяют встречно и в эту же цепь включают вольтметр. Магнитный поток создают при помощи питающей обмотки $K_{п}$, подсоединенной к электрической сети промышленной частоты. При помощи декадного переключателя ДП в цепь вводят требуемое количество витков до тех пор, пока число витков в обеих катушках не будет равно и при этом стрелка вольтметра остановится на нуле. При измерении испытуемой и эталонной катушек их размеры должны быть близкими.

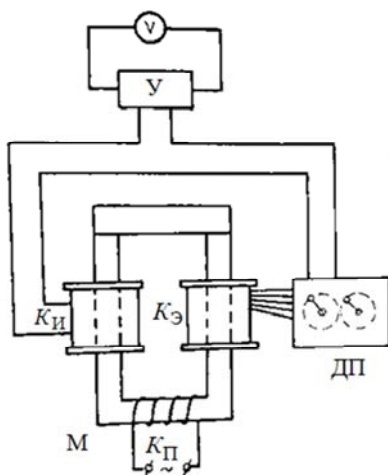


Рис. 15.13. Схема установки для проверки обмоток на короткозамкнутые витки и измерения числа витков

Омическое сопротивление обмоток измеряют методом амперметра и вольтметра или мостиком Уинстона.

Способы защиты катушек с обмотками от воздействия внешней среды

Известно, что в воздушном пространстве всегда имеется некоторое количество влаги, способной проникать в капилляры обмоток, образуя токопроводящие мостики. В результате при длительном воздействии влаги в обмотках снижается сопротивление изоляции и уменьшается электрическая прочность некоторых цепей аппаратуры.

Для предотвращения проникновения влаги применяют следующие способы защиты обмоток: пропитку, заливку, обволакивание.

Материалы, применяемые для защиты катушек с обмотками от проникновения влаги

В табл. 15.2 приведены материалы, используемые для защиты обмоток.

Таблица 15.2

Материалы, используемые для защиты обмоток

Материал и его марка	Пробивная напряженность, кВ/мм	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Морозостойкость,	Нагревостойкость, °С	Температура сушки и полимеризации, °С	Особенности и область применения, °С
1	2	3	4	5	6	7	8
Трансформаторное масло	15–22	2,2	0,0007	–35	+135	–	Заливка и пропитка высоковольтных трансформаторов
Конденсаторное масло	20	2,1	0,0005	–45	+135	–	Пропитка и заливка трансформаторов
Асфальто-маслянный лак	55	3,6	0,03	–60	+105	105	Пропитка трансформаторов и дросселей низкой частоты
Глифталевый лак ПФ-95	60	3,6	0,036	–60	+105	105	Пропитка трансформаторов

Окончание табл. 15.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Винифлексовый лак ВЛ-7	40	3,0	0,009	-60	+130	-	Влагостойкий, грибостойкий
Кремнийорганический лак К-44	70	3,0	0,007	-60	+200	200	Пропитка обмоток, работающих в тропиках
Церезинозокерит	25	2,2	0,0003	-40	+50	-	Пропитка высокочастотных обмоток
Компаунд КГСМ	21	3,7	0,02	-60	+120	60-120	Пропитка и заливка катушек
Компаунд МКБ-1	25	3,5	0,027	-60	+120	70-130	То же

Для пропитки, заливки и обволакивания применяют лаки, масла и наполнители. Лаки могут быть масляными, смоляными и масляно-смоляными.

Для масляных лаков применяют высыхающие масла (льняное, тунговое). Смоляные лаки содержат смолу вместе с растворителем, который при сушке катушек испаряется и в образовавшейся пленке лака получаются поры, через которые может проникать влага. Для устранения пор обмотку подвергают повторной пропитке или лакировке.

К наполнителям относятся вещества, которые при пропитке расплавляются и с остыванием затвердевают. Такие вещества могут использоваться для пропитки, заливки и обволакивания с образованием на поверхности катушек сплошной пленки.

В смесь компонентов, кроме основных пропиточных материалов, вводят наполнитель в виде кварцевого песка, слюдяной муки и других материалов, а с целью ускорения процесса полимеризации добавляют ускорители и отвердители.

Технология пропитки обмоток

Перед пропиткой обмотки подвергают просушиванию для удаления из них влаги. Эту операцию производят в сушильных электрических шкафах или в сушильных вакуумных устройствах.

Пропитку при нормальном давлении производят в открытых баках с подогревом и без подогрева пропиточного состава. Предварительно просушенные обмотки погружают в пропиточный материал,

где их выдерживают в погруженном состоянии до прекращения выделения пузырьков воздуха, указывающего на проникновение пропиточного состава в обмотку. После этого тару с обмотками вынимают из пропиточного материала и подвешивают для стекания излишков пропиточного состава.

Пропитку в вакууме проводят в специальных установках. При пропитке обмоток вязкими материалами вакуумную пропитку чередуют с пропиткой под давлением. Чередование прикладываемого давления и разрежения способствует лучшему проникновению вязкого материала в поры и капилляры обмотки.

Обволакивание обмоток проводят в открытых ваннах с разогретым пропиточным материалом, в который их погружают на 1–2 с. На их поверхности образуется слой, толщина которого зависит от разности температур обмотки и обволакивающего материала. Для обволакивания применяют различные компаунды, воскообразные материалы и смолы.

Контроль пропитанных обмоток

Все пропитанные обмотки проверяют на соответствие их техническим условиям. Их подвергают внешнему осмотру на отсутствие дефектов, после чего контролируют электрические, механические и климатические параметры, согласно техническим условиям.

В процессе электрических испытаний выполняют проверку на обрыв и короткое замыкание витков, определяют сопротивление изоляции и диэлектрических потерь.

В ходе климатических испытаний проверяют устойчивость диэлектрических параметров при изменении окружающей среды, а также отсутствие размягчения при высоких температурах и трещин при низких.

При механических испытаниях проверяют прочность, эластичность и стойкость к вибрациям и тряске.

Описание экспериментальных установок

Обмотки (катушки) после намотки и изоляции подвергают проверке в соответствии с данными чертежей и технических условий.

В состав технического контроля входят внешний осмотр, проверка прочности крепления выводных концов, измерение активного сопротивления обмоток, проверка на отсутствие короткозамкнутых витков и определение числа витков обмоток.

Проверку на короткозамкнутые витки выполняют на установке, внешний вид которой представлен на рис. 15.14.

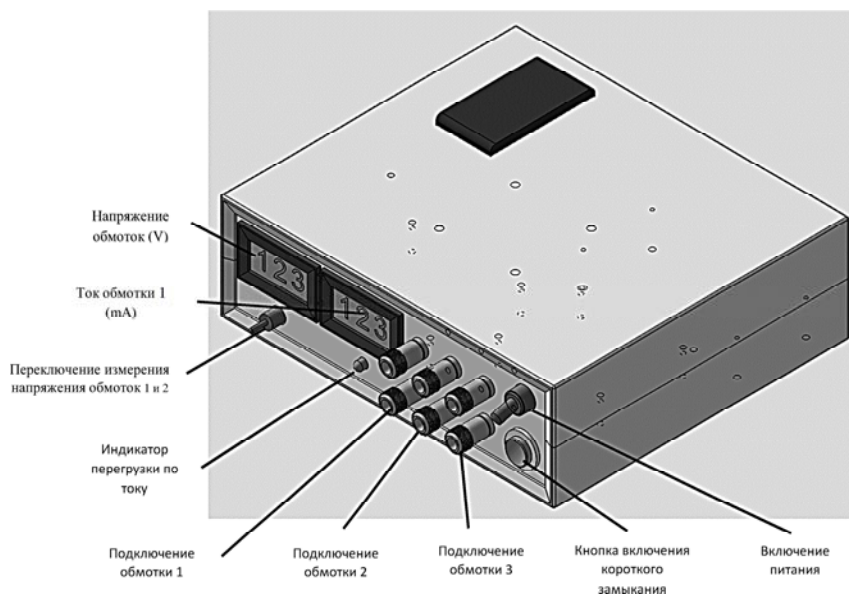


Рис. 15.14. Внешний вид лабораторной установки

Установка содержит генератор звуковой частоты и схемы для измерения напряжения на обмотках и тока через проверяемую обмотку. В состав установки также входит эталонная катушка, намотанная на кольцевой сердечник.

Блок-схема установки для проверки катушек трансформатора приведена на рис. 15.15.

Установка позволяет проверить катушку трансформатора на короткое замыкание, а также рассчитать число витков обмотки по уравнению (15.1) зная напряжение на первичной обмотке, напряжение на вторичной обмотке и число витков вторичной обмотки.

Для проверки влияния короткозамкнутого витка на свойства катушки необязательно замыкать виток на самой катушке. Учитывая сильную магнитную связь через кольцевой сердечник достаточно просто устроить замкнутый виток вокруг кольцевого сердечника, что и используется в данной установке для демонстрации влияния

короткозамкнутого витка на свойства катушки. При наличии замкнутого витка ток эталонной катушки возрастает в несколько раз.

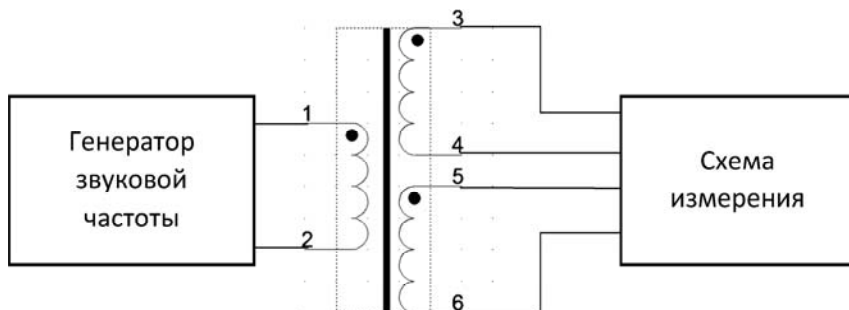


Рис. 15.15. Блок-схема установки для проверки катушек трансформатора

Порядок выполнения работы

1. Намотать тестовую обмотку 2 (пять витков) на кольцевой сердечник (рис. 15.16).

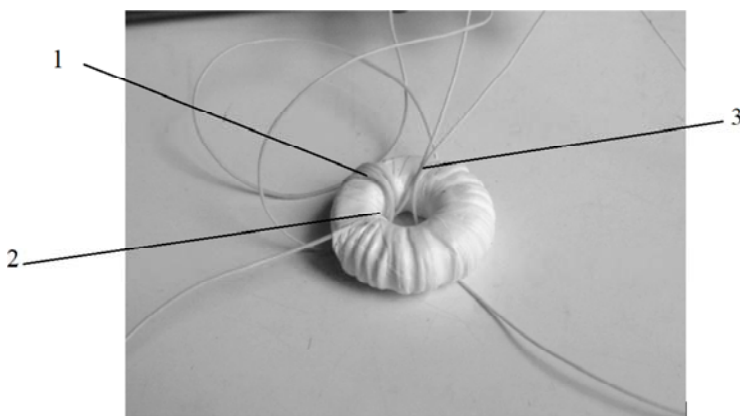


Рис. 15.16. Фотография катушки с намотанными обмотками

2. Намотать обмотку 3 – один виток (достаточно продеть провод через кольцо) (рис. 15.16).

3. Подключить обмотки 1, 2 и 3 к соответствующим клеммам стенда (рис. 15.17).

4. Включить стенд.
5. Перевести тумблер «Переключение обмоток» в положение обмотка 1.
6. Записать показания вольтметра.
7. Перевести тумблер «Переключение обмоток» в положение обмотка 2.
8. Записать показания вольтметра.

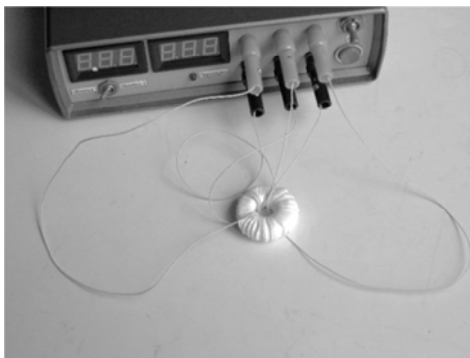


Рис. 15.17. Фотография подключения обмоток к соответствующим клеммам стенда

9. Рассчитать число витков обмотки 1 пользуясь формулой (15.2). Результат округлить до целого числа.
10. Записать показания миллиамперметра (ток холостого хода обмотки 1).
11. Нажать кнопку включения короткого замыкания (не более 5 секунд) и считать показания миллиамперметра при коротком замыкании витка катушки.
12. Записать показания миллиамперметра при коротком замыкании.
13. Рассчитать кратность возрастания тока холостого хода при замыкании одного витка катушки 3.

Пример расчета:

$U_{обм1} = 7,5В$ – напряжение обмотки 1;

$U_{обм2} = 1,5В$ – напряжение обмотки 2;

$W_{обм2} = 5$ – количество витков обмотки 2;

$I_{xx} = 34$ мА – ток холостого хода обмотки 1;

$I_{кз} = 200$ мА – ток короткого замыкания обмотки 1.

Расчет:

– исходное уравнение

$$\frac{U_{\text{обм1}}}{U_{\text{обм2}}} = \frac{W_{\text{обм1}}}{W_{\text{обм2}}}; \quad (15.1)$$

– количество витков обмотки I :

$$U_{\text{обм1}} = \frac{U_{\text{обм1}} W_{\text{обм1}}}{U_{\text{обм2}}}; \quad (15.2)$$

– кратность возрастания тока обмотки 1 при короткозамкнутом витке:

$$V_{\text{и}} = \frac{h}{T_0}. \quad (15.3)$$

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Инструменты и принадлежности к работе.
3. Теоретическая часть.
4. Практическая часть.
- 4.1. Результаты проверки обмотки на короткозамкнутые витки.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Классификация и конструктивные исполнения обмоток.
2. Какие провода применяют для катушек в зависимости от конструкции?
3. Пояснить кинематику станка для рядовой намотки.
4. Пояснить кинематику станка для универсальной намотки.
5. Пояснить кинематику станка для тороидальной намотки.
6. Как осуществляется технический контроль обмоток?

7. Какие применяют способы защиты обмоток для предотвращения проникновения влаги?

8. Пояснить установку для проверки катушки на короткозамкнутые витки.

Литература

1. Зайцев, И. В. Технология электроаппаратостроения. – М. : Высшая школа, 1982.

2. Гаврилов, А. И. Технология авиационного электрооборудования. – М. : Оборонгиз, 1963.

3. Серебrenицкий, Г. П., Чехов, В. Н. Механизация и автоматизация намоточных работ в электроприборостроении. – М. : Энергия, 1965.

Учебное издание

КИСЕЛЁВ Михаил Григорьевич
ГАБЕЦ Вячеслав Леонидович
СТЕПАНЕНКО Дмитрий Александрович и др.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА
ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО
НАЗНАЧЕНИЯ**

Пособие
для студентов специальности 1-38 02 02 «Биотехнические
и медицинские аппараты и системы»

Редактор *Е. И. Бенищевич*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 13.07.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 23,60. Уч.-изд. л. 18,45. Тираж 100. Заказ 810.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.