

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК  
2020

УДК 621.9.048.4(075.8)  
О-753

Коллектив авторов:

*Х.М. Рахимьянов, В.П. Гилета,  
Н.П. Гаар, Ю.С. Семенова, А.А. Локтионов  
А.Х. Рахимьянов, К.Х. Рахимьянов*

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *М.С. Галай*  
канд. техн. наук, доцент *А.И. Попелюх*

Работа подготовлена на кафедре технологии машиностроения  
для студентов МТФ всех форм обучения

О-753     **Основы электрофизических методов обработки:** учебное  
пособие / коллектив авторов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ,  
2020. – 179 с.

ISBN 978-5-7782-4115-2

Пособие посвящено теоретическим аспектам таких электрофизических методов обработки труднообрабатываемых материалов, как ультразвуковая, эрозионная, плазменная и лазерная. Особое внимание уделено механизмам удаления материала и факторам, влияющим на производительность процесса.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 15.03.05 «Конструкторско-техническое обеспечение машиностроительных производств» и 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

УДК 621.9.048.4(075.8)

ISBN 978-5-7782-4115-2

© Коллектив авторов, 2020  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                  | 6  |
| 1. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА .....                                               | 7  |
| 1.1. Основные элементы системы ультразвуковой обработки .....                   | 7  |
| 1.1.1. Колебательные системы .....                                              | 8  |
| 1.1.2. Преобразователи .....                                                    | 8  |
| 1.1.3. Волноводы .....                                                          | 9  |
| 1.1.4. Абразивная суспензия .....                                               | 11 |
| 1.2. Процесс удаления материала .....                                           | 11 |
| 1.3. Факторы, влияющие на скорость удаления материала .....                     | 14 |
| 1.4. Точность размеров и качество поверхности после обработки .....             | 15 |
| 1.5. Область применения ультразвуковой обработки .....                          | 17 |
| Библиографический список .....                                                  | 20 |
| 1.6. Паспортизация станка для ультразвуковой размерной обработки .....          | 21 |
| 2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС .....                                        | 51 |
| 2.1. Общая характеристика процесса .....                                        | 51 |
| 2.2. Параметры режимов ультразвуковой сварки пластмасс .....                    | 52 |
| 2.3. Подвод механической энергии к свариваемому изделию .....                   | 56 |
| 2.4. Передача энергии к зоне сварки .....                                       | 57 |
| 2.5. Концентрация энергии в зоне сварки .....                                   | 58 |
| 2.6. Дозирование вводимой энергии .....                                         | 59 |
| 2.7. Взаимное перемещение сварочного инструмента и свариваемых<br>деталей ..... | 60 |
| 2.8. Предварительный контроль материалов и изделий после сварки .....           | 60 |
| Библиографический список .....                                                  | 62 |
| 2.9. Ультразвуковая сварка пластмасс .....                                      | 62 |

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА .....                                                                                                                         | 67  |
| 3.1. Механизм удаления материала .....                                                                                                                       | 68  |
| 3.2. Основные элементы системы электроэрозионной обработки .....                                                                                             | 73  |
| 3.3. Electroды при ЭЭО .....                                                                                                                                 | 74  |
| 3.4. Диэлектрические жидкости.....                                                                                                                           | 76  |
| 3.5. Скорость съема материала .....                                                                                                                          | 78  |
| 3.6. Шероховатость поверхности.....                                                                                                                          | 80  |
| 3.7. Поверхностный слой детали после ЭЭО.....                                                                                                                | 80  |
| 3.8. Область применения .....                                                                                                                                | 82  |
| Библиографический список .....                                                                                                                               | 87  |
| 3.9. Исследование производительности, шероховатости поверхности<br>после отработки и износа электрода-инструмента при электроэро-<br>зионной обработке ..... | 87  |
| 4. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА .....                                                                                                                                  | 97  |
| 4.1. Основные элементы системы лазерной обработки.....                                                                                                       | 98  |
| 4.2. Механизм удаления материала .....                                                                                                                       | 99  |
| 4.3. Область применения .....                                                                                                                                | 102 |
| 4.3.1. Лазерная обработка отверстий .....                                                                                                                    | 102 |
| 4.3.2. Лазерная резка .....                                                                                                                                  | 105 |
| 4.3.3. Лазерная маркировка и гравировка .....                                                                                                                | 106 |
| Библиографический список .....                                                                                                                               | 108 |
| 4.4. Паспортизация установки лазерной маркировки МЛ2-1 .....                                                                                                 | 108 |
| 5. ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ .....                                                                                                                          | 125 |
| 5.1. Характеристика процесса ЭАШ.....                                                                                                                        | 125 |
| 5.2. Требования к электролиту.....                                                                                                                           | 126 |
| 5.3. Гидродинамика электролита .....                                                                                                                         | 127 |
| 5.4. Рабочий зазор .....                                                                                                                                     | 128 |
| 5.5. Разрушение обрабатываемого материала. Режимы обработки.....                                                                                             | 129 |
| 5.6. Производительность ЭАШ.....                                                                                                                             | 130 |
| 5.7. Применение электроалмазного шлифования.....                                                                                                             | 131 |
| 5.8. Оборудование для ЭАШ.....                                                                                                                               | 134 |
| Библиографический список .....                                                                                                                               | 135 |
| 5.9. Исследование производительности процесса электроалмазного<br>шлифования .....                                                                           | 136 |

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6. ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА .....                                                      | 139 |
| 6.1. Основные характеристики процесса плазменной резки металлов .....              | 139 |
| 6.2. Технологические режимы плазменно-дуговой резки .....                          | 143 |
| 6.3. Тонкоструйная плазменная резка металлических материалов .....                 | 146 |
| 6.3.1. Технологическое оборудование для тонкоструйной<br>плазменной резки .....    | 148 |
| 6.3.2. Тонкоструйная плазменная резка однородных металлических<br>материалов ..... | 150 |
| 6.3.3. Тонкоструйная плазменная резка биметаллических композиций .....             | 152 |
| Библиографический список .....                                                     | 158 |
| 6.4. Паспортизация машины термической резки «ППЛ Термит» .....                     | 159 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Разнообразие электрофизических методов обработки материалов, а также их комплектность затрудняет единую классификацию по какому-либо отдельному признаку, однозначно определяющему место каждого метода в ряду других и их взаимосвязь.

Наиболее признана упрощенная классификация электрофизических методов обработки по характеру действия электрического тока, являющегося основным видом энергии, на предмет обработки.

К методам обработки, при которых удаление материала происходит за счет механического воздействия, относятся ультразвуковая и гидроабразивная; за счет теплового воздействия – плазменная, электронно-лучевая, лазерная, электроэрозионная обработка; за счет химического и электрохимического воздействия – электрохимическая размерная обработка, электрохимическое полирование, анодирование; за счет комбинированного воздействия – анодно-механическая, лазерно-электрохимическая обработка и электроалмазное шлифование.

В настоящей работе подробно рассмотрены пять методов обработки: ультразвуковая, электроэрозионная, лазерная, плазменная и электроалмазное шлифование.

# 1. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Принцип ультразвуковой обработки (УЗО) твердых и хрупких материалов состоит в создании высокой скорости направленного износа или скалывания частиц обрабатываемого материала под влиянием вибрирующего с ультразвуковой частотой инструмента и непрерывно подаваемого в зону обработки абразивного материала (рис. 1.1).

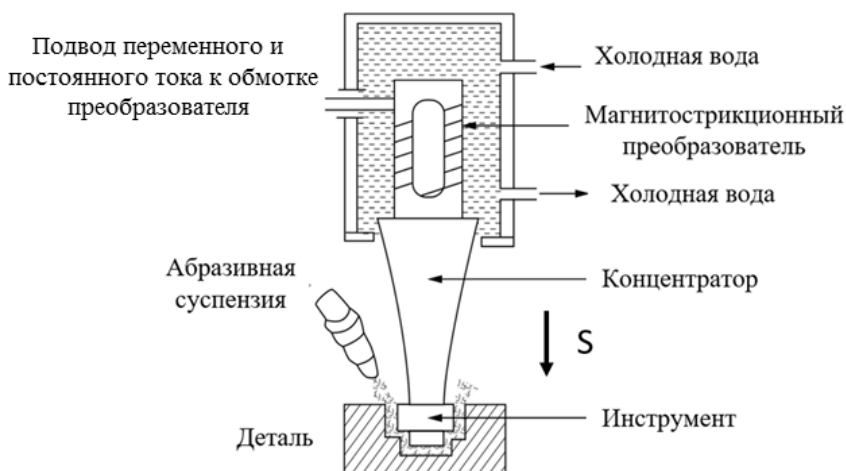


Рис. 1.1. Основные элементы системы ультразвуковой обработки

В рабочую зону, т. е. в пространство между торцом инструмента и обрабатываемой деталью, подается водная суспензия абразивного

порошка карбида кремния ( $\text{SiC}$ ) или карбида бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ). Инструмент совершает продольные колебания с ультразвуковой частотой  $f = 16 \dots 30$  кГц и небольшой амплитудой  $A = 0,02 \dots 0,06$  мм. В процессе колебаний торцовая поверхность инструмента ударяет по абразивным зернам, которые скалывают с обрабатываемой поверхности микрочастицы. Большое количество одновременно ударяющихся о поверхность абразивных зерен обуславливает интенсивный съем с нее материала. Если инструменту сообщить движение подачи  $S$  в направлении колебания его торца, то в детали будет образовываться полость, по форме соответствующая поперечному профилю инструмента.

### **1.1.1. Колебательные системы**

При обработке хрупких материалов используются ультразвуковые колебательные системы, которые работают в режиме продольных колебаний. Основные элементы такой системы показаны на рис. 1.1. Она включает в себя преобразователь, концентратор-волновод, инструмент.

В преобразователе (активном элементе колебательной системы) создается знакопеременная механическая сила. Концентратор-волновод трансформирует перемещение и скорость фронта упругой волны и согласует механическое сопротивление внешней нагрузки и внутреннее сопротивление активного элемента. Инструмент создает ультразвуковое поле в рабочей среде и непосредственно воздействует на абразивные частицы.

Колебательная система с корпусом и устройствами охлаждения, токоподвода, выверки, перемещения, вращения чаще всего выполняется в виде отдельного узла.

### **1.1.2. Преобразователи**

В качестве активных элементов колебательных систем используют пьезоэлектрические или магнитострикционные преобразователи.

*Пьезоэлектрический преобразователь.* Его действие основано на пьезоэлектрическом эффекте – возникновении электрической поляризации под действием механических напряжений или возникновении деформации под действием электрического поля в некоторых анизотропных диэлектриках или полупроводниках. Наиболее распространенными материалами для изготовления пьезоэлектрических преобразователей являются керамики на основе цирконата титаната свинца

(ЦТС-19, ЦТС-22), обладающие большим пьезоэлектрическим эффектом и имеющие достаточно низкие потери. Из-за плохой теплопроводности пьезоэлектрические преобразователи с рабочей частотой 18...44 кГц выполняют составными. Активные элементы (диски) зажимают между двумя частотопонижающими накладками. Такая конструкция позволяет снизить напряжение возбуждения преобразователя и эксплуатировать его при воздушном охлаждении.

Недостатками преобразователей, изготовленных с использованием керамики ЦТС, являются небольшая удельная мощность (0,2...0,5 Вт/см<sup>2</sup>) и низкое значение допустимых амплитуд колебаний.

*Магнитострикционный преобразователь.* В основе магнитострикционного преобразователя, используемого при УЗО, лежит магнитострикционный эффект, заключающийся в том, что ферромагнитное тело при намагничивании изменяет свои геометрические размеры, т. е. деформируется. В ферромагнетике возможны два вида магнитострикции: линейная, при которой происходят геометрические изменения размеров тела в направлении приложения поля, и объемная, при которой геометрические размеры тела изменяются во всех направлениях. В магнитострикционных преобразователях используется линейная магнитострикция.

Магнитострикционный эффект у различных металлов и сплавов различен. Высокой магнитострикцией обладает никель, пермендюр и феррит.

Пакет магнитострикционного преобразователя представляет собой сердечник из тонких пластин, на котором размещена электрическая обмотка возбуждения.

### 1.1.3. Волноводы

*Концентратор (волновод).* Амплитуда колебаний, получаемая на торце магнитострикционных преобразователей, обычно составляет от 1...4 мкм и мала для эффективной обработки хрупких материалов. При обработке амплитуда колебаний инструмента должна составлять 20...50 мкм. Для получения требуемых амплитуд в рабочей зоне к торцу преобразователя припаивается или присоединяется механически концентратор (волновод), на котором монтируется сменный инструмент. Длина стержневой волноводной системы, присоединяемой к преобразователю, должна быть кратна половине длины волны упругих колебаний в материале волновода на резонансной (рабочей) частоте (рис. 1.2).

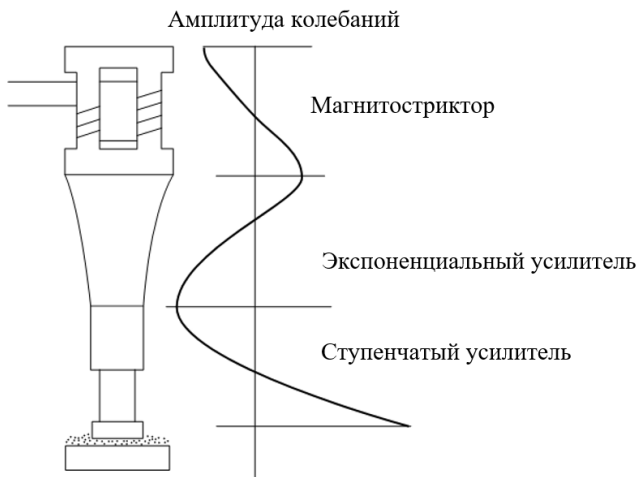


Рис. 1.2. Двухступенчатое усиление в концентраторе

При создании универсального оборудования для обработки хрупких материалов стержневой волновод выполняется комбинированным из нескольких звеньев, соединяемых механически (чаще всего используют резьбовое соединение). Такое техническое решение позволяет получать различные амплитуды колебаний инструмента за счет использования сменных волноводов различной формы. В настоящее время наиболее широко применяются сменные волноводы, у которых закон изменения поперечного сечения линейный (конические), экспоненциальный, катеноидальный, ступенчатый.

*Инструменты.* Наконечники инструмента (рабочая часть) должны иметь высокие износостойкость и усталостную прочность. Наибольшей износостойкостью при обработке керамики (HRA91) обладают инструменты из твердого сплава (BK8) и закаленной стали (У8, У9, У10). Закаленный инструмент применяют главным образом при черновой обработке. При чистовой обработке используют инструменты, выполненные из материалов меньшей твердости. Хорошей износостойкостью обладают инструменты из быстрорежущих сталей, сталей 40Х, 45, 50. Алюминий и его сплавы, латунь уступают по износостойкости сталям.

При УЗО инструмент подается к заготовке и удерживается на ней посредством статического давления, которое должно преодолевать сопротивление резанию на границе раздела инструмента и заготовки.

### 1.1.4. Абразивная суспензия

Абразивная суспензия обычно состоит из 25...50 % (по объему) мелких абразивных зерен (зернистость 100...800) карбида бора ( $B_4C$ ), оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) или карбида кремния ( $SiC$ ) и воды. Абразивная суспензия циркулирует между колеблющимся инструментом и заготовкой.

Разрушение обрабатываемого материала при УЗО происходит в основном в результате ударного воздействия инструмента по абразивным частицам, которые выкалывают небольшие частицы материала заготовки. Суспензия прокачивается через форсунку, расположенную рядом с заготовкой, со скоростью 25 л/мин. На рис. 1.3 показаны различные схемы подачи суспензии.

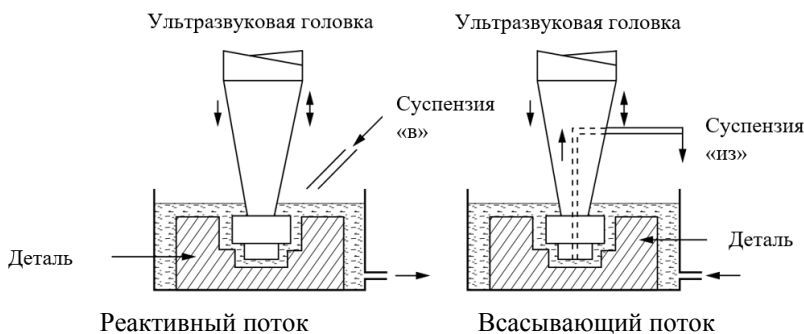


Рис. 1.3. Схемы подачи суспензии в зону обработки

По мере обработки суспензия становится менее эффективной из-за износа и разрушения ее частиц. Срок ее службы составляет от 150 до 200 ч ультразвукового воздействия. Суспензия непрерывно подается в зону обработки для осуществления эффективной очистки от продуктов обработки и поддержания охлаждения инструмента во время обработки.

## 1.2. ПРОЦЕСС УДАЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Механизм удаления материала при УЗО включает в себя три различных действия (рис. 1.4).

1. Механическое отделение материала заготовки в результате микровыколов, происходящих при воздействии абразивных частиц, находящихся между вибрирующим инструментом и обрабатываемой поверхностью.



Рис. 1.4. Механизмы удаления материала при УЗО

2. Микронадрезы в результате свободного воздействия частиц, которые летят через зазор и ударяются о заготовку в случайных местах.

3. Эрозия рабочей поверхности за счет кавитации пузырьков в потоке абразивной суспензии (кавитационная эрозия).

В случае твердых и хрупких материалов, таких как стекло, скорость обработки высока, и наибольшую роль играет свободный удар при обработке пористых материалов, таких как графит, — механизм кавитационной эрозии.

Скорость удаления материала при УЗО зависит, прежде всего, от частоты колебания инструмента, статического давления, размера обрабатываемой области, а также абразивного материала и материала заготовки.

Материал заготовки в значительной степени определяет характер его разрушения. Все материалы по характеру его разрушения при УЗО разделены на группы. В основе деления лежит критерий хрупкости  $t_x$  (отношение сопротивления сдвигу к временному сопротивлению на разрыв).

Первая группа  $t_x > 2$  — стекло, кварц, керамика, германит, ферриты. При УЗО они практически не подвергаются пластической деформации.

Вторая группа  $1 < t_x < 2$  — твердые сплавы, закаленные, цементированные и азотированные стали, сплавы титана и вольфрама. При УЗО наряду с упругими деформациями происходят и микропластические деформации. При этом чем большую роль играют пластические деформации, тем хуже обрабатываемость.

Третья группа  $t_x \leq 2$  — почти вся работа абразивных зерен расходуется на микропластическую деформацию поверхностных слоев, разрушения материала почти не наблюдается. Их нецелесообразно подвергать УЗО.

Оценка относительной обрабатываемости для некоторых материалов при использовании УЗО представлена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Оценка относительной обрабатываемости для некоторых материалов при использовании УЗО**

| Обрабатываемый материал | Относительная скорость удаления, % |
|-------------------------|------------------------------------|
| Стекло                  | 100                                |
| Латунь                  | 66                                 |
| Вольфрам                | 4,8                                |
| Титан                   | 4,0                                |
| Сталь                   | 3,9                                |
| Хромированная сталь     | 1,4                                |

На рис. 1.5 обобщены важные параметры, влияющие на производительность УЗО, которые в основном относятся к инструменту, материалу детали, абразивам, режимам обработки и ультразвуковому оборудованию.



Рис. 1.5. Факторы, влияющие на производительность УЗО

### 1.3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ УДАЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

При использовании УЗО скорость удаления материала ( $v_{уд}$ ) условно можно описать с помощью следующей формулы:

$$v_{уд} = 5,9 f \left( \frac{S}{H_0} \right) R^{0,5} A^{0,5},$$

где  $f$  – частота колебаний, кГц;  $S$  – статическое давление инструмента (подача), кг/мм<sup>2</sup>;  $H_0$  – твердость по Бринеллю ( $HB$ );  $R$  – средний радиус абразивных зерен, мм;  $A$  – амплитуда колебаний инструмента, мм.

*Амплитуда колебания инструмента.* На скорость удаления из всех переменных процесса наибольшее влияние оказывает амплитуда колебаний инструмента. Скорость удаления материала увеличивается с ростом амплитуды. Амплитуда колебаний определяет скорость абразивных частиц на границе раздела инструмента и заготовки. Кинетическая энергия увеличивается при больших амплитудах, что усиливает механическое отделение материала и, следовательно, увеличивает скорость обработки. Чрезмерно большая амплитуда колебаний приводит к уменьшению количества абразивных частиц, находящихся под торцом инструмента, и к снижению скорости удаления материала. Значение амплитуды колебаний должно находиться в пределах от 0,04 до 0,08 мм.

*Размер абразивного зерна.* Как амплитуда колебаний, так и размер зерна оказывают одинаковое влияние на скорость удаления. Скорость удаления материала увеличивается с ростом размера зерна, пока он не становится соразмерным величине удвоенного значения амплитуды колебаний, так как при этом в рабочем зазоре возникает проблема обновления абразивных зерен.

*Жидкость в абразивной суспензии.* Обычно в качестве абразивной жидкости для абразивной суспензии используется вода. Альтернативными вариантами являются бензол, глицерин и масла. Следует учесть, что увеличение вязкости суспензии снижает скорость удаления материала. При повышении концентрации абразива до определенного значения наблюдается рост производительности, что объясняется увеличением количества зерен под инструментом.

На практике объемная концентрация абразивов составляет от 25 до 50 %. Во время обработки происходит изменение концентрации в результате осаждения абразива на столе станка, поэтому фактическую концентрацию следует проверять через определенные промежутки времени.

*Ударная вязкость материала заготовки.* На скорость обработки влияет отношение твердости инструмента к твердости заготовки. Чем больше это отношение, тем ниже будет скорость удаления материала. По этой причине для инструментов при УЗО рекомендуются мягкие и прочные материалы.

*Форма инструмента.* Скорость обработки зависит от формы и площади инструмента. Увеличение площади инструмента снижает скорость обработки из-за проблемы равномерного распределения абразивной суспензии по всей зоне обработки. Для одной и той же области обработки узкая прямоугольная поперечная форма инструмента дает более высокую скорость обработки, чем квадратная.

*Статическое давление.* При росте статического давления (подачи) сначала наблюдается увеличение скорости съема материала до определенного (оптимального) значения, а затем имеет место снижение производительности обработки. Причиной этого является нарушение колебательного поведения инструмента при увеличении силы подачи.

При давлениях ниже оптимальных сила, прижимающая зерна к материалу, слишком мала, а следовательно, объем, удаляемый конкретным зерном, мал. При больших силах подачи прижатие слишком сильное и инструмент перестает отрываться от зерен, что ведет к ухудшению циркуляции абразива и снижению скорости удаления материала. Ухудшение смены абразивных частиц в зоне обработки также наблюдается и по мере продвижения инструмента в глубь материала.

## **1.4. ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ**

Как правило, точность формы обрабатываемых деталей определяется следующими факторами, которые вызывают увеличение размера, конусность и округлость:

- боковой износ инструмента;
- износ абразивного материала;
- погрешность подачи;

- неточность формы инструмента;
- нестабильная и неравномерная подача абразивной суспензии в зону обработки.

*Увеличение диаметра отверстия.* Точность выполнения размера определяется по разнице между заложенным размером и действительным, полученным после обработки. Увеличение размера отверстия определяется как разница между диаметром отверстия, измеренным в верхней части полученного отверстия, и диаметром инструмента. Боковой зазор между инструментом и обрабатываемым отверстием необходим для того, чтобы частицы абразива могли перемещаться в зону обработки под колеблющимся инструментом. Следовательно, размер зерен абразива является основным фактором, который влияет на величину бокового зазора. Считается, что боковой зазор примерно в два-четыре раза превышает средний размер зерна при обработке стекла и карбида вольфрама. Это примерно в три раза больше, чем средний размер зерна  $W_4C$  (зернистость 280...600). Однако величина бокового зазора зависит и от некоторых других переменных процесса, включая тип материала заготовки и метод подачи инструмента. В целом точность УЗО составляет величину до  $\pm 0,05$  мм.

*Конусность.* Увеличение диаметра отверстия на входе происходит из-за усиления эффекта истирания свежими и острыми частицами абразива поверхности детали. В результате такого эффекта, например, при сверлении отверстия диаметром 20 мм на глубину 10 мм в графите возникает конусность отверстия примерно  $0,2^\circ$ .

Конусность полученного отверстия может быть уменьшена за счет:

- прямого впрыска абразивной суспензии в зону обработки;
- использования инструментов, имеющих отрицательно сужающиеся стенки;
- применения высокого статического давления, которое допускает использование более мелкого абразива, что, в свою очередь, уменьшает степень износа инструмента и в результате получаемую конусность;
- использования инструмента меньшего размера при первой обработке и финального инструмента необходимого размера.

*Отклонение от округлости.* Отклонение от округлости появляется по причине боковых вибраций инструмента. Такие вибрации могут возникать из-за неперпендикулярности поверхности инструмента и центральной линии инструмента, а также из-за смещения акустических частей станка. Отклонение от округлости для стекла и графита составляет примерно от 40 до 140 мкм и от 20 до 60 мкм соответственно.

*Качество поверхности.* Качество поверхности после обработки тесно связано со скоростью обработки при УЗО. В табл. 1.2 показана взаимосвязь между шероховатостью поверхности и размером зерна. Чем больше зернистость, тем больше производительность, но тем грубее шероховатость поверхности.

Таблица 1.2

**Количество зерен, размер зерен и шероховатость поверхности при УЗО**

| Зернистость | Размер зерна, мм | Шероховатость $Ra$ , мкм |
|-------------|------------------|--------------------------|
| 180         | 0,086            | 0,55                     |
| 240         | 0,050            | 0,51                     |
| 320         | 0,040            | 0,45                     |
| 400         | 0,030            | 0,40                     |
| 600         | 0,014            | 0,28                     |
| 800         | 0,009            | 0,21                     |

Другие факторы, такие как конфигурация поверхности инструмента, амплитуда колебаний инструмента и обрабатываемый материал, также влияют на шероховатость поверхности. Чем больше зернистость (меньше размер зерна), тем более гладкой становится полученная поверхность. При увеличении амплитуды отдельные зерна вдавливаются в поверхность заготовки, что приводит к образованию более глубоких кратеров и, следовательно, к более грубой шероховатости поверхности. Другие переменные процесса, такие как статическое давление, мало влияют на качество поверхности.

Шероховатость поверхности боковых стенок полостей значительно больше, чем у дна. Это происходит из-за того, что боковые стенки поцарапаны зернами, входящими и выходящими из зоны обработки. Кроме того, увеличение шероховатости происходит по мере заглубления инструмента в заготовку. При таких обстоятельствах смена суспензии происходит труднее, и, таким образом, получается более грубая поверхность.

## **1.5. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ**

Областью применения УЗО является обработка мелких полостей, вырезанных из твердых и хрупких материалов с площадью поверхности менее 1000 мм<sup>2</sup>.

*Сверление и кольцевое сверление.* Модифицированная версия УЗО показана на рис. 1.6, где инструмент вращается относительно заготовки аналогично, как и при обычном сверлении. Этот процесс называется роторно-ультразвуковой обработкой. Он используется для обработки неметаллических материалов, таких как стекло, керамика, феррит, кварц, оксид циркония, рубин, сапфир, оксид бериллия, и некоторых композитных материалов.

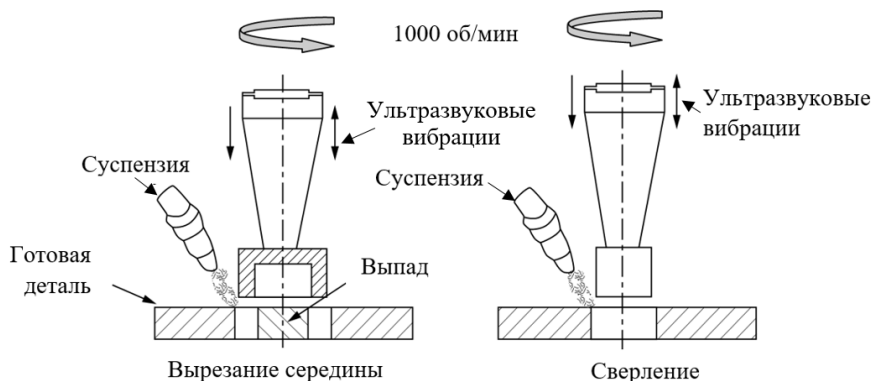


Рис. 1.6. Роторно-ультразвуковая обработка

Роторно-ультразвуковая обработка обеспечивает высокую скорость удаления, снижение давления инструмента для обработки нежестких деталей, улучшенное сверление глубоких отверстий, получение сквозных отверстий при отсутствии заклинивания инструмента во время кольцевого сверления.

Этот процесс делает возможным непрерывное сверление отверстий малого диаметра, в то время как обычное сверление требует периодического отвода инструмента, что увеличивает время обработки. Скорость обработки зависит от диаметра отверстия и его глубины. Маленькие отверстия требуют больше времени, так как скорость обработки уменьшается с глубиной проникновения из-за сложности поддержания постоянной подачи новой суспензии под поверхность инструмента.

*Ультразвуковая фасонная обработка и обработка по программе.* Во время продвижения инструмента при УЗО удаление материала становится затрудненным, когда глубина обработки превышает 5...7 мм или когда контур инструмента имеет фасонную поверхность. В таких

условиях удаление абразивных частиц с поверхности детали становится затруднительным и, следовательно, процесс удаления материала также усложняется. Кроме того, изготовление такого инструмента обычно является сложным и дорогостоящим. В таком случае возможно использование инструмента,двигающегося по заданной траектории (рис. 1.7).

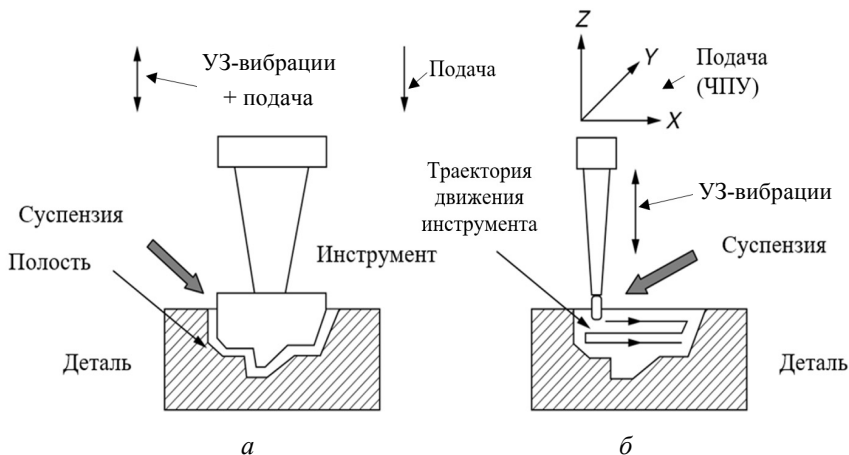


Рис. 1.7. Ультразвуковая фасонная и контурная обработка:

*а* – фасонная обработка; *б* – контурная обработка

**Ультразвуковая полировка** – полировка при помощи вибрации инструмента с ультразвуковой частотой и относительно низкой амплитудой вибрации. Мелкие абразивные частицы в суспензии срезают выступы на поверхности заготовки, обычно удаляя 0,012 мм материала или менее. Шероховатость поверхности может достигать всего 0,3 мкм.

**Микроультразвуковая обработка.** Микроультразвуковая обработка – это метод, в котором используются колебания детали. Колебания заготовки позволяют более свободно конструировать систему инструментов, поскольку она не включает в себя набор преобразователя и концентратора. Кроме того, она намного проще и компактнее (рис. 1.8), чем обычная УЗО. С помощью такого метода при использовании микроинструментов из сплава карбида вольфрама (WC) были получены микроотверстия диаметром 5 мкм в кварце, стекле и кремнии.



Рис. 1.8. Микроультразвуковая обработка

Кроме того, УЗО можно использовать:

- для отрезания деталей из полупроводников с более высокими скоростями, чем при использовании традиционных методов обработки;
- гравировки на стекле, а также на закаленной стали;
- разрезания и обработки драгоценных камней, включая алмаз.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марков А. И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А. И. Марков. – Москва : Машиностроение, 1968. – 365 с.
2. Вайншток И. С. Ультразвук и его применение в машиностроении / И. С. Вайншток. – Москва : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1958. – 140 с.
3. Волосатов В. А. Работа на ультразвуковых установках / В. А. Волосатов. – Москва : Высшая школа, 1984. – 192 с.

4. *Донской А. В.* Ультразвуковые электрохнологические установки / А. В. Донской, О. К. Келлер, Г. С. Кратыш. – Ленинград : Энергоиздат : Ленинград. отделение, 1982. – 208 с.

5. *Подураев В. Н.* Физико-химические методы обработки / В. Н. Подураев, В. С. Камалов. – Москва : Машиностроение, 1973. – 346 с.

## **1.6. ПАСПОРТИЗАЦИЯ СТАНКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА**

**Цель работы.** Изучить назначение, технологические возможности станка модели 4772А (рис. 1.9), ознакомиться с конструкцией основных узлов и механизмов, пультом управления, особенностями наладки и настройки станка. Изучить вопросы техники безопасности при работе на станке данной модели.

### **Указания к выполнению**

По паспорту станка и альбому чертежей ознакомиться с назначением, конструкцией основных узлов и механизмов, кинематическими, электрическими и гидравлическими схемами станка (табл. 1.3). Полученные данные закрепить при осуществлении подготовительно-наладочных работ непосредственно на станке модели 4772А (табл. 1.4).

### **Назначение и область применения станка**

Ультразвуковой прошивочный станок модели 4772А повышенной точности предназначен для изготовления и доводки поверхностей твердосплавных матриц, штампов, фильер, а также может быть использован для обработки стекла, германия и других хрупких материалов.

Станок работает по принципу копирования формы инструмента в изделия. На нем могут изготавливаться сквозные отверстия и полости различной конфигурации (рис. 1.10–1.12).

Станок работает от ультразвукового генератора мощностью 1,6 кВт с частотой (22...7,5) кГц.

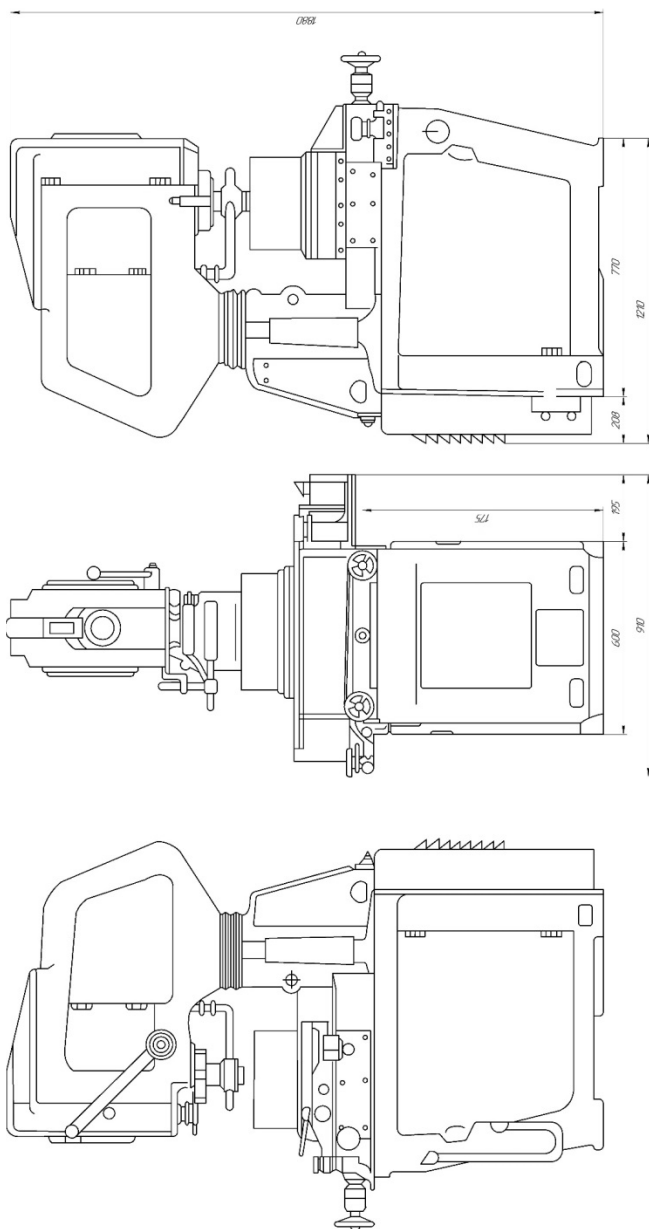


Рис. 1.9. Общий вид станка

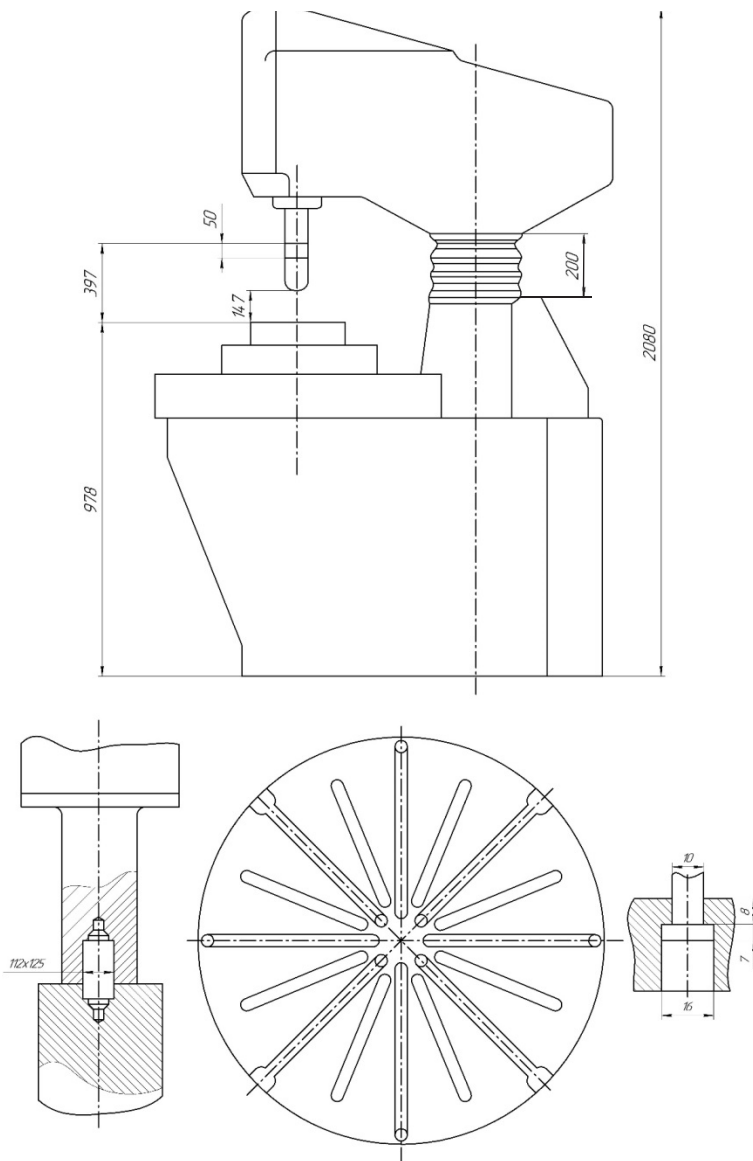


Рис. 1.10. Габариты рабочего пространства и присоединительные базы станка

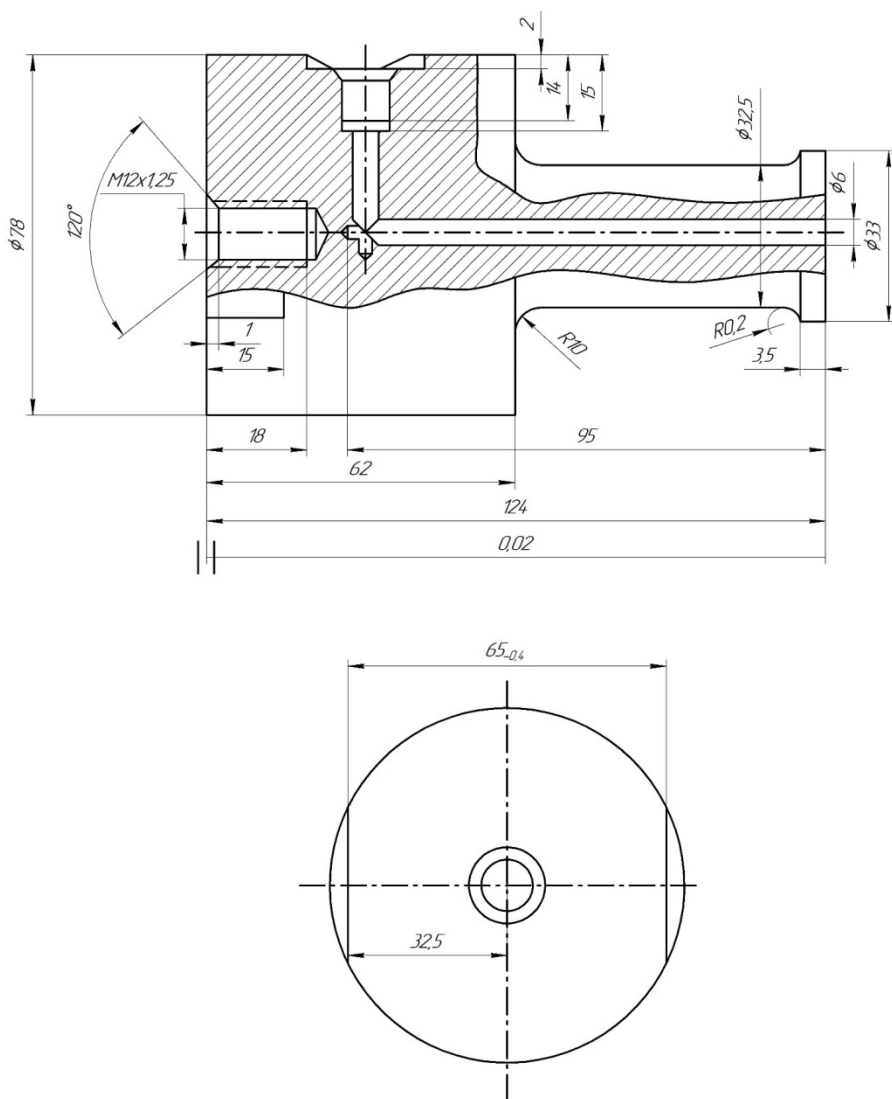


Рис. 1.11. Схема инструмента при подаче абразивной суспензии через инструмент

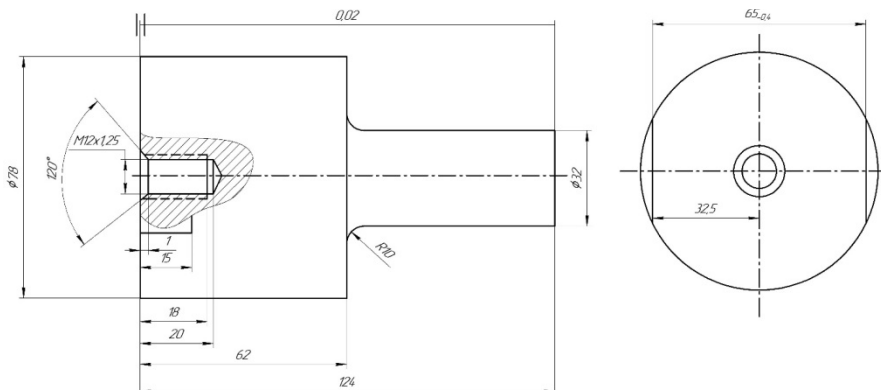


Рис. 1.12. Схема инструмента для контроля согласования генератора с магнитострикционным преобразователем при работе поливом

Таблица 1.3

### Паспорт станка

|                    |                             |
|--------------------|-----------------------------|
| Тип станка         | Ультразвуковой прошивочный  |
| Модель             | 4772А                       |
| Завод-изготовитель | Троицкий станкостроительный |

Таблица 1.4

### Основные данные станка

| № п/п | Наименование параметров                                                  | Данные                                    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1     | Размер стола, мм                                                         | 300                                       |
| 2     | Наибольшие ручные перемещения стола, мм:<br>– продольное<br>– поперечное | 150<br>150                                |
| 3     | Отсчет перемещения по координатам                                        | Лимбы на маховиках, линейка с микроскопом |
| 4     | Точность отсчета по лимбам, мм                                           | 0,02                                      |
| 5     | Точность отсчета по микроскопу, мм                                       | 0,01                                      |
| 6     | Вращение планшайбы стола                                                 | Ручное и механическое на 360°             |

Продолжение табл. 1.4

| №<br>п/п | Наименование параметров                                                                                                                                                               | Данные                                   |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 7        | Отсчет вращения                                                                                                                                                                       | Нониус на планшайбе                      |
| 8        | Точность отсчета                                                                                                                                                                      | 20                                       |
| 9        | Расстояние от рабочей поверхности стола до торца магнистриктора, мм:<br>– наименьшее<br>– наибольшее                                                                                  | 147<br>397                               |
| 10       | Диаметр обрабатываемых отверстий при сплошном инструменте, мм                                                                                                                         | 10...40                                  |
| 11       | Максимальный диаметр обрабатываемых отверстий полым инструментом, мм                                                                                                                  | 80                                       |
| 12       | Оптимальная площадь обработки, мм <sup>2</sup>                                                                                                                                        | 800                                      |
| 13       | Наименьшая глубина обработки, мм                                                                                                                                                      | 40                                       |
| 14       | Наибольшая производительность по стеклу при площади обработки 800 мм (карбид бора № 10), мм/мин:<br>– глубина обработки до 5 мм поливом<br>– глубина обработки до 15 мм под давлением | 1200<br>4000                             |
| 15       | Наибольшая производительность по твердому сплаву при площади обработки 800 мм <sup>2</sup> (карбид бора № 10), мм/мин:<br>– поливом<br>– под давлением                                | 15<br>50                                 |
| 16       | Величина перемещения шпинделя                                                                                                                                                         | 50                                       |
| 17       | Отсчет перемещений шпинделя                                                                                                                                                           | а) линейка<br>б) индикатор часового типа |
| 18       | Точность отсчета, мм:<br>– по линейке<br>– по индикатору                                                                                                                              | 1<br>0,01                                |
| 19       | Управление перемещением шпинделя:<br>– вверх<br>– вниз                                                                                                                                | Ручное<br>Масляный демпфер               |
| 20       | Подвеска шпинделя                                                                                                                                                                     | Коромысло с противовесом                 |
| 21       | Сила давления шпинделя на изделие, кг                                                                                                                                                 | 1...30                                   |
| 22       | Нечувствительность, кг                                                                                                                                                                | ±0,5                                     |
| 23       | Регулирование давления                                                                                                                                                                | Механическое перемещение противовеса     |
| 24       | Перемещение колонны                                                                                                                                                                   | Механическое                             |

Окончание табл. 1.4

| № п/п | Наименование параметров                                                                                                                  | Данные                                               |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 25    | Величина подъема колонны, мм                                                                                                             | 200                                                  |
| 26    | Ограничения перемещения                                                                                                                  | Конечными выключателями                              |
| 27    | Тип пакета магнитострикционного вибратора                                                                                                | Двухстержневой                                       |
| 28    | Сечение пакета, мм                                                                                                                       | 50×50                                                |
| 29    | Материал пакета                                                                                                                          | Пермендюр К50ф2                                      |
| 30    | Охлаждение пакета магнитостриктора                                                                                                       | Водяное                                              |
| 31    | Частота колебаний вибратора, кГц                                                                                                         | 22 + 7,5 %                                           |
| 32    | Крепление вибратора к шпинделю                                                                                                           | Фланцевое                                            |
| 33    | Крепление инструмента к вибратору                                                                                                        | Шпилькой                                             |
| 34    | Выходная мощность, кВт                                                                                                                   | 1,5                                                  |
| 35    | Абразив                                                                                                                                  | Карбид бора                                          |
| 36    | Шероховатость обработанной поверхности, $Ra$ , мкм                                                                                       | До 0,32                                              |
| 37    | Концентрация абразивной суспензии по весовому составу:<br>а) поливом:<br>– вода<br>– абразив<br>б) под давлением:<br>– вода<br>– абразив | 65...70 %<br>30...35 %<br><br>80...85 %<br>15...20 % |
| 38    | Подача абразива в зону обработки                                                                                                         | Диафрагменным насосом                                |
| 39    | Регулирование подачи суспензии в зону обработки:<br>– поливом<br>– под давлением                                                         | Клапаном<br>Редукционным                             |
| 40    | Рабочий объем абразивной суспензии:<br>– для работы поливом<br>– для работы под давлением                                                | 7,5<br>10,5                                          |
| 41    | Габариты станка, мм                                                                                                                      | 1350×1060×2080                                       |
| 42    | Вес собственного станка, кг                                                                                                              | 1200                                                 |
| 43    | Вес электрошкафа, кг                                                                                                                     | 100                                                  |
| 44    | Общая потребляемая мощность станка, кВт                                                                                                  | 3                                                    |
| 45    | Вес генератора УЗГ – 1,5 кг                                                                                                              | 260                                                  |

## **Краткое описание конструкции и работы станка**

### **Описание кинематической схемы**

Ввиду простоты кинематических цепей перемещений стола (рис. 1.13), колонны, шпинделя с подвижным противовесом, а также редуктора диафрагменного насоса порядок передачи до исполнительных органов ясен из чертежа.

Кинематической схемой станка обеспечивается:

- 1) вращение планшайбы стола – вручную и механически;
- 2) продольное и поперечное перемещение стола;
- 3) регулировка хода шпинделя;
- 4) работа диафрагменного насоса.

### **Описание гидравлической схемы**

Общая гидравлическая схема (рис. 1.14) условно может быть разделена на две магистрали, самостоятельные по своим функциям.

1. Подача воды для охлаждения обмоток магнотристора в шпинделе.

2. Система подачи абразивной суспензии в зону обработки из бака посредством диафрагменного насоса.

Подвод воды к станку осуществляется через вентиль на правой задней стенке станины. От основной трубы сечением 1/2 дюйма сделаны отводы на душевую ручку (узел 4Б772-64) и на охлаждение пакета магнотристора.

Система подачи абразива имеет ветвь низкого давления (0,5 атм) и высокого давления (до 5 атм).

Давление подаваемой абразивной суспензии контролируется по манометру, установленному на передней стенке стола станка, и регулируется поворотом рукоятки редукционного клапана с левой стороны станины.

Поднимать инструмент над деталью при работе под давлением не рекомендуется.

### **Общая компоновка станка**

Ультразвуковой прошивочный станок модели 4772А состоит из групп, приведенных в табл. 1.5.

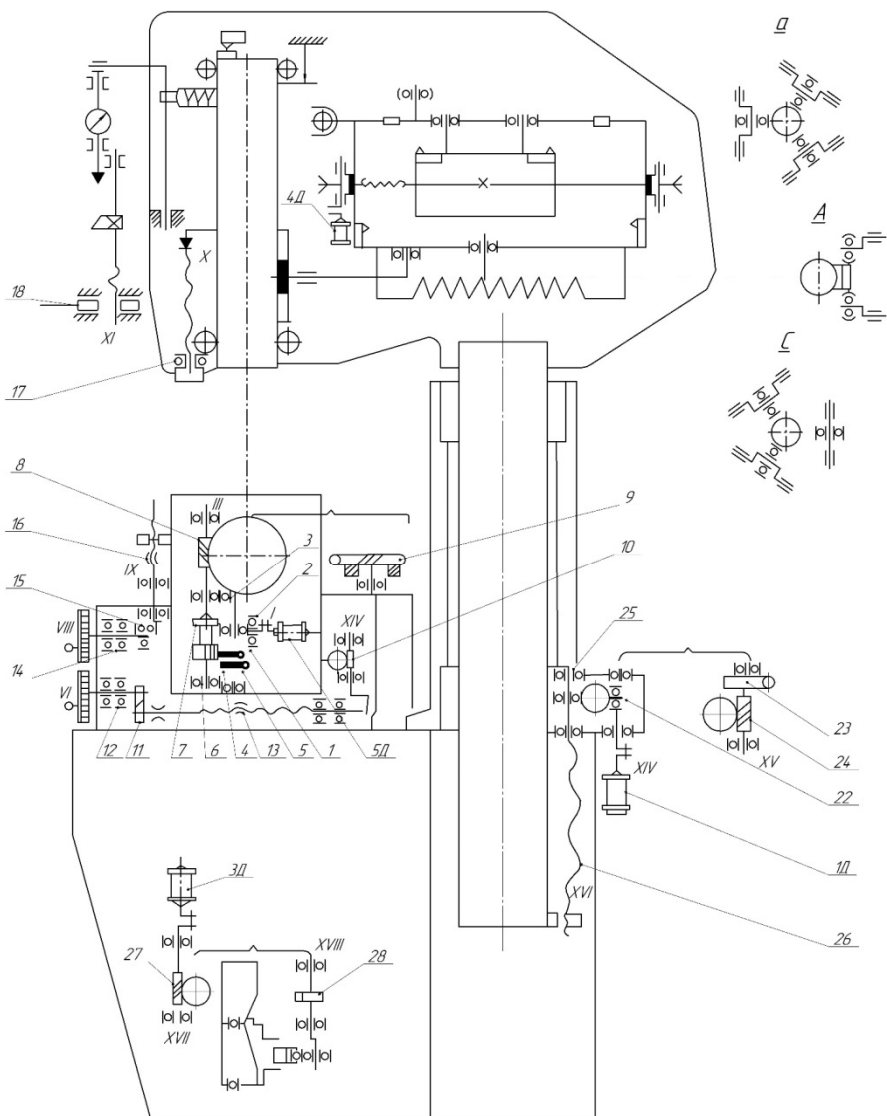


Рис. 1.13. Кинематическая схема станка 4772А



Таблица 1.5

**Компоновка станка**

| Номер группы                | Наименование                             |
|-----------------------------|------------------------------------------|
| 4772А-11                    | Станина                                  |
| 4772А-12                    | Координатный стол                        |
| 4772А-14                    | Шпиндельная головка                      |
| 4772А-16                    | Демпфер                                  |
| 4772А-17                    | Индикатор с линейкой                     |
| 4772А-18                    | Подвеска шпинделя                        |
| 4772А-19                    | Колонна                                  |
| 4772А-26                    | Насос диафрагменный                      |
| 4772А-56                    | Реле давления                            |
| 4772А-60                    | Принадлежности                           |
| 4772А-76                    | Магнитостриктор                          |
| 4772А-80                    | Электрошкаф                              |
| 4772А-89                    | Размещение электрооборудования на станке |
| 4772А-94                    | Размещение электрооборудования в шкафу   |
| <i>Унифицированные узлы</i> |                                          |
| 4772-64                     | Душевой аппарат                          |
| 4773А-24                    | Клапан редукционный                      |
| 4Б772-28                    | Разводка абразива и воды                 |
| 4Б772-29                    | Бак                                      |

Общая компоновка станка представлена на рис. 1.15, на котором показано расположение основных узлов. Отличительной особенностью конструкции является выполнение групп в отдельных корпусах, что облегчает их сборку не только в процессе изготовления, но и при ремонте станка.

Станок имеет унифицированные детали из станка моделей 4773А и 4Б772.

Электроаппаратура управления станком вынесена в самостоятельный шкаф.

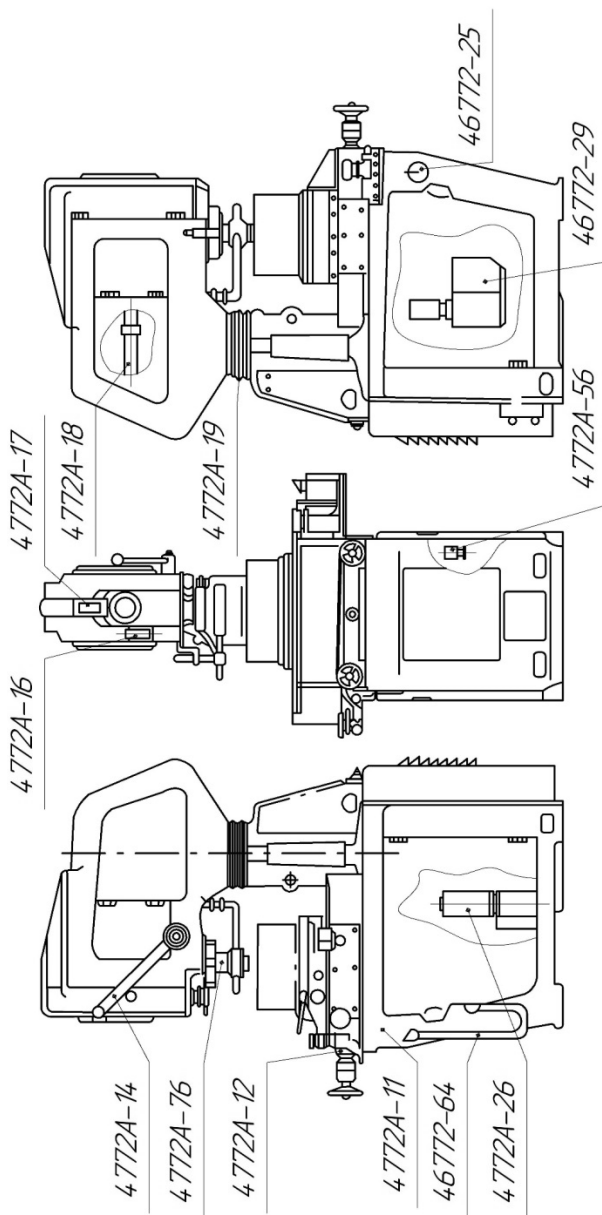


Рис. 1.15. Компоновка станка

## **Описание основных узлов станка и приспособлений (рис. 1.15)**

Станина (узел 4772А-11) представляет собой отливку, служащую базой для крепления всех основных узлов. На верхней плоскости станины имеет направляющие продольного перемещения координатного стола.

Внутри станины расположены поворотный бак с электродвигателем (узел 4Б772-29) и диафрагменный насос (узел 4772А-26). Спереди в левом верхнем углу расположен редукционный клапан. К задней стенке станка крепятся реле давления (узел 4772А-56) и плунжерный насос С16-21.

### **Координатный стол**

Координатный стол (рис. 1.16) состоит из четырех основных частей, представляющих собой отливки из чугуна: нижней и верхней плиты, планшайбы и плиты Ø 300 мм с четырьмя Т-образными радиальными пазами.

Базой продольного перемещения стола служат верхние направляющие нижней плиты стола, лежащей на станине. Оба перемещения координатного стола осуществляются вручную от маховиков на передней стенке нижней плиты. Измерение и контроль перемещений ведется по линейкам с оптическими устройствами с точностью отсчета 0,01 мм и по лимбам на маховичках с ценой деления 0,02 мм.

Ходовые винты с регулируемыми гайками расположены на опорах из спаренных радиально-упорных подшипников.

Смазка четырех направляющих стола, гаек ходовых винтов и опорной втулки производится от плунжерного насоса, прикрепленного к задней стенке станины с правой стороны.

На верхней плите стола расположена вращающаяся планшайба, опорой для которой служит кольцевая плоская направляющая. Центрирование осуществляется радиально-упорным подшипником. Вращение планшайбы производится вручную и механически от редуктора, расположенного на правой стороне верхней плиты стола; переключение от механического вращения на ручное – рукояткой на редукторе. Управление механическим приводом осуществляется с пульта управления станком включением тумблера.

Слив абразива из планшайбы стола происходит в патрубок бака, в котором установлена сетка для улавливания обработанного материала.

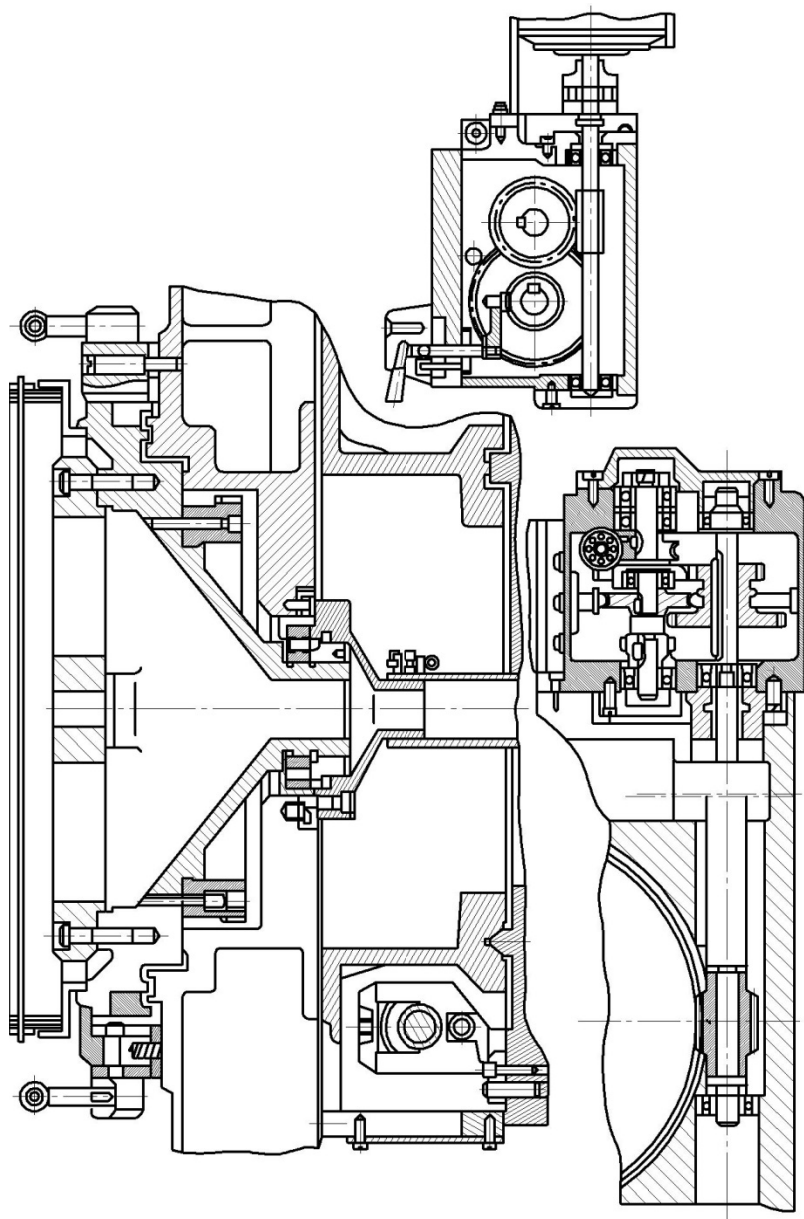


Рис. 1.16. Схема координатного стола

## **Шпиндельная головка**

В корпусе шпиндельной головки размещены (рис. 1.17) шпиндель, подвеска шпинделя, демпфер и индикатор с линейкой.

Шпиндель станка представляет собой трубу, внутри которой помещен магнитостриктор.

Магнитостриктор располагается в нижней части шпинделя со специальной расточкой. Для охлаждения магнитостриктора и отвода воды к шпинделю подведены два резиновых шланга. Для вывода проводов от магнитостриктора имеется штуцер с уплотнением.

От проникновения воды верхняя часть шпинделя защищена уплотнением.

На верхней стороне шпинделя на лыске закреплена сварная деталь, к которой привернут угольник для соединения с демпфером, и планка, опирающаяся на нижний упор. На задней стороне шпинделя на лыске закреплена сварная деталь, которая слева имеет ось с подшипником для присоединения подвески шпинделя, а справа – выступ, в который упираются рукоятки управления шпинделем, сверху в нее упирается верхний упор.

Шпиндель станка имеет три группы подшипниковых опор, расположенных в корпусе головки. Верхняя и нижняя группы имеют по три подшипника, расположенных под углом  $120^\circ$  на эксцентриковых осях, с помощью которых можно выставлять шпиндель в вертикальном положении. Для предотвращения поворота шпинделя служит планка, закрепленная на задней стороне шпинделя, на боковые стороны которой опираются два самоустанавливающиеся сферических подшипника на эксцентриковых осях.

С правой стороны шпинделя расположен жесткий упор для его опускания. Величина свободного хода шпинделя отсчитывается по линейке, закрепленной на упоре.

Подъем и опускание шпинделя осуществляется рукояткой с фиксатором с правой стороны головки.

## **Демпфер**

Внутри головки на съемной половине нижней опоры слева установлен демпфер (рис. 1.18), предназначенный для амортизации касания шпинделя поверхности изделия, вес которого (давление) может достигать 30 кг.

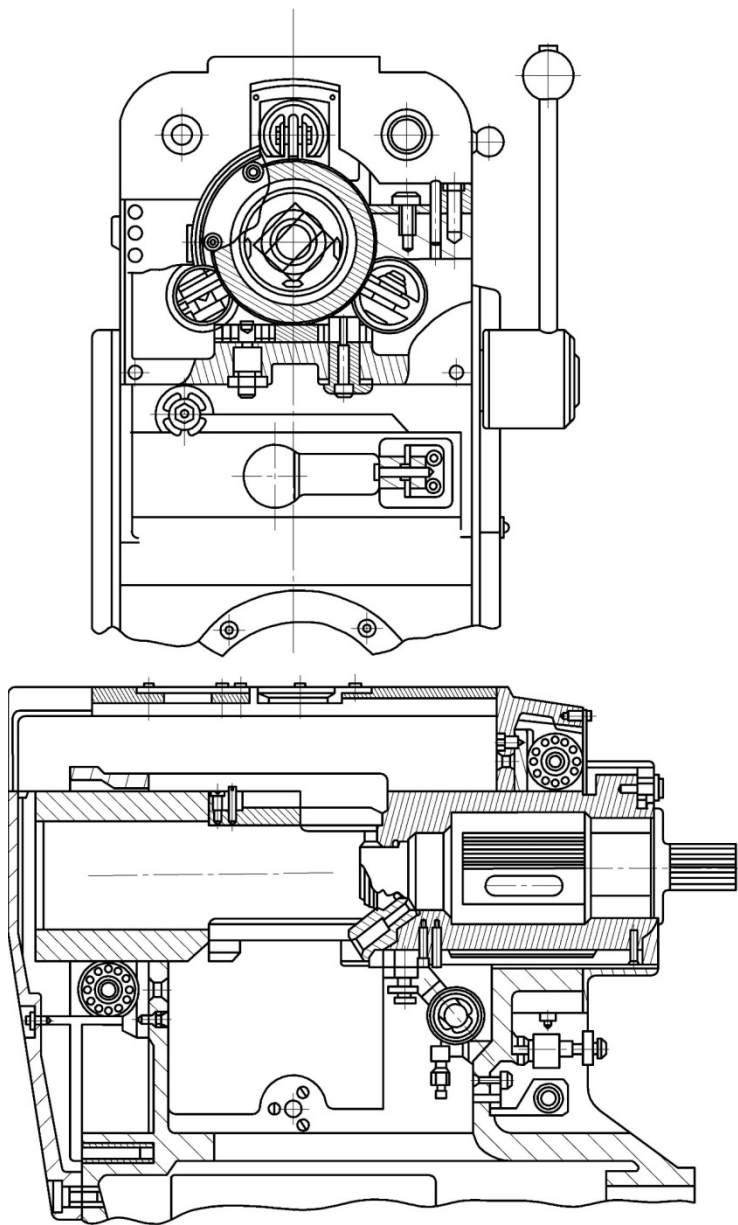


Рис. 1.17. Схема шпиндельной головки

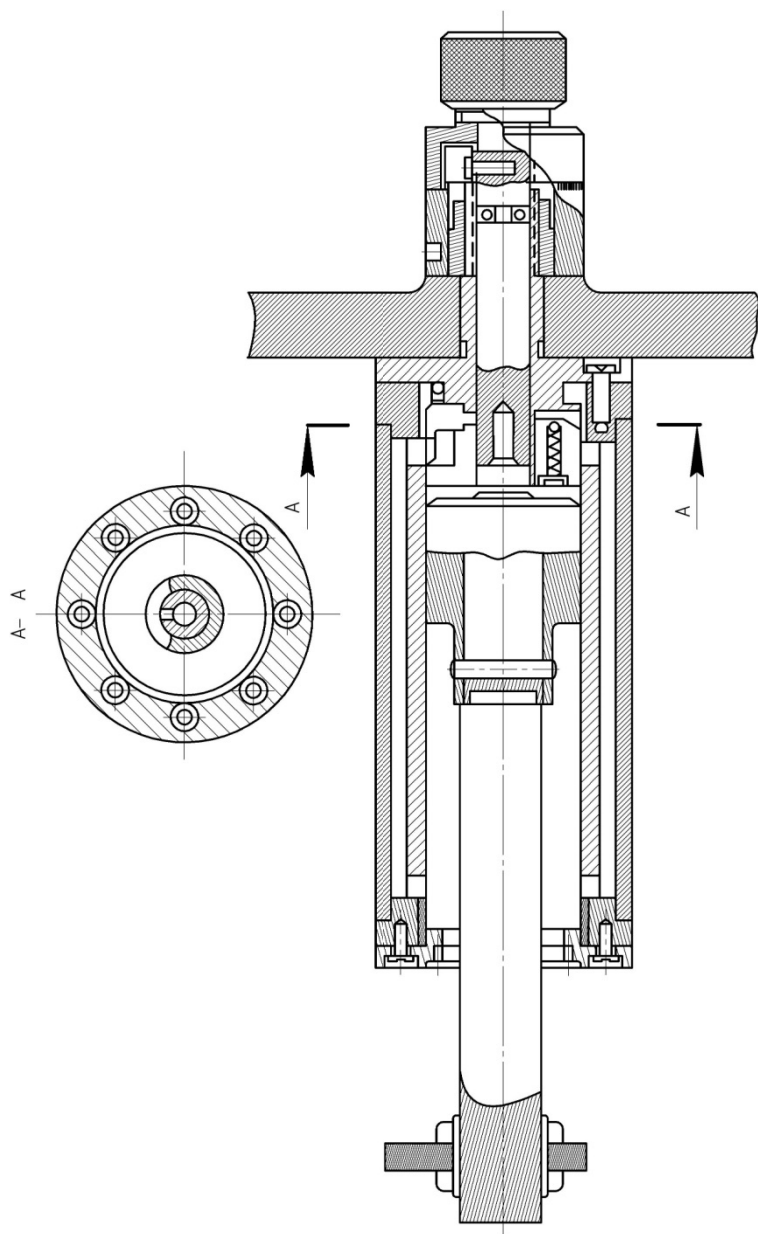


Рис. 1.18. Схема демпфера

При опускании шпинделя масло из-под поршня поступает через шелевой дроссель в рубашку цилиндра, а после ее заполнения переливается через отверстия в верхней части внутреннего цилиндра в надпоршневую полость. При быстром ходе шпинделя вверх масло поступает обратно в рубашку цилиндра и затекает под поршень через открывающиеся шариковые клапаны. Регулирование демпфера в процессе работы осуществляется поворотом рукоятки.

### **Индикатор с линейкой**

Для отсчета перемещений шпинделя в передней части корпуса головки укреплен индикатор с линейкой (рис. 1.19).

Штифт индикатора своим верхним концом упирается в кронштейн, закрепленный на гильзе.

Индикаторная стойка имеет подвижный контакт с ходом 50 мм и регулируется вращением маховичка в нижней части стойки.

При достижении инструментом глубины, заданной установкой контакта индикатора, штифт индикатора своим нижним концом замыкает контакт и загорается красная лампочка на передней крышке головки.

Электрическая и механическая система управления индикатора отсчета перемещений шпинделя позволяет производить обработку детали на заданную глубину. Точность отсчета по индикатору составляет 0,01 мм. Положение его стрелки на нуле согласовывается с указателем линейки при сборке станка.

Шкала линейки при включении станка подсвечивается двумя лампочками.

### **Подвеска шпинделя**

Подвеска шпинделя выполнена в виде сварного рамного коромысла, одно плечо которого посредством шарнира соединяется со шпинделем. По контуру рамы на роликах перемещается груз-противовес.

Движение груза осуществляется посредством тросика и двух блоков от электродвигателя со встроенным редуктором. Перемещением груза изменяется давление инструмента на деталь в пределах от 1 до 30 кг и контролируется по прибору на пульте.

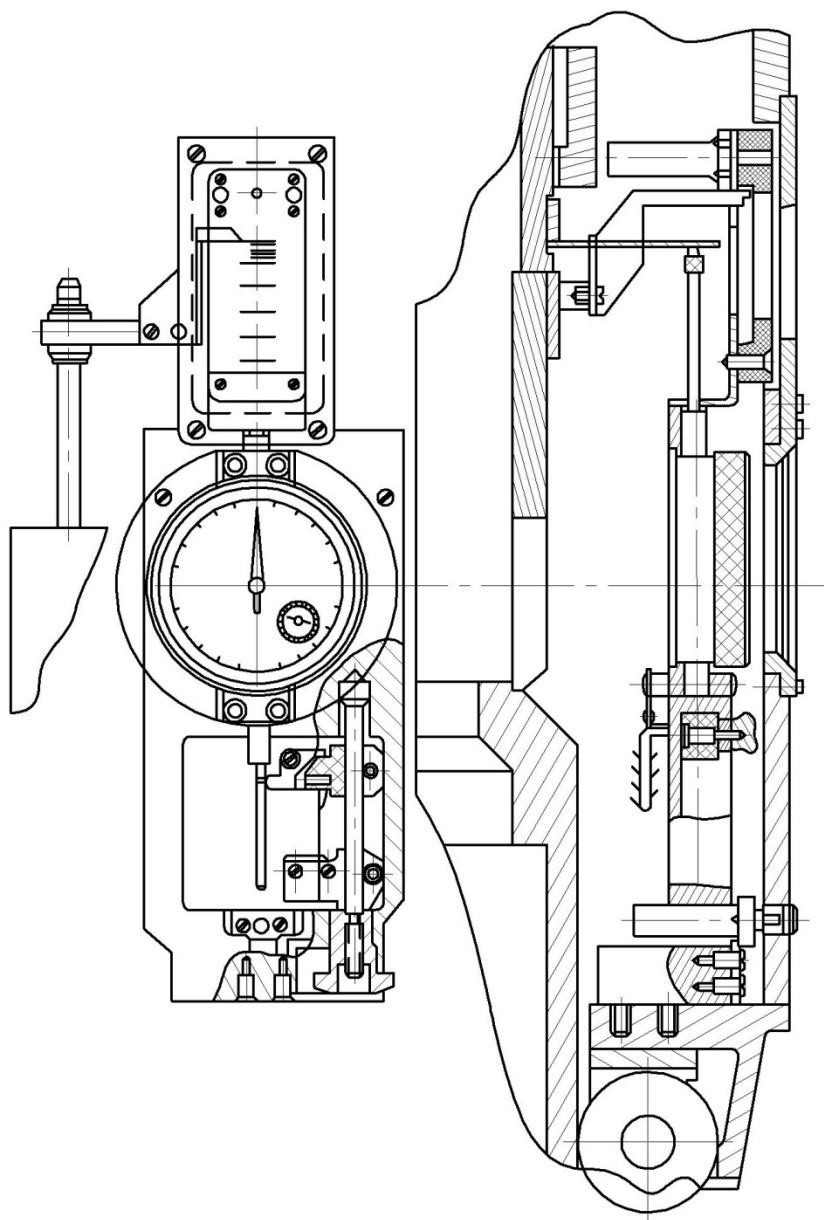


Рис. 1.19. Схема индикатора с линейкой

Сигнал на прибор поступает от укрепленного на коромысле сопротивления, по которому скользит пружинный контакт груза. Изменением снимаемого этим контактом напряжения отклоняется стрелка прибора. Описание работы дается в разделе «Электрооборудование станка» – регулирование давления шпинделя.

На переднем и заднем торце рамы стоят концевые переключатели, ограничивающие крайние положения груза.

### **Колонна**

Колонна станка (рис. 1.20) представляет собой трубу, встроенную в стойку, которая крепится к станине. Движение на колонну передается через пару винт–гайка. Винт приводится во вращение через червячный редуктор с винтовой передачей. От поворота колонна удерживается двумя закрепленными на стойке направляющими планками, на боковые стороны которых опираются два радиальных подшипника на эксцентриковых втулках. Для фиксации колонны в определенном положении служит зажим, расположенный в передней части стойки.

Сверху на колонну надевается корпус шпиндельной головки, который своим торцом притягивается к двум полукольцам, вставленным в кольцевой паз на колонне.

Смазка направляющих колонны производится наливными масленками, расположенными на стойке. Смазка передачи винт–гайка производится фитильной масленкой, забирающей масло из редуктора.

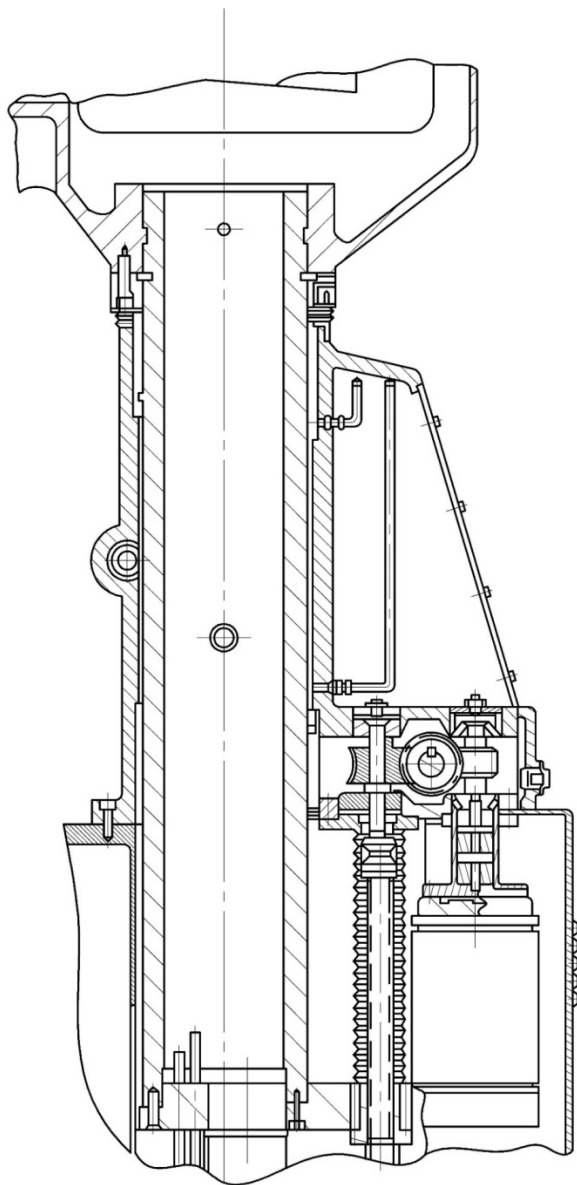
### **Система подачи абразива**

Абразивная система станка состоит из бака с рабочей жидкостью, диафрагменного насоса и сливного клапана. На крышке второго бака установлен электродвигатель, служащий для перемешивания абразивной суспензии, которая с помощью диафрагменного насоса нагнетается в рабочую зону.

Бак имеет объем 10,5 л. В корпус бака встроены указатели верхнего и нижнего уровня жидкости.

При работе поливом концентрация абразивной суспензии составляет 30...35 %, что соответствует нижнему уровню жидкости в баке. При необходимости работы с прокачкой объем жидкости в баке должен составлять 10,5 л.

При переходе на работу поливом после работы с прокачкой необходимо после отстоя абразива (10 мин) слить избыток воды в канализацию.



*Рис. 1.20. Схема колонны*

Диафрагменный насос служит для подачи абразива в зону обработки как поливом, так и под давлением. Он установлен в станине рядом с баком. Через червячную пару и кривошип с шатуном плунжер насоса получает возвратно-поступательное движение. Плунжер входит в полость, заполненную маслом. Вытесняемое масло равномерно вспучивает резиновую диафрагму, которая выжимает некоторый объем суспензии из полости между двумя шаровыми обратными клапанами. После отхода плунжера диафрагма прогибается и создаваемым разрежением межклапанный объем вновь заполняется всасываемой из бака суспензией. Сжимаемый в ресивере воздух смягчает пульсацию насоса и, кроме того, используется для контроля давления в магистрали посредством манометра, помещенного на нижней плите стола. Давление в системе при работе от диафрагменного насоса регулируется редукционным клапаном. Редукционный клапан позволяет регулировать давление от 0,5 до 5 атм.

Оптимальное рабочее давление составляет 2...3,5 атм. Деталь и поверхность стола обмываются душевым аппаратом, подвешенным справа на станине.

### **Электрооборудование станка**

На станке установлено пять электродвигателей (табл. 1.6).

Таблица 1.6

#### **Электрооборудование станка**

|    |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1Д | Электродвигатель перемещения колонны типа АОЛ 22-2 трехфазного переменного тока с КЗ ротором напряжением 220/380 В, мощностью 0,6 кВт, числом оборотов 2800 об/мин в закрытом обдуваемом исполнении. Исполнение 22                               |
| 2Д | Электродвигатель для перемешивания абразива типа Ф-0,12/2 трехфазного переменного тока с КЗ ротором напряжением 220/380 В, мощностью 0,12 кВт, числом оборотов 2800 об/мин. Исполнение Ф2                                                        |
| 3Д | Диафрагменный насос для перекачивания абразива с электродвигателем типа АОЛ-22-2 трехфазного переменного тока с КЗ ротором напряжением 220/380 В, мощностью 0,6 кВт, числом оборотов 2800 об/мин в закрытом обдуваемом исполнении. Исполнение Ф2 |
| 4Д | Электродвигатель перемещения груза типа РД-09 реверсивный с редуктором напряжением 127 В, током 0,1 А, частотой 50 Гц, мощностью 10 Вт, числом оборотов 1200 об/мин, редукцией 1/670                                                             |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5Д | <p>Электродвигатель вращения стола типа СЛ-369 постоянного тока шунтовой напряжением 110 В, мощностью 55 Вт, числом оборотов 3000 об/мин</p> <p>Станок, выпускаемый с электрооборудованием на напряжение 380 В силовой цепи; 127 В в цепи управления и 36 В в цепи сигнализационной аппаратуры</p> |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Описание принципиальной электросхемы

Подключение станка к электросети производится вводным автоматическим выключением 1ВВ типа АК36/ЗМГ-440 (рис. 1.21).

При осмотре или ремонте электроаппаратуры вводный выключатель должен быть выключен.

При включении схемы получает питание трансформатор 1ТР, зажигается сигнальная лампочка 1ЛЗ (станок включен), а также лампочки 2ЛЮ, 3ЛЮ, подсветка шкалы линейки на головке станка.

Трансформатор 1ТР имеет обмотки: 1ТР<sub>1</sub>-380В; 1ТР<sub>2</sub>-127В; 1ТР<sub>3</sub>-36 В.

Высокое напряжение с генератора снимается автоматически, когда нет воды в системе охлаждения магнитостриктора, и концевик 9ПВ разрывает цепь.

### Управление колонной

Включение электродвигателя 1Д перемещения колонны производится с пульта толчковыми кнопками 1КУ, 2КУ («вверх», «вниз»), движение колонны ограничивается конечными выключателями 1ПВ, 2ПВ типа ВПК-2110.

### Управление вращением стола (рис. 1.21)

Управление вращением стола осуществляется с пульта станка тумблером 9ВВ: I – положение (Н), электродвигатель 5Д включается на напряжение постоянного тока 110 В, число оборотов 3600 об/мин.; II – положение (В), электродвигатель 5Д включается через сопротивление 8Р на напряжение 60 В постоянного тока, число оборотов электродвигателя 5Д в этом случае 1000 об/мин.

Питание к электродвигателю подается с обмотки 1ТР<sub>2</sub> трансформатора 1ТР через селеновый выпрямитель 4 В и 3 В.



## **Регулирование давления шпинделя**

На пульте (рис. 1.21) установлен вольтметр У. Питание прибора осуществляется постоянным напряжением (с обмоткой ТТР<sub>3</sub> через германиевые диоды 1Б), которое регулируется переменным сопротивлением 6R. Регулирование напряжения необходимо для точного измерения давления. При включении тумблера 7RR в положение I (точки 64, 60) стрелка прибора должна устанавливаться на красную черту, которая фиксирует эталонное напряжение на проволочном сопротивлении 7R.

Если тумблер 7RR включен в положение II (точки 64, 63), то напряжение на прибор подается со скользящего контакта сопротивления 7R. Перемещение груза по коромыслу влечет за собой перемещение скользящего контакта по проволочному сопротивлению 7R. Таким образом, изменение напряжения, подаваемого на прибор, отражает изменение давления шпинделя, которое определяется положением груза на коромысле. Стрелка прибора будет отклоняться, фиксируя одновременно напряжение цепи и, так как шкала прибора градуирована в килограммах, давление инструмента.

## **Управление перемещением груза (рис. 1.21)**

Перемещение груза осуществляется электродвигателем 4Д. При включении переключателя 8RR в положение I (точки 25, 26) груз перемещается в сторону увеличения давления шпинделя. Ограничение перемещения груза в этом направлении осуществляется микропереключателем 3ПВ.

В среднем положении переключателя 8RR двигатель отключен. При включении переключателя 8RR в положение II (точки 25–27) груз перемещается в сторону уменьшения давления шпинделя. Ограничение перемещения выражается микропереключателем 4ПВ.

## **Управление подачей абразива (рис. 1.21)**

Кнопкой 4КУ «Пуск» включается электродвигатель 25Д. Одновременно включается диафрагменный насос 3Д.

Кнопкой 3КУ выключаются электродвигатели 2Д и 3Д. Кнопкой 5КУ включается двигатель насоса 3Д и осуществляется промывка системы абразива.

## Органы управления

Управление станком в процессе работы осуществляется кнопками на пульте управления и рукоятками на корпусе головки, колонне и передней части станины и стола (см. рис. 1.9 и табл. 1.7).

Таблица 1.7

### Органы управления

| № п/п | Наименование и назначение органов управления и контроля за работой станка и его узлов |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Указатель установки жесткого упора                                                    |
| 2     | Рукоятка подъема шпинделя                                                             |
| 3     | Маховичок регулирования хода шпинделя                                                 |
| 4     | Рукоятка фиксации колонны                                                             |
| 5     | Маховичок ручного вращения планшайбы                                                  |
| 6     | Маховичок регулирования глубины прошивки                                              |
| 7     | Маховичок регулирования демпфера                                                      |
| 8     | Маховичок поперечного перемещения стола                                               |
| 9     | Рукоятка регулирования редукционного клапана                                          |
| 10    | Линейка вертикальных перемещений шпинделя                                             |
| 11    | Индикатор для точного отсчета вертикальных перемещений шпинделя                       |
| 12    | Контакт, ограничивающий глубину обработки                                             |
| 13    | Рукоятка перемещения с ручного вращения планшайбы стола на механическое и обратно     |
| 14    | Микроскоп с линейкой отсчета продольных перемещений стола                             |
| 15    | Маховик продольного перемещения стола                                                 |
| 16    | Микроскоп с линейкой отсчета поперечного перемещения стола                            |
| 17    | Манометр для контроля давления в системе абразива                                     |
| 23    | Выключатель для проверки эталонного напряжения на сопротивлении подвески шпинделя     |
| 24    | Потенциометр регулирования эталонного напряжения                                      |
| 25    | Сигнальная лампочка «Станок включен»                                                  |
| 26    | Выключатель вращения планшайбы стола                                                  |
| 27    | Выключатель освещения станка                                                          |

| №<br>п/п | Наименование и назначение органов управления и контроля<br>за работой станка и его узлов |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 28       | Выключатель подсветки микроскопов                                                        |
| 29       | Кнопка перемещения колонны вверх                                                         |
| 30       | Кнопка перемещения колонны вниз                                                          |
| 31       | Переключатель увеличения и уменьшения давления инструмента                               |
| 32       | Кнопка включения насоса и двигателя перемешивания абразива                               |
| 33       | Кнопка выключения насоса и двигателя перемешивания абразива                              |
| 34       | Кнопка включения насоса для промывки системы                                             |

### **Настройка и наладка станка (см. рис. 1.9)**

Абразивный бак выдвигается из станины, в него засыпается 2 кг порошка карбида бора. После этого в бак заливается 4 л воды.

Полученный объем суспензии примерно 33 %-й концентрации используется при обработке детали поливом из спрейного кольца.

При обработке детали под давлением концентрация суспензии уменьшается до 15...20 % наполнением бака водой.

Подача абразива в зону обработки как при работе поливом, так и под давлением ведется диафрагменным насосом.

Инструмент крепится к магнитостриктору резьбовой шпилькой М12×1,25 с помощью специального ключа. Сопрягаемые торцы должны тщательно очищаться от грязи, следов коррозии и задиров.

Обрабатываемая деталь закрепляется непосредственно на столе или устанавливается на специальную подставку, если в детали имеется сквозное отверстие не менее 5 мм, выходящее на поверхность, подвергаемую обработке. При отсутствии отверстия в детали оно делается в инструменте и через ниппель соединяется с подающим шлангом.

Рукояткой 2 шпиндель опускается до соприкосновения инструмента с деталью.

Если инструмент имеет плоский торец, то для лучшего прилегания инструмента к детали производится предварительный полив суспензией 2-3 мин из спрейного кольца, установленного так, чтобы струи фокусировались на линию стыка детали и инструмента. После такой обработки устанавливается необходимое давление шпинделя и может быть включена прокачка суспензии через инструмент или подставку в

зависимости от установки детали. По индикатору и линейке на головке ведется контроль за углублением в деталь.

Если необходимо получить правильную геометрию круглого отверстия, можно включить вращение стола кнопкой на пульте управления.

По окончании работы или смене абразива поверхность стола должна быть тщательно промыта водой из душевой ручки, после чего должен быть открыт сливной клапан бака.

Замена абразива производится по мере измельчения его зерен в 3-4 раза по сравнению с неработавшим.

### **Регулировка и особенности разборки станка**

В процессе эксплуатации станка возникает необходимость в регулировании отдельных узлов и элементов с целью восстановления их нормальной работы.

Ниже указаны узлы, требующие регулирования, и способы их регулирования.

1. Координатный стол перемещается от ходовых винтов с плавающими гайками. Люфт на резьбе винтов выбирается при помощи гаек М33×1,5 ГОСТ 11871–66. Другого регулирования кинематика координатного стола не имеет.

2. Шпиндель станка, помещенный в шарикоподшипниковые опоры, в процессе эксплуатации «прикатывается» и теряет первоначальную точность установки. Регулирование положения и хода шпинделя производится поворотом эксцентриковых осей опорных шарикоподшипников, но при этом необходимо следить за равномерностью зазора между цилиндром гильзы и отверстием нижней опоры.

После регулирования торцевые винты осей опор должны быть хорошо затянуты. Затем проводят контроль перпендикулярности шпинделя к поверхности стола в двух плоскостях согласно акту приемки.

Настройка показаний индикатора с линейкой в крайнем верхнем положении шпинделя достигается регулированием верхнего жесткого упора (винта).

В случае снятия шпинделя со станка необходимо:

- А) поднять колонну в верхнее положение;
- Б) снять верхнюю крышку головки;
- В) открыть боковые крышки головки и укрепить коромысло от опрокидывания;
- Г) открыть переднюю крышку головки;

- Д) подставить под торец шпинделя деревянный брусок;
- Е) отсоединить шланги подвода, слива воды и охлаждения пакета магнотристора;
- Ж) отсоединить провода освещения шкалы линейки, контакта индикатора и высокого напряжения на клеммнике головки;
- З) отсоединить визир линейки, отвернув два винта;
- К) отсоединить шток демпфера от угольника на шпинделе;
- Л) отвернуть восемь винтов крепления передней половины нижней опоры;
- М) поддерживая шпиндель, удалить подставку, постепенно опустить шпиндель до предела, а затем, наклонив шпиндель, вынуть его из верхней опоры.

Установка шпинделя выполняется в обратном порядке, после чего производится регулирование подшипниковых опор.

3. Цилиндрическая колонна перемещается во втулках стойки и удерживается от поворота двумя закрепленными на стойке направляющими планками, на боковые стороны которых опираются два подшипника. Снять колонну со станины можно только вверх после отсоединения электродов, трубопроводов системы абразива и охлаждения, а также оси с подшипниками, опирающимися на направляющие планки.

4. Индикатор с линейкой под передней крышкой крепится к нижней передней опоре. Для демонтажа узла надо отвернуть винты крепления узла к нижней опоре, а также отвернуть два винта визира линейки. После этого узел снять. Монтаж производится в обратном порядке.

### **Указание по технике безопасности**

1. К обслуживанию и работе на станке допускаются только лица, имеющие квалификацию не ниже третьего разряда, прошедшие техминимум, изучившие конструкцию станка и генератора, прошедшие инструктаж по технике безопасности и пожарной безопасности на основе «Правил технической эксплуатации и безопасности обслуживания электроустановок промышленных предприятий».

2. Станок, электрошкаф и генератор необходимо заземлить. Состояние заземления должно систематически проверяться в соответствии с правилами технической эксплуатации электрических установок.

3. У станка и генератора должны быть резиновые коврики.

4. Во время работы станка в помещении должно находиться не менее двух человек.

5. Перед установкой инструмента необходимо станок обесточить.

6. После окончания работы и при длительных отлучках станок обесточить.

7. Категорически запрещается открывать дверцу электрошкафа во время работы станка.

8. Запрещается устанавливать вместо предохранителей «жучки».

9. Стол станка после работы промыть водой.

10. Осмотр и ремонт генератора и электрической части станка должен выполняться только электротехническим персоналом, прошедшим проверку согласно указанным правилам.

11. При работе станка должен быть полностью исключен непосредственный контакт рук с абразивной жидкостью, инструментом и обрабатываемыми деталями.

### **Содержание отчета**

1. Титульный лист.
2. Наименование и цель работы.
3. Эскиз основных органов станка и их назначение.
4. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Основные органы ультразвукового станка.
2. Кинематическая схема станка.
3. Управление подачей абразива.
4. Управление перемещением груза.
5. Система управления абразива.

## **2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС**

### **2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА**

При ультразвуковой сварке (УЗС) пластмасс электрические колебания ультразвуковой частоты, вырабатываемые генератором (см. раздел 1), преобразуются в механические колебания сварочного инструмента – волновода и вводятся в свариваемый материал. Часть энергии механических колебаний переходит в тепловую энергию локальной направленности, благодаря чему происходит нагрев зоны контакта свариваемых деталей до температур вязкотекучего состояния. Свариваемость отдельных видов полимерных материалов зависит также от содержащихся в них наполнителей, красителей, способа получения заготовки и т. п. Условием получения высококачественного соединения при сварке двух полимерных материалов является их приблизительно одинаковая температура плавления и химическое сродство.

Вначале сварки образуется физический контакт поверхностей и происходит активация полимерных молекул за счет разрыва химических связей, затем начинается химическое взаимодействие соединяемых материалов, переходящее в объемное взаимодействие в зоне соединения. При температурах высокоэластичного состояния полимера происходит диффузия отдельных сегментов макромолекул свариваемых полимеров, а в некоторых случаях – перемешивание вязкотекучего полимерного материала. При соединении двух термопластов различных марок возникают химические превращения.

Основными отличительными чертами УЗС пластмасс является:

- 1) возможность сварки по поверхностям, загрязненным различными продуктами;
- 2) локальное выделение теплоты в зоне сварки, что исключает перегрев пластмассы, как это имеет место при сварке нагретым инструментом, нагретыми газами и т. д.;

- 3) возможность получения неразъемного соединения при сварке жестких пластмасс на большом удалении от точки ввода УЗ-энергии;
- 4) возможность выполнения соединений в труднодоступных местах;
- 5) нагрев материала до температуры сварки осуществляется быстро; время нагрева исчисляется секундами и долями секунды.

## **2.2. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПЛАСТМАСС**

Основными параметрами ультразвуковой сварки, характеризующими выделение энергии в зоне соединения, являются: амплитуда колебаний рабочего торца волновода  $A$  (мкм); частота колебаний  $f$  (кГц); продолжительность ультразвукового импульса  $t$  (с) или в случае непрерывной сварки – скорость сварки  $v$  (м/с); сварочное статическое давление  $P_{ст}$  (Па) или усилие прижатия  $F$  (Н) волновода к детали.

В случаях, когда дозирование подводимой механической энергии осуществляется по схемам сварки с «фиксированным зазором» или «фиксированной осадкой», величина зазора или допустимой осадки может также считаться основным параметром. При сварке с предварительным и сопутствующим подогревом или охлаждением свариваемых деталей температуру подогрева или охлаждения также относят к основным параметрам, поскольку при этом меняются теплофизические и релаксационные характеристики материала, влияющие на интенсивность преобразования механической энергии в тепловую.

Оптимальные параметры режима сварки зависят от свойств свариваемого материала, толщины и формы изделий и других факторов и устанавливаются в каждом конкретном случае экспериментально. Оценка режима обычно проводится по показателям прочности сварного соединения. Кроме того, проверяют его на герметичность, деформацию и другие характеристики.

Дополнительные параметры режима сварки – размеры, форма и материал опоры и волновода; материал теплоизоляционных прокладок; температура предварительного подогрева волновода и т. д.

*Амплитуда смещения.* Время разогрева полимера до температуры размягчения или плавления обратно пропорционально квадрату амплитуды смещения: при увеличении амплитуды смещения возрастает

энергия, подводимая к свариваемым материалам. При больших значениях амплитуды время до размягчения полимера перестает уменьшаться и стабилизируется около некоторого минимального значения.

Зависимость прочности сварных соединений от колебаний торца волновода выражается кривой с максимумом, соответствующим оптимальному значению амплитуды. Увеличение амплитуды колебаний свыше оптимального значения приводит к сильному разогреву полимера непосредственно под волноводом, что может сопровождаться появлением пузырьков, выпучиваний и выплесков размягченного материала. После сварки поверхность шва становится неровной, пористой, имеет наплывы и другие дефекты, в результате чего прочность сварного соединения понижается.

Основные параметры режима взаимосвязаны. Так, время, необходимое для сварки, зависит от амплитуды колебаний и сварочного давления. При более высоких амплитудах необходимые свойства сварных соединений могут быть достигнуты при меньшем времени сварки, и наоборот. Определяющим параметром режима ультразвуковой сварки является амплитуда колебаний рабочего торца волновода, которая выбирается в пределах 30...70 мкм. Оптимальному значению амплитуды соответствует максимальная прочность и наилучшее качество сварного соединения. Амплитуда колебаний, необходимая для обеспечения качественной сварки, связана с величиной сварочного давления и, кроме того, зависит от геометрических размеров свариваемых деталей, типа свариваемых полимеров и опоры, определяющих распределение характеристик звукового поля.

Уменьшение амплитуды колебаний по сравнению с оптимальным значением также приводит к понижению прочности соединения. В этом случае вводимая механическая энергия недостаточна для образования сварного соединения или требуется значительное время сварки, что, как и при повышенных амплитудах, приводит к разогреву полимера под волноводом и понижению прочности.

*Статическое давление.* При помощи давления осуществляется необходимый акустический контакт между поверхностями свариваемых деталей и между деталями и волноводом. Кроме того, давление является необходимым условием для протекания процессов объемного взаимодействия в зоне контакта свариваемых деталей.

Низкая прочность при сварке на небольших статических давлениях связана с подводом к деталям малой энергии из-за недостаточного контакта. В этом случае может наблюдаться размягчение и де-

формация материала под волноводом вследствие ударного нагружения. С увеличением давления до определенного предела увеличивается не только прочность, но и скорость сварки. Увеличение давления свыше определенного усилия приводит к понижению температуры, достигаемой на границе свариваемых деталей. В связи с этим материал не достигает вязкотекучего состояния и свариваемость ухудшается.

*Рабочий цикл.* Свойства сварных соединений зависят не только от параметров режима сварки, но и от рабочего цикла. Рабочий цикл определяется последовательностью приложения давления, включения, прохождения и выключения ультразвукового импульса, выдержки изделия под давлением и снятия давления. Цикл сварки закладывается в основу выбора схемы механизма давления и включения ультразвуковых колебаний сварочных машин.

Наиболее распространенным рабочим циклом ультразвуковой сварки является сочетание статического давления с ультразвуком (рис. 2.1, а). Статическое давление  $P_{\text{ст}}$  прикладывается до включения ультразвуковых колебаний ( $t_{\text{п}}$  – время предварительного сжатия), остается постоянным в течение всего цикла и снимается с запаздыванием на  $t_3$ . Охлаждение материала сварного шва начинается, когда детали еще сжаты между волноводом и опорой.

При цикле ультразвук – статическое давление (рис. 2.1, б) ультразвуковые колебания включаются до приложения статического давления. Первоначальное включение ультразвука позволяет очистить свариваемые поверхности от загрязнений. В этом случае сварочное давление прикладывается к изделию постепенно. Касаясь изделия, волновод сообщает ему механические колебания, тем самым очищает поверхность, прежде чем наступает сварка. По окончании воздействия ультразвуковых колебаний давление снимается с запаздыванием на  $t_3$ .

Для повышения прочности сварного соединения необходимо непосредственно после выключения ультразвуковых колебаний повышать давление (рис. 2.1, в). Повышенное давление  $P_{\text{к}}$  (ковочное усилие) должно следовать за выключением ультразвуковых колебаний через небольшой, строго контролируемый интервал времени  $t_{\text{зк}}$ . Такой цикл часто используется, когда необходимо получить герметичный шов на объемных деталях, выполненных из ударопрочного полистирола.

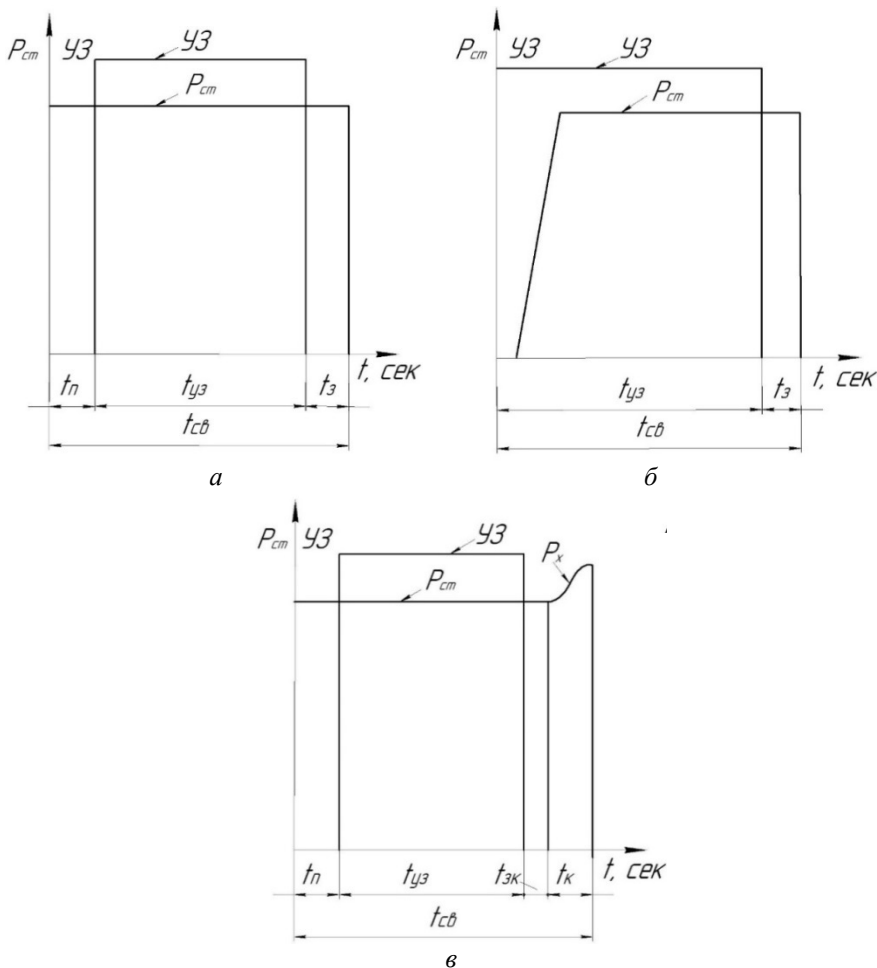


Рис. 2.1. Микроультразвуковая обработка

В настоящее время ультразвуковую сварку классифицируют по следующим признакам:

- 1) подвод энергии механических колебаний к свариваемому изделию;
- 2) передача энергии в зоне сварки;
- 3) концентрация энергии в зоне сварки;

- 4) дозирование вводимой энергии;
- 5) взаимное перемещение сварочного инструмента и свариваемых деталей для получения швов необходимой конфигурации и протяженности.

### 2.3. ПОДВОД МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ К СВАРИВАЕМОМУ ИЗДЕЛИЮ

Технологическое оборудование для ультразвуковой сварки независимо от физико-механических свойств свариваемых материалов, которые являются непосредственными объектами интенсивного воздействия ультразвуковых колебаний, имеет одну структуру и состоит из следующих узлов: источника питания, аппаратуры управления сварочным циклом, механической колебательной системы и привода давления.

Для обеспечения надлежащих условий ввода механических колебаний и создания тесного контакта свариваемых поверхностей прикладывается давление между волноводом и опорой. Такой контакт обеспечивается статическим давлением  $P_{ст}$  рабочего торца волновода на свариваемые детали (рис. 2.2).

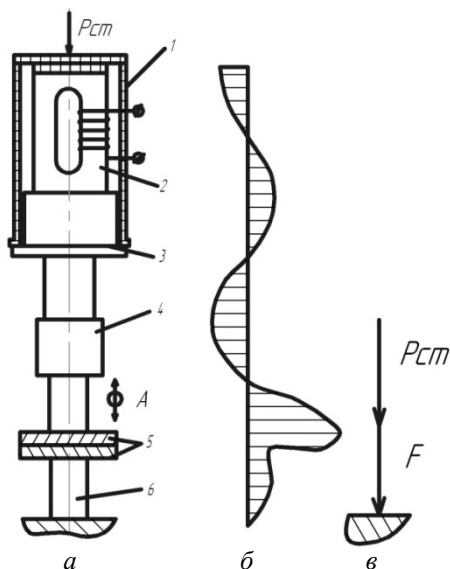


Рис. 2.2. Ультразвуковая сварка с нормальным вводом колебаний:

*a* – схема установки; *б* – эпюра амплитуды смещения колебательной системы; *в* – расположение векторов статического давления  $P_{ст}$  и динамического усилия  $F$ ; 1 – корпус преобразователя; 2 – преобразователь с обмоткой; 3 – трансформатор упругих колебаний; 4 – волновод; 5 – свариваемые детали; 6 – опора

Это давление способствует также концентрации энергии в зоне соединений. Динамическое усилие  $F$ , возникающее в результате колеблющегося волновода, приводит к нагружению свариваемого материала, а действие статического давления  $P_{ст}$  обеспечивает получение прочного сварного соединения.

При основном («нормальном»), наиболее распространенном, способе подвода энергии (рис. 2.2) векторы статического и динамического давления расположены нормально к поверхности свариваемого изделия, лежат на одной прямой и совпадают по направлению. Так как ввод колебаний и статического давления в этом случае осуществляются через один и тот же рабочий орган – волновод, то такая схема иногда называется схемой сварки с зависимым давлением.

## 2.4. ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ К ЗОНЕ СВАРКИ

По характеру передачи энергии к границе раздела и распределению ее по свариваемым поверхностям ультразвуковая сварка может быть разделена на контактную и передаточную.

Возможность передачи механической энергии к зоне сварки зависит от упругих свойств и коэффициента затухания колебаний в свариваемых материалах. Если полимерный материал характеризуется низким модулем упругости<sup>1</sup> и большим коэффициентом затухания<sup>2</sup>, то сварное соединение можно получить лишь на малом удалении от плоскости ввода колебаний. Для равномерного распределения энергии по всей площади контакта свариваемых поверхностей необходимо, чтобы рабочий торец волновода, соприкасающийся с верхней деталью, имел площадь и форму, идентичную площади и форме плоскости контакта свариваемых деталей. Сварка по такой схеме называется контактной ультразвуковой сваркой. Этот вид сварки обычно применяется для соединения изделий из мягких пластмасс, таких как полиэтилен, полипропилен, а также пленок и синтетических тканей небольшой толщины – от 0,02 до 5 мм.

---

<sup>1</sup> Модуль упругости – физическая величина, характеризующая способность твердого тела (материала, вещества) упруго деформироваться (т. е. не постоянно) при приложении к нему силы.

<sup>2</sup> Коэффициент затухания – это постепенное ослабевание собственных колебаний, обусловленное потерями энергии колебательной системой и приводящее к уменьшению амплитуды колебаний.

Если полимерный материал обладает высоким модулем упругости и низким коэффициентом затухания, то сварное соединение можно получить на большом удалении от поверхности ввода механических колебаний. В этом случае ввод механических колебаний может осуществляться на небольшом участке поверхности верхней детали. Благодаря хорошим акустическим свойствам материала изделия энергия ультразвуковой волны незначительно ослабевает при проходе через деталь, контактирующую с волноводом, к границе раздела свариваемых деталей. Тепловыделение на границе раздела в этом случае зависит от конфигурации изделия, а площадь сварки значительно отличается от площади рабочего торца волновода. Сварка по такой схеме называется передаточной ультразвуковой сваркой. Такой вид сварки рекомендуется применять для соединения объемных деталей из жестких пластмасс, таких как полистирол, полиметилметакрилат и др. Наиболее рационально выполнять таким способом соединения встык или втавр. Удаление поверхности ввода механических колебаний от плоскости раздела свариваемых деталей зависит от упругих свойств материала и может составлять от 10 до 250 мм.

## **2.5. КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ЗОНЕ СВАРКИ**

Введение энергии механических колебаний и передача ее к зоне сварки является необходимым, но недостаточным условием образования сварного соединения. Эксперименты показывают, что при ультразвуковой сварке образцов из материалов с хорошими акустическими свойствами (полистирол, полиметилметакрилат), но с плоской поверхностью контакта и при равномерном распределении статического давления получить сварное соединение оказывается трудно, а порой и просто невозможно. Сварка в этом случае осуществляется не по всей поверхности, а лишь в отдельных точках или небольших зонах поверхности.

Развитие и образование сварного соединения зависит от степени концентрации напряжений в зоне сварки и может быть интенсифицировано за счет создания искусственных концентраторов напряжений. Наиболее распространенным способом сварки с использованием искусственных концентраторов является сварка с разделкой кромок, причем наилучшие результаты получают, когда одна из деталей имеет V-образный выступ. В зависимости от режима процесса и угла раздел-

ки сварка может протекать с преимущественным оплавлением выступа или с преимущественным внедрением его в другую деталь.

Соединения, сваренные с преимущественным оплавлением, нашли применение при изготовлении изделий, которые в процессе эксплуатации подвергаются значительным нагрузкам, таких как бачки, шаровые емкости и т. п. Соединения, сваренные с внедрением V-образного выступа в деталь, используются при изготовлении декоративных изделий, сувениров, корпусов приборов бытовой техники, так как они характеризуются минимальным гратообразованием. Такая схема сварки позволяет также получить соединение разнородных, несовместимых по своим свойствам и структуре полимерных материалов. При этом «внедряться» должна деталь с большим модулем упругости.

В случае сварки многослойных изделий в пакете повышение качества сварного соединения может быть достигнуто за счет того, что разделка кромок каждой из деталей в пакете имеет угол, изменяющийся по высоте изделия. Выступы-концентраторы с более острой заточкой располагаются в той части изделия, в которой интенсивность ультразвуковых колебаний уменьшается. За счет увеличения концентрации механических напряжений в выступах происходит выравнивание теплового режима на всех контактирующих поверхностях элементов свариваемых деталей.

Концентрация напряжений может быть создана также при увеличении шероховатости контактирующих поверхностей. Так, для повышения качества соединения деталей с плоскими контактирующими поверхностями между ними равномерно насыпают крошку из того же полимерного материала. Частицы полимера, создающие микрзоны повышенного механического напряжения, способствуют возникновению равномерно распределенных очагов повышенной температуры и обеспечивают высококачественное соединение. Для достижения необходимого технологического эффекта в каждом конкретном случае необходимо выбирать оптимальные размеры крошки, ее количество и состав.

## **2.6. ДОЗИРОВАНИЕ ВВОДИМОЙ ЭНЕРГИИ**

Возможность получения сварных соединений определяется количеством тепловой энергии, выделяющейся в зоне сварки, и теплоотводом из этой зоны. Так как количество энергии, выделяющейся в зоне сварки, связано с количеством энергии, подводимой к свариваемому изделию, то возникает необходимость ее дозирования.

Способ дозирования подводимой к деталям механической энергии колебаний определяет схему управления процессом ультразвуковой сварки, состоящую из системы устройств, осуществляющих включение и выключение ультразвуковых колебаний в необходимый момент времени.

В зависимости от того, какой критерий закладывается в основу выбора момента выключения ультразвуковых колебаний, различают следующие схемы управления процессом сварки: по фиксированному времени, по деформационному критерию (по фиксированной осадке) и по кинетической характеристике. В свою очередь, схемы управления по деформационному критерию делятся на схемы сварки по фиксированной осадке, фиксированному зазору, изменению знака ускорения деформирования и по заданной толщине шва.

## **2.7. ВЗАИМНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ СВАРОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА И СВАРИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ**

В зависимости от перемещения волновода относительно изделия УЗС разделяется на прессовую и непрерывную.

Прессовая сварка выполняется за одно движение волновода и применяется как для контактной, так и передаточной сварки.

Непрерывная сварка обеспечивает получение непрерывных протяженных сварных швов за счет относительного перемещения волновода и свариваемых изделий. Она применяется для сварки изделий из полимерных пленок, синтетических тканей, мешков, фильтров и т.д. В этом случае применяется как ручная, так и механизированная сварка. Для непрерывной сварки используются схемы с фиксированной осадкой и фиксированным зазором.

## **2.8. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ПОСЛЕ СВАРКИ**

Сварные соединения высокого качества и со стабильными свойствами могут быть получены при выполнении комплекса мероприятий. При нарушении технологии изготовления сварных соединений в них могут появиться дефекты, проявляющиеся либо сразу после сварки, либо в процессе эксплуатации. Поэтому необходимо осуществлять

контроль на всех стадиях изготовления изделий – от получения и переработки исходного сырья до выпуска готовой продукции.

Внешнему осмотру подлежит все изделие и его сварные соединения для выявления в них всевозможных дефектов заготовок и сборки, а также дефектов формирования швов на поверхности: неравномерности высоты и ширины швов, чрезмерной чешуйчатости, наплывов, подрезов, чрезмерного усиления или ослабления швов, незаваренных кратеров, прожогов, шлаковых включений и пористости, осевых смещений и изломов оси цилиндрических элементов и др. Внешний контроль предельно прост и доступен, позволяет получить до 50 % информации о качестве соединения и ходе технологического процесса, но зависит от квалификации и ответственности проверяющего.

Требование к исходному полимерному материалу заключается в хорошей акустической проводимости, однородности свойств и свариваемости при оптимальных режимах сварки.

Контроль исходного полимерного материала в простейшем случае осуществляется визуально. Например, на изделиях, изготовленных из отходов полистирола, иногда можно заметить «мраморный» рисунок, появление которого объясняется плохим перемешиванием расплавленного материала. Для получения количественных характеристик полимерного материала производят акустические измерения как на образцах свариваемого материала, так и на изделиях.

Нарушение теплового режима технологии изготовления изделий может приводить к их деформации. При этом возможны деформации двух типов. Первый тип определяется смещением (несовпадением) контактирующих при сварке элементов (выступов, пазов, штырей и т. д.) или несовпадением полуформ изделий по контуру. При таких деформациях бракованное соединение может быть обнаружено непосредственно после сварки. Второй тип деформаций – наиболее опасный для изделий из «жестких» полимеров – характеризуется наличием зазоров между сопрягаемыми поверхностями. Приложение статического давления приводит к тому, что зазоры закрываются, однако появляющиеся при этом внутренние напряжения приводят к разрушению изделия в процессе эксплуатации.

Проверка на внутренние напряжения для неокрашенных, оптически прозрачных полимеров состоит в наблюдении изделий в поляризованном свете. Для непрозрачных материалов может быть рекомендовано испытание, заключающееся в погружении изделия в поверхностно-активную жидкость, например в керосин, и наблюдении за выявленными трещинами в материале.

Введение добавок (стабилизаторов, наполнителей смазывающих веществ, пластификаторов и т. д.) при изготовлении изделий может существенно влиять на их свариваемость. Увеличение содержания некоторых из наполнителей (особенно смазывающих веществ) может привести даже к полной потере свариваемости. Таким образом, для обеспечения необходимых свойств сварных соединений необходимо соблюдать тепловой режим сварки и постоянство содержания добавок в исходном материале.

Длительное хранение заготовок, предназначенных для сварки, может существенно изменить физико-химическое состояние их поверхностей и, следовательно, свариваемость. Необходимо стремиться к максимальному сокращению срока хранения, обеспечению температуры хранения в пределах  $0...5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и отсутствию паров химических веществ, взаимодействующих с полимером (керосин, дихлорэтан и т. д.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков С. С. Сварка пластмасс ультразвуком / С. С. Волков, Ю. Н. Орлов, Б. Я. Черняк. – Москва : Химия, 1974. – 264 с.
2. Холопов Ю. В. Ультразвуковая сварка / Ю. В. Холопов. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 152 с.
3. Холопов Ю. В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов / Ю. В. Холопов. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 224 с.
4. Физика и техника мощного ультразвука. Физические основы ультразвуковых технологий / под ред. Л. Д. Розенберга. – Москва : Наука, 1970. – 689 с.

## 2.9. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

**Цель работы.** Ознакомиться с ультразвуковой сваркой неметаллических материалов.

### Указания к выполнению

Ультразвуковые колебания представляют собой упругие волны, распространяющиеся в любой материальной среде, находящейся в твердом, жидком и газообразном состоянии. Возникновение упругих

волн обусловлено тем, что при смещении некоторой точки упругой среды под действием внешнего усилия возникают упругие силы, стремящиеся вернуть точку в положение равновесия.

Типовая ультразвуковая система включает в себя (рис. 2.3):

- ультразвуковой *генератор*;
- электроакустический *преобразователь* (магнитострикционный или пьезоэлектрический);
- *волновод-излучатель*.

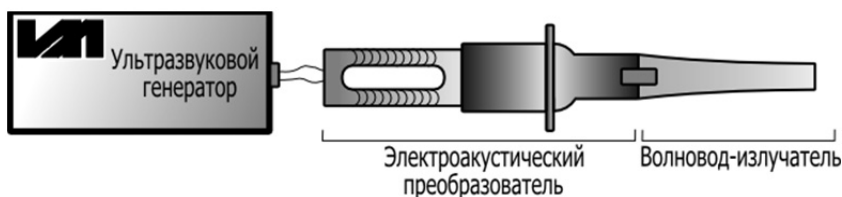


Рис. 2.3. Составные части типовой технологической УЗ-системы

Механизмы, на которых основывается ультразвуковая сварка пластмасс, а также подробное описание составных частей технологической системы УЗ, представлены в разделах 1 и 2.

Ультразвуковая система работает на частоте механического резонанса *акустики* (преобразователь + волновод). Существует ряд ультразвуковых частот, разрешенных к промышленному применению:  $22 \text{ кГц} \pm 10 \%$ ,  $44 \text{ кГц} \pm 10 \%$ . Соответствующие частоты используются в ультразвуковых технологических установках.

Свариваемость отдельных видов полимерных материалов зависит от содержащихся в них наполнителей, красителей, способа получения заготовки и т. п. Условием получения высококачественного соединения при сварке двух полимерных материалов является их приблизительно одинаковая температура плавления и химическое сродство. В табл. 2.1 представлены сведения материалов о свариваемости и пригодности к другим видам соединения с помощью ультразвука на основе различных полимеров.

Практическая работа выполняется на ультразвуковой колебательной системе для сварки полимерных материалов, состоящей из ультразвукового генератора и ультразвукового сварочного пистолета ИЛ 100-7/6. Характеристики системы представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.1

**Способность различных полимеров к соединению с помощью ультразвука**

| Материал                                                      | Сварка     |            | Заклепочное соединение | Прессовое соединение |
|---------------------------------------------------------------|------------|------------|------------------------|----------------------|
|                                                               | контактная | передачная |                        |                      |
| Полистирол                                                    | 1          | 1          | 1                      | 1                    |
| АБС-пластик                                                   | 1          | 2          | 1                      | 1                    |
| Сополимер стирола с акрилонитрилом                            | 1          | 1          | 1                      | 1                    |
| Полиметилметакрилат                                           | 1          | 1          | 1                      | 2                    |
| Поликарбонат                                                  | 1          | 1          | 1                      | 1                    |
| Полиамид                                                      | 2          | 3, 4       | 2                      | 2                    |
| Полиэфир                                                      | 1          | 3          | 3                      | 3                    |
| Поливинилхлорид<br>непластифицированный<br>пластифицированный | 1, 2       | 2, 3       | 2, 3                   | 1                    |
|                                                               | 2          | 4          | 4                      | 3, 4                 |
| Полиэтилен                                                    | 2          | 4          | 4                      | 3, 4                 |
| Полипропилен                                                  | 2          | 4          | 4                      | 3, 4                 |

*Примечание.* Обозначения качества сварного, заклепочного и прессового соединений: 1 – очень высокое; 2 – высокое; 3 – удовлетворительное; 4 – неудовлетворительное.

Таблица 2.2

**Характеристики ультразвуковой колебательной системы для сварки полимерных материалов**

| Параметры              | Значения параметра |
|------------------------|--------------------|
| Рабочая частота, кГц   | 22                 |
| Мощность, кВт          | 0,1                |
| Габаритные размеры, мм | 260×160×45         |
| Вид преобразователя    | Пьезокерамический  |
| Вес, кг                | Не более 0,4       |
| Вид исполнения         | Ручной «пистолет»  |

## **Правила безопасности**

Необходимо выполнять следующие основные правила безопасной работы.

1. Не приступать к работе без внимательного изучения устройства, принципа работы оборудования и правил по безопасности труда, изложенных в руководстве и паспорте данного оборудования.

2. Получить соответствующий инструктаж на рабочем месте по эксплуатации данной установки. Подготовить необходимые приспособления и инструменты.

3. Проверить исправность заземления станка и генератора. Проверить исправность всех проводов и правильность положения рубильников на силовых щитах и шкафах.

4. Проверить наличие, исправность и надежность крепления всех щитков, ограждений и кожухов. Не приступать к работе в случае их отсутствия или неисправности.

5. Проверить исправность сигнализации или блокировки, если таковая предусмотрена конструкцией данной установки.

6. Не открывать щитки, дверцы и кожухи оборудования в случае обнаружения неисправностей. Работы по ремонту электротехнологических установок могут выполняться только лицами, имеющими специальное разрешение (допуск), и только после отключения оборудования от электрической сети.

7. Запрещается ощупывать руками колеблющийся ультразвуковой инструмент и концентратор. Нельзя работать на ультразвуковой установке, если в помещении находится один оператор.

8. Не допускать к работающим ультразвуковым установкам посторонних лиц.

9. Не отвлекаться на посторонние дела.

## **Порядок выполнения работы**

1. Прочитать указания к выполнению работы.

2. Изучить устройство ультразвукового оборудования и техники безопасности на ультразвуковом сварочном оборудовании.

3. Сварить друг с другом при помощи ультразвукового оборудования однородные и разнородные материалы с различным временем сварки.

4. Оценить визуально качество сварного шва.

5. Сделать выводы по работе.

Таблица 2.3

### Результаты эксперимента

| Номер эксперимента | Свариваемые материалы | Время, мин | Описание внешнего вида сварного шва, описание дефектов |
|--------------------|-----------------------|------------|--------------------------------------------------------|
|                    |                       |            |                                                        |
|                    |                       |            |                                                        |

### Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Наименование и цель работы.
3. Схема составных частей типовой технологической УЗ-системы (см. рис. 2.1).
4. Используемое оборудование, постоянные параметры и условия эксперимента.
5. Эскиз образца с основными размерами.
6. Таблица результатов эксперимента (см. табл. 2.3).
7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Физические процессы, на которых основана ультразвуковая сварка пластмасс.
2. Параметры режимов ультразвуковой сварки пластмасс.
3. Достоинства ультразвуковой сварки пластмасс.
4. Требования к материалам, свариваемым ультразвуком.
5. Осуществление контроля сварных швов и изделий после сварки.
6. Составляющие системы ультразвуковой сварки и их назначение.

### 3. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на вырывании частиц с поверхности материала импульсом электрического разряда в результате электрической эрозии. Электрический разряд – высококонцентрированный в пространстве и во времени импульс электрической энергии, преобразуемой между электродом-инструментом и электродом-заготовкой в тепловую. При этом в канале разряда протекают нагрев, расплавление и испарения материала с локальных поверхностей электродов, ионизация и распад рабочей жидкости (рис. 3.1).

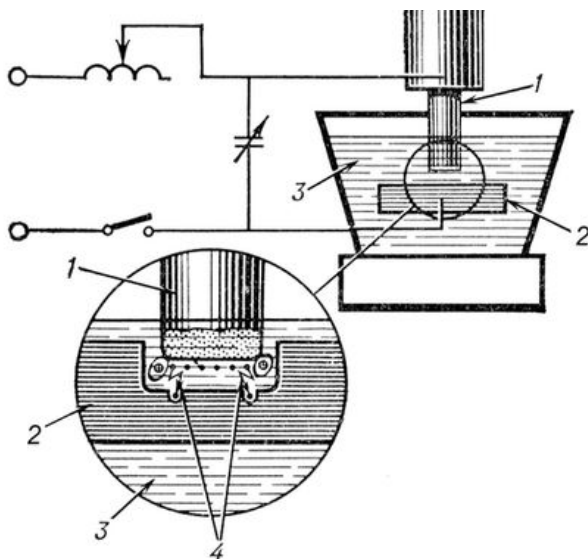


Рис. 3.1. Схема электроэрозионного метода обработки:

- 1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – жидкий диэлектрик;  
4 – электрические разряды

Электроэрозионная обработка имеет следующие преимущества.

1. Возможность изготовления полостей с тонкими стенками и обработка нежестких деталей.
2. Возможность получения сложной геометрии обработанной детали.
3. Обрабатываемость при электроэрозионной обработке не зависит от твердости обрабатываемого материала.
4. После обработки на поверхности не остается заусенцев.

### 3.1. МЕХАНИЗМ УДАЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

При электроэрозионной обработке удаление материала основано на эффекте электроразрядной эрозии, возникающей между двумя электродами, разделенными диэлектрической жидкостью. Удаление металла происходит в результате генерации чрезвычайно высоких температур, создаваемых высокоинтенсивными разрядами, которые плавят и испаряют два электрода.

При электроэрозионной обработке используется искровой и дуговой электрический разряд. При *электроискровой* обработке преобладает искровой разряд и возникает значительная энергия на электроде. Это приводит к тому, что при электроискровой обработке преобладает испарительный механизм разрушения.

При *электроимпульсной* обработке преобладает дуговой разряд, который резко снижает перегрев металла и переход его в парообразное состояние, так как температура канала дугового разряда на 5000...6000 °С меньше, чем при искровом разряде. Поэтому основным механизмом разрушения материала при электроимпульсной обработке является удаление металла в капельно-жидком состоянии.

При *электроконтактной* обработке разрушение обработанного материала происходит под воздействием дуговых разрядов, которые приводят к удалению металла, находящегося в капельно-жидком состоянии, или в результате нагрева и дальнейшего расплавления материала под действием проходящего электрического тока (введением повышения сопротивления на контактирующих поверхностях).

Характер протекания электроэрозионного процесса, количество и состав удаляемого из эрозионной лунки материала, а также скорость его удаления зависят от различных параметров импульсов электрического тока.

Основными параметрами импульсов являются длительность, скважность, амплитуда и частота.

Длительность импульса  $\tau$  определяется временем действия импульса эклектического тока (его продолжительностью). При электроэрозионной обработке длительность импульса составляет от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$  с. Импульсы длительностью  $\tau < 10^{-4}$  с преимущественно используются в электроискровой обработке, а длительностью  $\tau > 10^{-4}$  – в электроимпульсной.

Скважностью импульсов  $q$  называют отношение периода повторения импульсов  $T$  к длительности импульса  $\tau$ :

$$q = \frac{T}{\tau}. \quad (3.1)$$

Величина скважности определяет возможность концентрации во времени значительных энергий и мощностей в зоне обработки. При  $q = 1$  импульсы подводятся непрерывно, поэтому также непрерывно подводится и тепловая энергия к элементарному участку обрабатываемой поверхности. Желательно, чтобы процесс образования отдельной лунки заканчивался несколько раньше начала воздействия следующего импульса. Поэтому диапазон скважностей, применяемых при электроэрозионной обработке, обычно лежит в пределах  $1 \dots 30$ . В электроискровой обработке применяют импульсы скважностью  $q > 5 \dots 10$ , в электроимпульсной –  $q < 5$ . При  $q \geq 30$  считают, что на обрабатываемую поверхность действуют не периодические, а одиночные импульсы энергии.

Частота импульсов  $f$  определяется заданной скважностью  $q$  и длительностью  $\tau$  импульсов и показывает, какое количество импульсов подается в единицу времени:

$$f = \frac{1}{q\tau} = \frac{1}{T}. \quad (3.2)$$

При электроэрозионной обработке используется диапазон частот импульсов  $100 \text{ Гц} \dots 2000 \text{ кГц}$ .

Амплитуда импульсов тока при эрозионной обработке изменяется от долей ампера до десятков тысяч ампер. Амплитуды импульсов

напряжения изменяются в сравнительно широком диапазоне (от десятков до несколько сотен вольт).

Важной характеристикой импульса является его форма. В эрозионной обработке используются импульсы следующих форм (рис. 3.2):

- 1) униполярные с постоянной составляющей (пульсирующий ток) (рис. 3.2, а);
- 2) униполярные (рис. 3.2, б);
- 3) симметричные знакопеременные (рис. 3.2, в);
- 4) несимметричные знакопеременные (рис. 3.2, г).

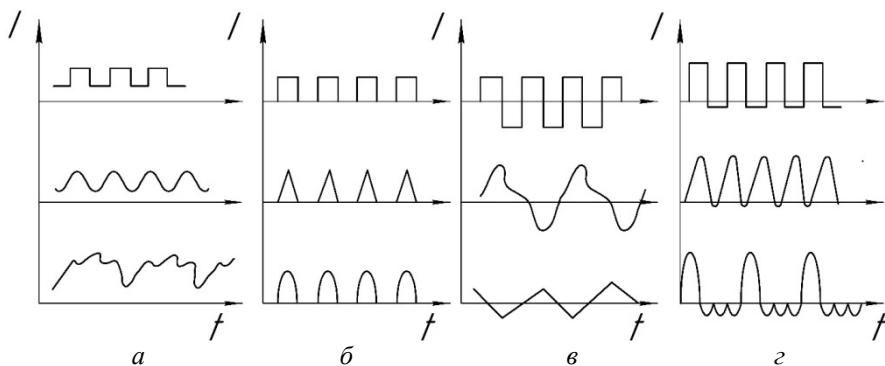


Рис. 3.2. Формы импульсов тока

Импульсы униполярные с постоянной составляющей и униполярные используются в электроимпульсной обработке, несимметричные знакопеременные – в электроискровой обработке, симметричные знакопеременные и униполярные – в электроконтактной обработке.

При электроэрозионной обработке в зависимости от необходимых параметров импульсов применяют различные методы их генерирования. Существует три метода генерации импульсов: электрический, механический и комбинированный.

Электрический метод генерации импульсов используется при электроимпульсной и электроискровой обработке. В этом случае импульсы вырабатываются специальным генератором сильных импульсных токов (генераторы типа RC, RLC, RCLL, CC и др.). При использовании RC-генераторов импульсы напряжения, показанные на рис. 3.3, отвечают за удаление материала.

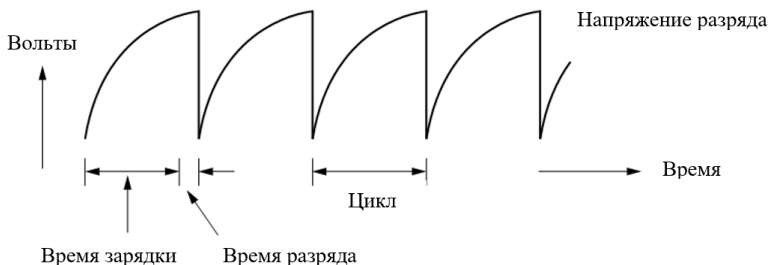


Рис. 3.3. Изменение напряжения во времени с использованием RC-генератора

На рис. 3.4 показаны периодические разряды, возникающие при использовании RC-генератора при ЭЭО.

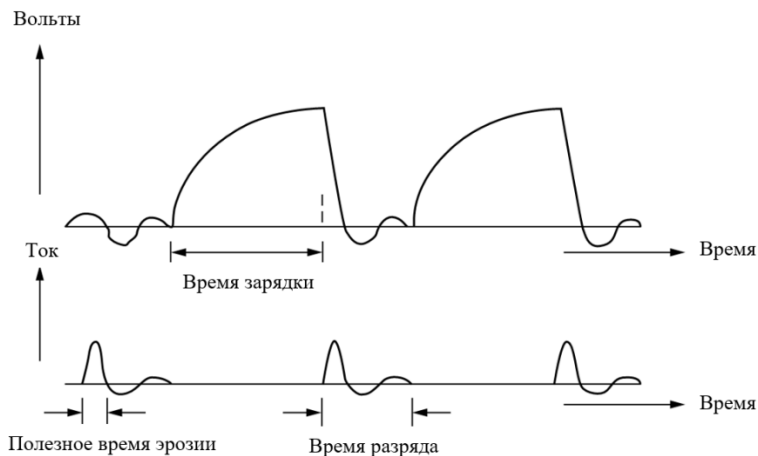


Рис. 3.4. Периодические разряды в генераторе RC-типа

При механическом методе генерирования периодическая подача импульсов в зону обработки обеспечивается относительным механическим движением электродов — заготовки и инструмента, включенных в цепь не импульсного, а постоянного или переменного тока. Вследствие вибрации, вращения или поступательного движения одного из электродов цепь прерывается, что приводит к генерированию импульсного тока. На механическом методе генерирования импульсов основана электроконтактная обработка.

При комбинированном методе генерирования импульсов совмещается источник (генератор) сильных импульсных токов с механическим движением одного из электродов. Роль механического движения в данном случае заключается не столько в генерировании импульсов, сколько в обеспечении обхода инструментом всей обрабатываемой поверхности, облегчении условий уноса продуктов эрозии и стабилизации процесса. Поэтому скорость относительного движения электродов принимают меньшей, чем при механическом методе генерирования импульсов.

Явления, происходящие в межэлектродном промежутке при разрядах, весьма сложны (рис. 3.5). Микрорельеф электродов состоит из большого количества неровностей, причем какие-то две точки всегда являются ближайшими друг к другу. При включении электрического тока между электродами возникает электрическое поле; наибольшую концентрацию оно имеет на наиболее выпуклых и острых выступках.

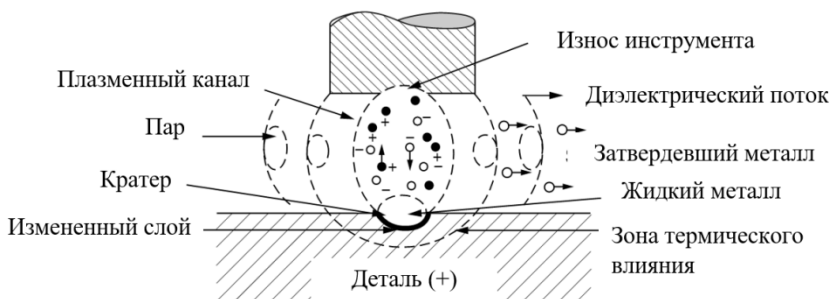


Рис. 3.5. Схематичное изображение микрорельефа поверхности и разрядного канала между электродами

Под влиянием электрического поля между электродами развивается ионизация, которая наиболее интенсивна между ближайшими точками. В результате ионизации нарушается электрическая прочность среды и происходит пробой промежутка. Место, где произошел пробой, представляет собой канал, обладающий высокой электрической проводимостью. Образовавшийся канал соединяет электроды как проводник, и по нему устремляется электрическая энергия. Канал разряда соединяет точки электродов, находящиеся друг от друга на кратчайшем расстоянии. В канале разряда от катода к аноду с большими скоростями движутся отрицательно заряженные частицы –

электроны, а в противоположном направлении – положительные, более тяжелые, ионы.

Сечение канала разряда очень мало. Его расширению препятствует магнитное поле, сжимающее канал, и окружающая среда. Так как расстояние между электродами тоже мало, то объем, занимаемый разрядом, составляет ничтожные доли кубического миллиметра, а плотность энергии достигает значительных величин. Вследствие этого в канале разряда развиваются очень высокие температуры. В местах, где разрядный канал опирается на электроды, происходит интенсивное плавление и испарение металла, и в зоне разряда развиваются значительные давления. Поскольку описанный процесс происходит в очень короткий промежуток времени, то процесс плавления и испарения носит характер взрыва. Силы, развивающиеся в канале разряда, выбрасывают жидкий и парообразный металл из зоны разряда в окружающую жидкую среду. Брызги металла тормозятся в жидкости и, охлаждаясь, застывают в виде шариков различных размеров.

В месте действия импульса тока на поверхностях электродов остаются небольшие углубления – лунки (кратеры), образовавшиеся вследствие удаления разрядом некоторого количества металла.

После прохождения импульса напряжение на электродах падает и начинается процесс деионизации промежутка. Заряженные частицы нейтрализуются, и электрическая прочность среды восстанавливается. Таким образом, промежуток подготавливается к прохождению следующего заряда.

### **3.2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

На рис. 3.6 показаны основные компоненты системы электроэрозионной обработки (ЭЭО). Эти компоненты включают в себя блок сервоуправления подачей инструмента, который поддерживает постоянный зазор обработки, обеспечивающий возникновение активных разрядов между двумя электродами. Источник питания отвечает за подачу импульсов при определенном напряжении, токе, времени работы и времени выключения. Блок циркуляции диэлектрика сбрасывает диэлектрическую жидкость в межэлектродный промежуток после фильтрации от механических частиц.

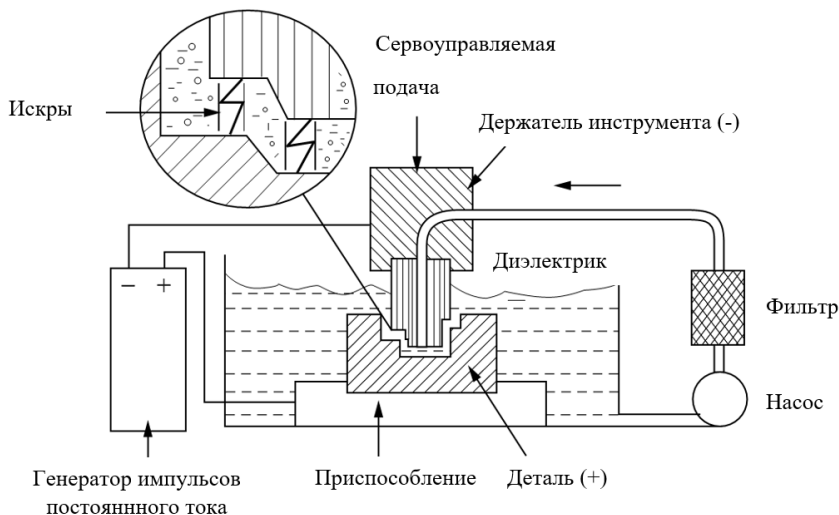


Рис. 3.6. Схема ЭЗО

### 3.3. ЭЛЕКТРОДЫ ПРИ ЭЗО

*Материал электродов.* В качестве инструментальных материалов для ЭЗО выбираются металлы с высокой температурой плавления и хорошей электропроводностью. Графит является наиболее распространенным электродным материалом, поскольку он обладает малым износом и легко поддается механической обработке. Медь имеет хороший износ при ЭЗО и лучшую проводимость. Обычно она используется для окончательной отделки. Вольфрам используется для изготовления глубоких пазов в условиях плохой промывки, особенно в твердых сплавах. Он обеспечивает высокую скорость обработки, а также низкий износ электродов. Латунь характеризуется стабильными условиями искрения и обычно используется для получения небольших отверстий, где допустим высокий износ электрода.

*Движение электродов.* В дополнение к сервоуправляемой подаче электрод может совершать дополнительное вращательное или орбитальное движение. Вращение электрода помогает решить проблему перемешивания диэлектрической жидкости, возникающую при обработке небольших отверстий с помощью ЭЗО. В дополнение

к увеличению скорости резания качество получаемого отверстия превосходит качество отверстия, полученного с использованием стационарного электрода. Орбитальный электрод улучшает эффект промывки, создавая эффект прокачки диэлектрической жидкости через зазор.

*Полярность электродов.* Полярность электрода зависит как от материала заготовки, так и от материала электрода. В табл. 3.1 представлены возможные полярности электродов для различных комбинаций материалов заготовки и инструмента.

Таблица 3.1

**Полярности электродов для различных материалов заготовки**

| Материал электрода | Материал детали |                  |      |          |                         |
|--------------------|-----------------|------------------|------|----------|-------------------------|
|                    | Сталь           | Карбид вольфрама | Медь | Алюминий | Сплавы на основе никеля |
| Графит             | +/-             | —                | —    | +        | +/-                     |
| Медь               | +               | +/-              | —    | +        | +                       |
| Сталь              | +/-             | +                | —    | —        | —                       |
| Латунь             | —               | —                | —    | +        | —                       |

*Износ электрода.* Температура плавления является наиболее важным фактором в определении износа инструмента. Коэффициенты износа электродов выражаются в виде конечного, бокового, углового и объемного износа. Термин «без износа» используется, когда отношение износа электродов к заготовке составляет 1 % или менее. Износ электрода зависит от напряжения, тока, материала электрода и полярности. Изменение формы инструментального электрода из-за его износа вызывает дефекты формы обрабатываемой поверхности. Износ электродов начинает играть еще большую роль, когда дело доходит до применения ЭЭО в микрообработке.

### 3.4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

Рабочая жидкость в процессе электроэрозионной обработки выполняет ряд функций:

- захватывая частицы расплавленного металла и пары металла, выбрасываемые из лунки в процессе электрического разряда, жидкость способствует процессу выноса продуктов эрозии, образованию шаровидной формы гранул. Захват частиц жидкостью препятствует также осаждению продуктов эрозии одного электрода на другой;
- рабочая жидкость удаляет продукты эрозии из зоны обработки, очищает межэлектродный промежуток и таким образом способствует стабильному протеканию процесса;
- рабочая жидкость охлаждает электроды. Важным обстоятельством является также то, что рабочая жидкость резко увеличивает электрическую прочность межэлектродного зазора.

Основными требованиями к диэлектрическим жидкостям при ЭЭО являются невысокая вязкость, высокая температура вспышки, хорошая устойчивость к окислению, минимальный запах, низкая стоимость и хорошая эффективность электрического разряда. Для большинства операций ЭЭО в качестве диэлектрической жидкости используется керосин с определенными добавками, которые предотвращают образование пузырьков газа и неприятный запах. Силиконовые жидкости и смесь этих жидкостей с нефтяными маслами дали также превосходные результаты. В состав других диэлектрических жидкостей входят водные растворы этиленгликоля, вода в эмульсиях и дистиллированная вода.

Состояние диэлектрической жидкости играет важную роль в поддержании стабильной обработки и достижении жестких допусков и высокого качества поверхности. Недостаточное движение диэлектрической жидкости может привести к образованию дуги, уменьшению срока службы электродов и увеличению времени обработки. Существует четыре метода введения диэлектрической жидкости в зазор для обработки.

*Нормальный поток.* В большинстве случаев при ЭЭО диэлектрическая жидкость вводится под давлением через один или несколько отверстий в инструменте и протекает через зазор между инструментом и заготовкой.

Промывочные отверстия обычно располагаются в местах, в которых инструмент наиболее глубоко погружается в деталь. Нормальный поток иногда нежелателен, поскольку он способствует созданию конусности отверстия в заготовке, как это показано на рис. 3.7.

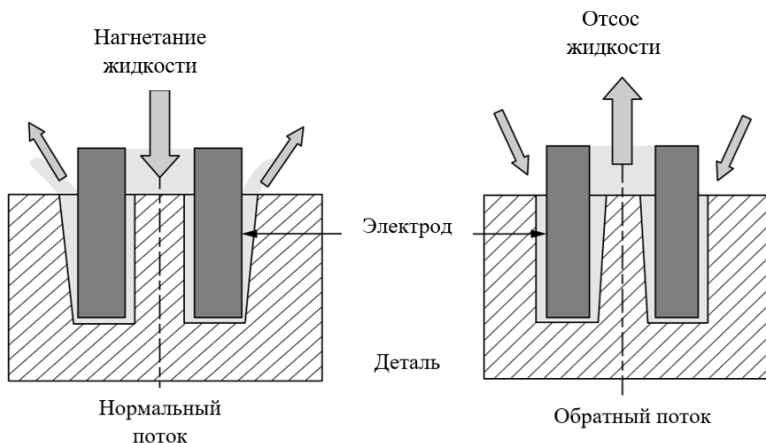


Рис. 3.7. Обычные диэлектрические способы промывки

*Обратный поток.* Этот метод особенно эффективен при обработке глубоких отверстий, где нужно уменьшить конусность. Зазор заполняется диэлектрической жидкостью, но вместо подачи ее под давлением в зону обработки используется отсос. В этом случае чистая жидкость протекает между заготовкой и инструментом, боковое искрение не возникает и, следовательно, конусность, как показано на рис. 3.7, не создается.

*Реактивный поток.* Во многих случаях желаемая точность обработки может быть достигнута при использовании распыления жидкости или создания струи жидкости, направленной в зазор. Следует учесть, что при этом время обработки становится больше, чем при нормальном и обратном режиме прокачки жидкости.

*Погружение.* Для многих мелких резов или перфораций тонких профилей достаточно простого погружения инструмента в жидкость. Охлаждение и обработка, удаление шлама могут быть улучшены во время погружной резки за счет относительного движения инструмента и заготовки: например, вибрация или периодическое прерывание цикла. Для некоторых видов оборудования возможна синхронизированная импульсная промывка. При использовании этого метода промывка происходит только в течение времени зарядки генератора, поскольку в это время необходимо, чтобы электрод немного приподнимался для увеличения зазора.

### 3.5. СКОРОСТЬ СЪЕМА МАТЕРИАЛА

При ЭЭО металл удаляется как с заготовки, так и с электрода инструмента. Как видно из рис. 3.8, скорость удаления материала зависит не только от материала заготовки, но и от материала электрода, а также от переменных обработки, таких как форма импульса, полярность электрода и среда обработки. При этом материал с низкой температурой плавления будет иметь высокую скорость удаления металла и, следовательно, большую шероховатость поверхности. Типичные скорости удаления материала составляют от 0,1 до 400 мм<sup>3</sup>/мин.

На рис. 3.9 и 3.10 показано влияние энергии импульса (тока) и длительности на размер кратера и, следовательно, на скорость удаления материала. Скорость удаления материала, или объемную скорость удаления ( $v_{уд}$ ), приблизительно можно рассчитать в мм<sup>3</sup>/мин по формуле

$$v_{уд} = (4 \cdot 10^4) i T_{\omega}^{-1,23}, \quad (3.3)$$

где  $i$  – ток при электроэрозионной обработке (А);  $T_{\omega}$  – температура плавления материала детали (°С).

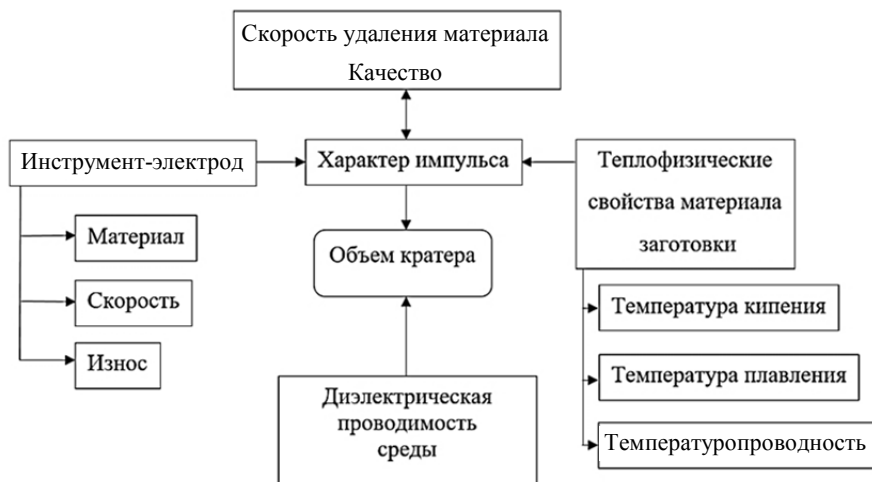


Рис. 3.8. Параметры, влияющие на производительность ЭЭО

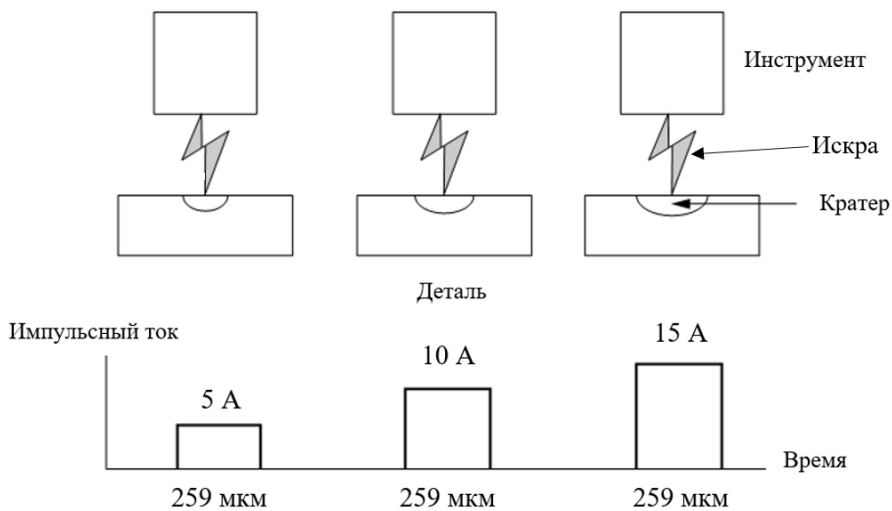


Рис. 3.9. Влияние величины импульсного тока (энергии) на скорость удаления материала

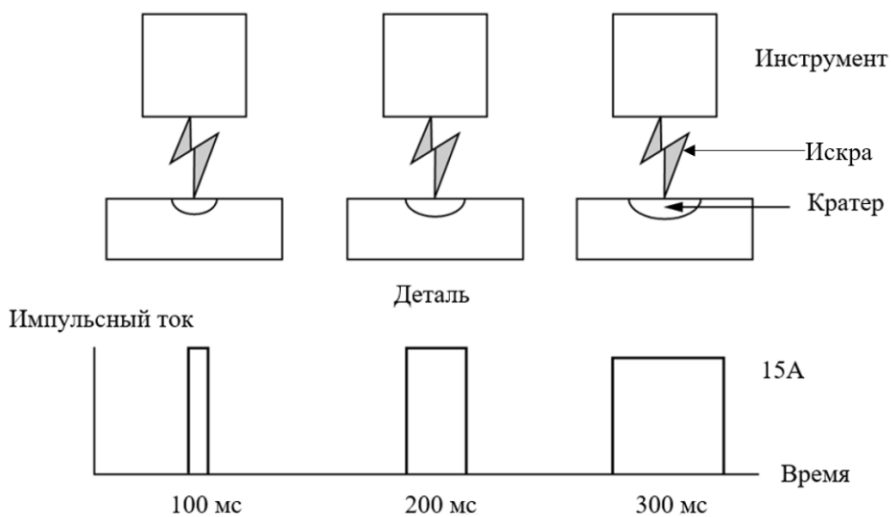


Рис. 3.10. Влияние длительности импульса на скорость удаления материала

### 3.6. ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Обработанная при помощи ЭЭО поверхность состоит из множества перекрывающихся кратеров, которые образуются под действием искровых разрядов микросекундной длительности.

Глубина и размеры этого кратера (лунки) зависят от физико-механических свойств материала и состава обрабатывающей среды, а также от энергии и продолжительности разряда (см. рис. 3.9 и 3.10). Интегральный эффект многих тысяч разрядов в секунду приводит к формированию соответствующего профиля заготовки с заданной точностью и качеством поверхности. Глубина образующихся кратеров обычно представляет пиковую (максимальную) шероховатость поверхности  $R_t$ . Максимальная глубина измененного слоя может быть принята в 2,5 раза больше средней шероховатости поверхности  $Ra$ . Средняя шероховатость может быть рассчитана через импульсный ток  $i_p$  (А) и длительность импульса  $t_p$  (мкс):

$$Ra = 0,0025 i_p^{0,29} t_p^{0,38}. \quad (3.4)$$

Выбор правильной диэлектрической жидкости и скорости ее прокачки в зазоре оказывает значительное влияние на уменьшение шероховатости поверхности, при этом повышает скорость обработки и снижает тепловые эффекты на поверхности детали.

Для снижения значения шероховатости поверхности рекомендуется использование диэлектрических жидкостей с низкой вязкостью.

### 3.7. ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ДЕТАЛИ ПОСЛЕ ЭЭО

Съем металла с электродов происходит благодаря кратковременному электротермическому эффекту. Наивысшие температуры развиваются на поверхности металла и по мере распространения вглубь быстро спадают. Большая часть расплавленного металла и его паров удаляется из зоны разряда, но некоторая часть остается в лунке. При застывании металла на поверхности лунки образуется пленка, по своим свойствам отличающаяся от основного металла (рис. 3.11).

Поверхностный слой лунки, участвующий в расплавлении, активно вступает в химическое взаимодействие с парами жидкой среды, образующимися в зоне высоких температур. Результатом этого

взаимодействия является интенсивное насыщение металла веществами, содержащимися в жидкой среде. При электроэрозионной обработке стальных деталей в среде керосина или масла поверхностный слой стали насыщается углеродом, т. е. образуются карбиды железа.

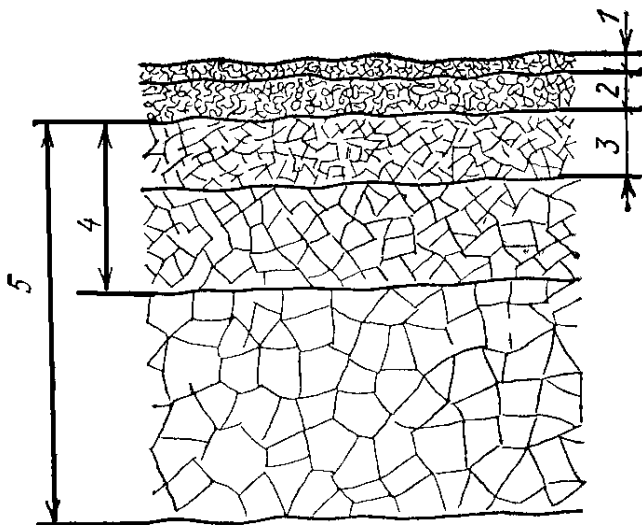


Рис. 3.11. Схематичное расположение зон поверхностного слоя, подвергшегося электроэрозионной обработке:

1 — зона насыщения элементами рабочей жидкости; 2 — зона отложения материала электрода-инструмента; 3 — белый слой, образованный из расплавленного материала заготовки; 4 — зона термического влияния; 5 — зона пластической деформации

Образование второй зоны, которая характеризуется присутствием материала электрода-инструмента, связано с переносом части энергии, состоящей из паров материала электрода-инструмента. Образование этой зоны возможно, как правило, при подключении электрода-инструмента к отрицательному полюсу источника питания в случае электроэрозионной обработки на малых межэлектродных зазорах или такого изменения условий ведения процесса, которое нарушает его стабильность. Материал электрода-инструмента может не только концентрироваться на поверхности заготовки, но и диффундировать

в более глубокие слои, например, в слой расплавленного материала заготовки.

Интенсивный теплоотвод через прилегающие к зоне разряда массы холодного металла создает условия сверхскоростной закалки, что одновременно с науглероживанием приводит к образованию очень твердого слоя. Он имеет мелкозернистую структуру, обладающую высокой химической стойкостью, что затрудняет его выявление путем травления. На микрошлифах этот слой имеет вид белых полос, откуда он и получил свое название «белый слой».

Закаленный поверхностный слой (зона термического влияния) обладает повышенной стойкостью к истиранию и меньшим, чем у обычной стали, коэффициентом трения. Структура поверхностного слоя существенно отличается от основного металла. Его глубина зависит от энергии импульсов, их длительности и теплофизических свойств обрабатываемого материала. При длительных импульсах тока большой энергии глубина слоя измеряется десятками долями миллиметра, а при коротких – сотыми долями миллиметра и даже микронами. Длительность обработки на глубине слоя не сказывается.

В процессе электроэрозионной обработки поверхность металла испытывает значительные ударные воздействия, связанные с перемещением волны напряжений: от расширения и сжатия металла при нагреве и охлаждения обрабатываемой заготовки под действием электрического разряда; от давления газа, образовавшегося в результате испарения рабочей жидкости; от возникающих в процессе обработки электростатических и электромагнитных сил, а также от протекающих в зоне термического влияния структурных изменений и других факторов. Под их воздействием происходит пластическая деформация поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, в ряде случаев выходящих за пределы зоны термического влияния. Зона пластической деформации проявляется в виде измельчения зерен, образования больших дислокаций, а также изменения параметров кристаллической решетки.

Между зонами, как правило, нет четкой разницы, и в большинстве случаев они перекрывают друг друга.

### **3.8. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**

ЭЭО стала незаменимой в современной промышленности. Она позволяет получить сложные формы с высокой степенью точности из труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные сплавы,

суперсплавы и карбиды. Включение ЭЗО в компьютерно-интегрированную производственную систему (СІМ) сократило время, необходимое для работы устройства без остановок на техническое обслуживание.

Микрообработка отверстий, пазов и штампов, поверхностное осаждение, текстурирование, фрезерование являются наиболее распространенными областями применения ЭЗО.

*Бурение.* Для схем бурения при ЭЗО используется трубчатый инструментальный электрод, где диэлектрическая жидкость движется вниз во внутреннее отверстие трубки, чтобы удалить шлам. Когда используются жесткие стержни, диэлектрическая жидкость подается в зону обработки путем всасывания или впрыска через предварительно просверленные отверстия.

ЭЗО можно получать фасонные, конические, изогнутые и наклонные отверстия. Создание каналов охлаждения в лопатках турбины из твердых сплавов является наиболее ярким примером электроэрозионного бурения.

*Резка пилами.* Резка пилами, показанная на рис. 3.12, представляет собой вариант ЭЗО, в котором используется либо специальная стальная лента, либо диск. Этот процесс позволяет разрезать любой электропроводящий материал со скоростью, которая в два раза выше, чем при обычном методе абразивной резки. Полученный срез имеет меньшую ширину реза, кроме того, на нем нет заусенцев.

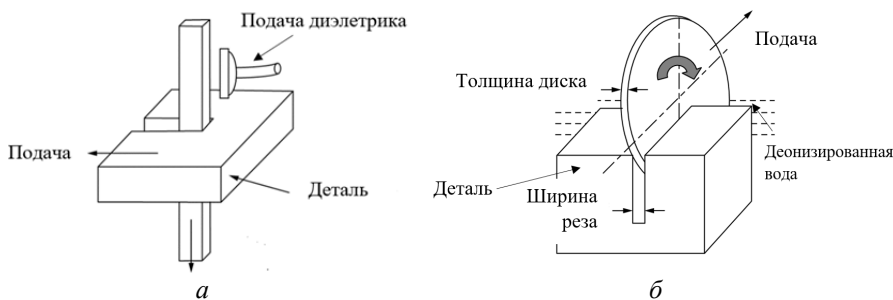


Рис. 3.12. Схемы резки при ЭЗО:

а – ленточной пилой; б – дисковой пилой

*Обработка сфер.* При использовании простых трубчатых электродов при ЭЗО возможно изготовление выпуклой и вогнутой сферы с

точностью до  $\pm 1$  мкм и шероховатостью поверхности менее 0,1 мкм. ЭЭО с вращающимся электродом применяется для обработки сферических форм в токопроводящей керамике за счет взаимного движения инструмента и заготовки, как показано на рис. 3.13.

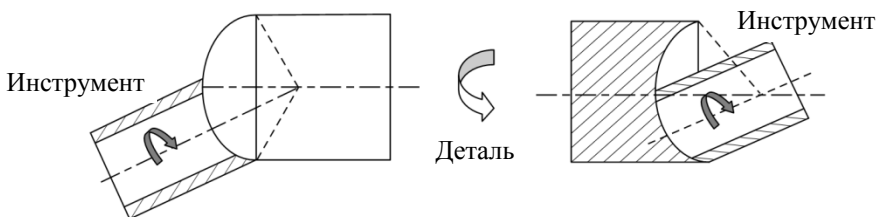


Рис. 3.13. Обработка сфер при ЭЭО

*Электроэрозионное (ЭЭ) фрезерование штампов и пресс-форм.* При ЭЭ-фрезеровании используется стандартный цилиндрический электрод. Сложные полости обрабатываются движением электрода при помощи ЧПУ до желаемой глубины. Электрод простой формы (рис. 3.14) вращается с высокой скоростью и следует по заданной траектории в заготовке как обычная концевая фреза. Этот метод эффективен и делает ЭЭО универсальной, как и процесс механического фрезерования. Этот процесс решает проблему изготовления точных штампов сложной формы для штамповки трехмерных полостей, показанных на рис. 3.15. При ЭЭ-фрезеровании благодаря высокоскоростному вращению электрода улучшается перемешивание диэлектрической жидкости. Износ электрода может быть скомпенсирован благодаря вращательным и контурным движениям электрода. Основным ограничением ЭЭ-фрезерования является то, что сложные формы с острыми углами не могут быть обработаны из-за вращения электрода. ЭЭ-фрезерование также заменяет обычные методы изготовления штампов, которые требуют использования различных станков, таких как фрезерные, проволочные, и штамповочных машин.

*ЭЭО проволокой.* ЭЭО проволочным электродом – это особая разновидность ЭЭО, в которой используется непрерывно движущийся проводящий электрод. Удаление материала происходит в результате искровой эрозии. Проволочный электрод подается из проволочной катушки через заготовку. В большинстве случаев горизонтальное перемещение рабочего стола, управляемого ЧПУ, определяет траекторию реза, как показано на рис. 3.16. Преимущества ЭЭО проволокой позво-

ляет производить обработку сверхтвердых материалов, таких как заготовки из поликристаллического алмаза (PCD), кубического нитрида бора (CBN) и других матричных композитов. Несмотря на широкое использование композитов из углеродного волокна в аэрокосмической, атомной, автомобильной и химической отраслях, их традиционная обработка затруднена из-за расслоения, расщепления, образования заусенцев и короткого срока службы инструмента. Использование проволочной ЭЭО для таких материалов позволяет получить точную форму деталей без искажений и заусенцев.

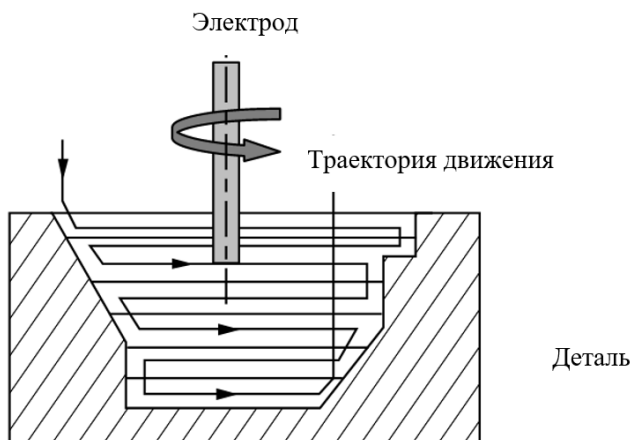


Рис. 3.14. ЭЭ-фрезерование

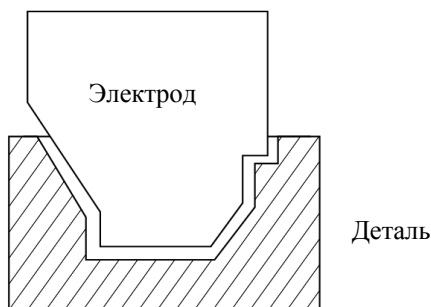


Рис. 3.15. ЭЭО фасонным электродом

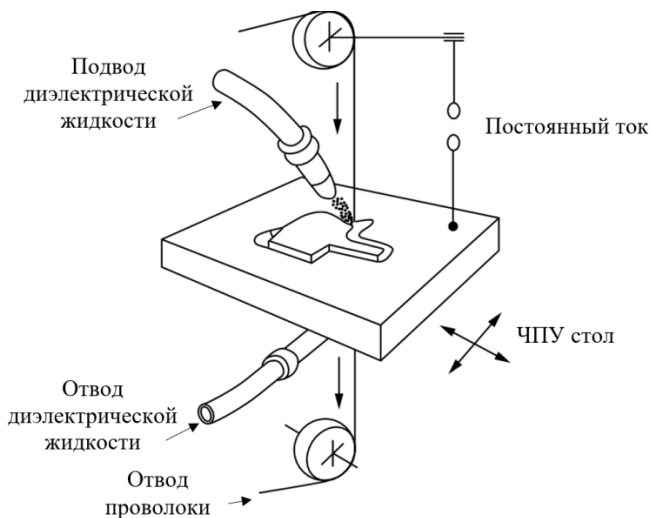


Рис. 3.16. ЭЭО проволокой

*ЭЭО нетокопроводящих материалов.* Изоляционная керамика подвергается ЭЭО с помощью устройства, показанного на рис. 3.17.

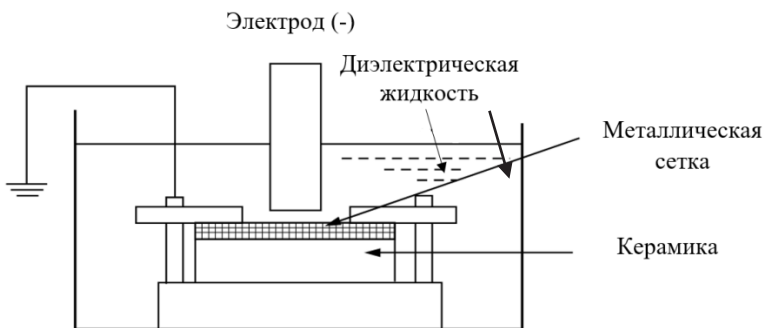


Рис. 3.17. ЭЭО изоляционной керамики

Сетка из листового металла помещается поверх керамического материала. Искровые разряды возникают между отрицательным электродом-инструментом и металлической сеткой. Эти искры передаются через сетку на ее поверхность раздела с керамической поверхностью, которая затем подвергается эрозии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др. ; под ред. В. А. Волосатова. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 719 с.
2. Левинсон Е. М. Электроэрозионная обработка металлов / Е. М. Левинсон. – Ленинград : Лениздат, 1961. – 184 с.
3. Коваленко В. С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / В. С. Коваленко. – Киев : Вища школа, 1975. – 236 с.
4. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. – Москва : Машиностроение, 1980. – 184 с.
5. Hassan El-Hofy. Advanced Machining Processes. Nontraditional and Hybrid Machining Processes / El-Hofy Hassan // The McGraw-Hill Companies, 2005. – 286 с.

### 3.9. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ, ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ОТРАБОТКИ И ИЗНОСА ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

**Цель работы.** Практически ознакомиться с назначением станка, основными его узлами, электрической схемой, производительностью процесса электроэрозионной обработки, шероховатостью поверхности после обработки и определением износа электрода инструмента.

#### Указания к выполнению

Электроэрозионная обработка широко применяется в промышленности при изготовлении деталей из труднообрабатываемых токопроводящих материалов (обработка полостей штампов, пресс-форм, получение отверстий различной конфигурации, изготовление криволинейных щелей и пазов, контурная резка, клеймение, извлечение сломанных инструментов и крепежа из детали и т. д.).

Процесс эрозионной обработки представляет собой разрушение металла или иного токопроводящего материала в результате локального воздействия или кратковременных электрических разрядов между двумя электродами, одним из которых является обрабатываемая деталь, а другим – электрод-инструмент. Под действием высоких темпе-

ратур в зоне разряда происходит нагрев, расплавление и частичное испарение металла.

Более подробно механизм удаления материала и область применения электроэрозионной обработки представлены в разделе 3.

Производительность эрозионного процесса определяется по следующей формуле:

$$P = \frac{V_{31} - V_{32}}{t}, \text{ [г/мин]}, \quad (3.5)$$

где  $V_{31}$  – вес детали до обработки, [г];  $V_{32}$  – вес детали после обработки, [г];  $t$  – время обработки, [мин].

При ЭЭО отклонение получаемого профиля в заданном направлении представлено в основном суммой четырех погрешностей: 1) неточностью взаимного расположения инструмента и детали; 2) нагревом детали и электрода-инструмента; 3) наличием межэлектродного зазора; 4) износом инструмента.

Основное назначение электрода-инструмента при электроискровой обработке – подведение электрических импульсов к месту обработки в направлении электрических разрядов на участки заготовки с целью удаления излишнего материала (припуска), оставленного на обработку.

К материалу электрода-инструмента предъявляются следующие требования: 1) эрозионная стойкость; 2) хорошая обрабатываемость при его изготовлении нужной конфигурации и точности; 3) достаточная прочность; 4) небольшая стоимость материала.

Практически очень трудно обеспечить сочетание в одном материале электрода-инструмента всех этих качеств, и поэтому до настоящего времени выбор материала электрода-инструмента является сложной задачей. Но существуют примерные таблицы применяемости материалов (табл. 3.2).

Выбор материала электрода-инструмента зависит не только от того металла, из которого он изготовлен, но и от того, каким генератором импульсов оснащен станок. При обработке твердых сплавов наибольшая производительность обеспечивается при использовании латунных, вольфрамовых, медно-графитовых электродов, а также вольфрамомедных, молибденомедных и омедненной медно-графитовой композиции.

Таблица 3.2

## Выбор материала катода

| Операция                              | Материал |       |        |       |           |              |          |               |            |        |
|---------------------------------------|----------|-------|--------|-------|-----------|--------------|----------|---------------|------------|--------|
|                                       | Медь     | Чугун | Латунь | Сталь | Углеродит | Медно-графит | Алюминий | Твердый сплав | Ферросплав | Свинец |
| Прошивка малых отверстий              | 0        | –     | +      | –     | –         | –            | –        | –             | –          | –      |
| Прошивка средних отверстий            | +        | +     | +      | 0     | +         | +            | +        | 0             | –          | –      |
| Гравировка по стали                   | +        | 0     | +      | –     | 0         | +            | –        | –             | –          | –      |
| Разрезание                            | +        | –     | +      | +     | –         | –            | –        | –             | –          | –      |
| Шлифование и заточка                  | +        | +     | +      | +     | 0         | 0            | –        | –             | –          | –      |
| Упрочнение инструмента и детали машин | –        | 0     | –      | –     | +         | 0            | –        | +             | +          | –      |
| Роспись по металлу                    | +        | –     | –      | 0     | –         | –            | +        | 0             | –          | +      |

Примечание: + применяется; – не применяется; 0 – ограниченно применяется.

Таким образом, при обработке твердых сплавов электроискровым способом можно рекомендовать изготавливать электроды-инструменты из латуни ЛС-59, меди, чугуна, коксографитовой композиции, а при изготовлении прецизионных отверстий – из вольфрама, но во всех случаях имеется большой износ электрода-инструмента.

Износом электрода-инструмента называется отношение убыли обрабатывающего электрода к количеству материала, снятого с обрабатываемой детали. Износ выражается в процентах.

Зная вес разрушенного металла электрода-инструмента и изделия, можно определить износ электрода инструмента:

$$\gamma = \frac{(V_{э1} - V_{э2})\gamma_3}{(V_{з1} - V_{з2})\gamma_э}, \quad (3.6)$$

где  $V_{э1}$  – вес электрода-инструмента до обработки, [г];  $V_{э2}$  – вес электрода-инструмента после обработки, [г];  $V_{з1}$  – вес детали до обработки, [г];  $V_{з2}$  – вес детали после обработки, [г];  $\gamma_э$  – удельный вес материала электрода-инструмента, [г/см<sup>3</sup>];  $\gamma_3$  – удельный вес материала образца, [г/см<sup>3</sup>].

В табл. 3.3 приведены значения удельного веса некоторых материалов.

Т а б л и ц а 3.3

**Удельный вес материалов**

| Наименование материала | Удельный вес, г/см <sup>3</sup> |
|------------------------|---------------------------------|
| Вольфрам               | 19,3                            |
| Латунь                 | 8,5                             |
| Медь                   | 8,9                             |
| Сталь                  | 7,3                             |

В процессе обработки имеет место не только разрушение детали, но и разрушение инструмента, сопровождающееся искажением его профиля, что в конечном счете приводит к искажению геометрической формы обрабатываемой поверхности.

В первоначальный момент времени разряды, протекающие между поверхностью детали и торцом инструмента, не вызывают заметного изменения формы электрода-инструмента. При углублении инструмента в тело детали на некоторую величину наряду с износом его торцевой поверхности начинается износ и боковых поверхностей. По мере дальнейшего углубления инструмента профиль его все более искажа-

ется, и при выходе торца инструмента с противоположной стороны детали геометрические формы обработанной поверхности резко отличаются от требуемой. Для приближения полученной формы к требуемой обработку продолжают до тех пор, пока торец инструмента не выйдет за пределы детали на величину, равную примерно 1,5...2,0 глубины обработки.

С повышением жесткости режима при одних и тех же материалах инструмента и изделия растет величина износа электрода-инструмента. На величину износа инструмента при прочих равных условиях сильно влияет химический состав материалов электрода-инструмента и изделия.

Работа выполняется на электроискровом копировально-прошивочном станке модели 183 (рис. 3.18). Электроискровой копировально-прошивочный станок модели 183 Ленинградского станкостроительного завода предназначен для обработки полостей и отверстий в токопроводящих материалах вне зависимости от твердости последнего. Станок может быть применен для прошивки отверстий, щелей и полостей в деталях из материалов, труднообрабатываемых обычным способом, из твердых и жаропрочных сплавов, нержавеющей и закаленных сталей, из магнитных сплавов, а также для изготовления сложных фасонных профилей.

На станке могут быть выполнены следующие операции: изготовление отверстий малых диаметров и узких щелей; изготовление фильер; гравировальные работы; удаление обломков механического инструмента (метчиков и сверл) из небольших деталей; вырезание образцов для металлографического анализа; разрезка заготовок небольшого сечения.

Электрическое оборудование находится внутри корпуса станка 1, имеющего форму шкафа. Основание 2 – литое чугунное коробчатой формы. Установка электрода-инструмента, закрепленного в инструментальной головке 3, относительно обрабатываемой детали в нужной точке обеспечивается продольным 4 и поперечным 5 суппортом. Стол 6 для закрепления обрабатываемых деталей рассчитан на нагрузку до 250 кг. Он электрически изолирован от углового кронштейна станка.

На подвижном столе установлена ванна 7 с рабочей жидкостью. Подъем и опускание ванны производится при помощи винта, приводимого во вращение размещенным на основании станка электродвигателем.

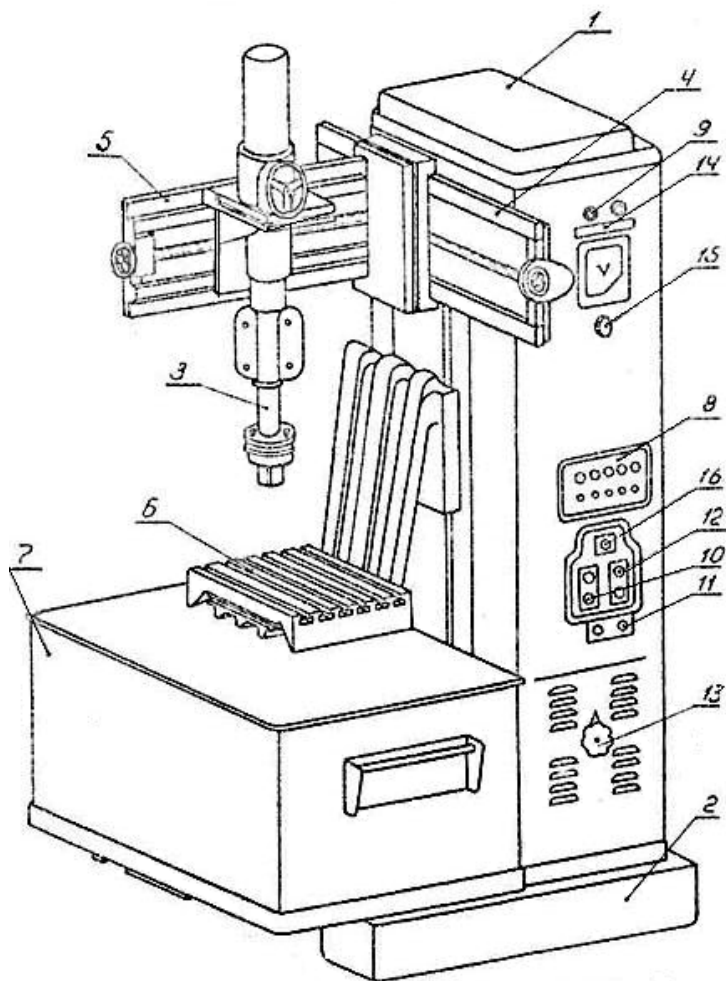


Рис. 3.18. Электроискровой копировально-прошивочный станок модели 183:

1 – корпус станка; 2 – основание; 3 – инструментальная головка; 4 – продольный суппорт; 5 – поперечный суппорт; 6 – стол; 7 – ванна; 8 – переключатель режимов; 9 – сигнальная лампа; 10 – кнопка «ванна вверх»; 11 – кнопка «пуск мотора-генератора»; 12 – кнопка «питание пуск»; 13 – реостат возбуждения; 14 – переключатель «электрод питание»; 15 – регулятор подачи; 16 – кнопка «подъем электрода»

Изделие устанавливается на консольный стол и закрепляется в зажимном приспособлении (тисках) или при помощи струбцин, планок, прихватов и т. п. Инструмент закрепляется в патроне, вставленном в шпиндель вибратора. Стол с изделием имеет ручное наладочное продольное перемещение. Инструмент может перемещаться в поперечном направлении вручную, а в вертикальном – вручную и механически с автоматически регулируемой подачей, причем контроль за величиной углубления электрода осуществляется по индикатору головки. В качестве рабочей жидкости используется веретенное или трансформаторное масло, а иногда керосин. Головка станка может быть повернута относительно горизонтальной оси на угол  $\pm 15^\circ$ . Для отсчета угла поворота предусмотрены шкала и указатель.

### **Необходимое оборудование, приборы, инструменты и материалы**

1. Секундомер.
2. Весы и разновесы.
3. Инструмент для настройки станка.
4. Образцы металла для эрозионной обработки из стали 45 и твердого сплава ВК8.
5. Электроды-инструменты из латуни, меди, чугуна, алюминия или другого материала.
6. Эталоны шероховатостей.

### **Порядок выполнения работы**

1. Определить вес электрода-инструмента и детали до обработки.
2. Установить и закрепить изделие на столе станка.
3. Установить и закрепить электрод-инструмент.
4. Подвести электрод-инструмент к месту, подлежащему обработке.
5. С помощью перемещаемых упоров установить глубину прошивания.
6. Рукоятками переключателя режимов обработки 8 установить заданный режим (см. рис. 3.18).
7. Подать питание (напряжение 380 В), о наличии которого сигнализирует желтая лампа светового табло 9.
8. Кнопкой 10 «Ванна вверх» поднять ванну с рабочей жидкостью в крайнее верхнее положение; остановка происходит автоматически.
9. Кнопкой 11 «Пуск» включить мотор-генератор.

10. Кнопкой 12 «Питание пуск» включить питание.
11. Установить реостатом возбуждения 13 напряжение 220 В, контроль вести по вольтметру станка в положении переключателя 14 «Питание».
12. Переключатель 14 установить в положение «Электрод».
13. После начала работы ручкой 15 «Настройка» добиться устойчивой работы станка; напряжение по вольтметру должно быть в пределах 100...130 В.
14. Зафиксировать величину емкости генератора станка, мФ.
15. Зафиксировать время обработки, мин.
16. После окончания обработки маховичком ручной подачи перевести ползун регулятора вверх, для того чтобы сдвинуть рычажок переключения тумблера в нейтральное положение.
17. Нажатием кнопки 16 «Подъем электрода» отвести электрод-инструмент от обрабатываемого изделия.
18. Выключить питание кнопкой 12 «Питание пуск».
19. Опустить ванну, снять электрод-инструмент и изделие, удалить с них масло и определить их вес после обработки.
20. Записать результаты эксперимента в табл. 3.4, рассчитать производительность процесса, износ электрода-инструмента при различных значениях емкости или для различных материалов.

Таблица 3.4

### Результаты эксперимента

| Номер эксперимента | Емкость, мкФ | Время, мин | Вес электрода-инструмента до обработки, г | Вес электрода-инструмента после обработки, г | Вес детали до обработки, г | Вес детали после обработки, г | Производительность эрозионной обработки, г/мин | Износ электрода-инструмента, % | Шероховатость поверхности, мкм |
|--------------------|--------------|------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                    |              |            |                                           |                                              |                            |                               |                                                |                                |                                |
|                    |              |            |                                           |                                              |                            |                               |                                                |                                |                                |

21. Определить шероховатость полученной поверхности при различных значениях емкости или для различных материалов, записать полученные результаты в табл. 3.4.

22. Построить необходимые графические зависимости производительности процесса, шероховатости поверхности и износа электрода-инструмента от исследуемых параметров.

23. Оформить отчет по работе.

### **Содержание отчета**

1. Титульный лист.
2. Наименование и цель работы.
3. Схема процесса электроэрозионной обработки (см. рис. 3.1).
4. Используемое оборудование, постоянные параметры и условия эксперимента.
5. Эскиз образца с основными размерами.
6. Таблица результатов эксперимента (табл. 3.3).
7. Графики полученных зависимостей.
8. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Физические процессы, происходящие при электроэрозионной обработке.
2. Требования, предъявляемые к материалу электрода-инструмента.
3. Выбор материала электрода-инструмента.
4. Причины износа электрода-инструмента при электроэрозионной обработке.
5. Влияние параметров обработки на производительность процесса.
6. Причины отклонения профиля обработанной детали после эрозионной обработки.

7. Методы измерения шероховатости поверхности после эрозионной обработки.

9. Основные узлы копировально-прошивочного станка модели 183 и их назначение.

9. Влияние параметров эрозионной обработки на шероховатость обработанной поверхности.

## 4. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Электрофизические методы обработки используются для изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов, таких как высокопрочные жаропрочные сплавы, армированные волокнами композитные материалы, стеллиты и керамика. Традиционная механическая обработка таких материалов требует приложения больших сил резания, которые в некоторых случаях могут привести к деформации или разрушению заготовки. Для таких случаев хорошим выходом является применение лазерной обработки (ЛО), так как для нее обрабатываемость материала больше связана с его свойствами – теплопроводностью и удельной теплоемкостью, а также температурой плавления и кипения. Высокая гибкость лазерного оборудования с ЧПУ является дополнительным преимуществом обработки в условиях серийного производства деталей сложной геометрии.

*Достоинства лазерной обработки:*

- отсутствие износа и поломки инструмента;
- возможность получения глубоких отверстий малого диаметра;
- возможность обработки твердых и труднообрабатываемых материалов;
- высокая скорость обработки, а время переналадки небольшое;
- отверстия могут быть просверлены при сложных углах входа ( $10^\circ$  к поверхности);
- процесс может быть легко автоматизирован благодаря своей гибкости;
- низкие эксплуатационные расходы.

*Недостатки лазерной обработки:*

- высокая стоимость оборудования;
- конусность при сверлении отверстий;
- с помощью лазера трудно создать глухое отверстие точной глубины;

- толщина материала, который можно разрезать лазером, ограничена 50 мм;
- необходимость удаления грата.

## 4.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Лазерное излучение – это вынужденное монохроматическое излучение широкого диапазона длин волн от единиц нанометров до десятков и сотен микрометров. Лазерное излучение можно фокусировать в малое пятно, благодаря чему получают высокие плотности мощности (до  $10^6$  Вт/мм<sup>2</sup>).

Как показано в табл. 4.1, на данный момент существует большое разнообразие лазеров, включая твердотельные, ионные и молекулярные, работающие в непрерывном (CW) или импульсном (PM) режиме. Лазеры широко используются во многих промышленных отраслях, в том числе для создания покрытий, при термообработке, легировании, сварке и резке.

Таблица 4.1

Различные типы лазеров

| Тип лазера        |                 | Длина волны, нм | Производительность   |
|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| Твердотельный     | Рубин           | 694             | PM, 5Вт              |
|                   | Nd-YAG          | 1064            | PM, CW, 1...800 Вт   |
|                   | Nd-glass        | 1064            | PM, CW, 2 мВт        |
| Полупроводниковый | GaAs            | 800...900       | PM, CW, 2...10 мВт   |
| Газовый           | CO <sub>2</sub> | 10,6 мкм        | PM, CW, менее 15 кВт |
| Ионный            | Ar+             | 330...530       | PM, CW, 1...5 кВт    |
|                   | Экцимерный      | 200...500       | PM                   |
| Инертный газ      | He-Ne           | 633             | CW, 20 мВт           |

Основные компоненты системы ЛО показаны на рис. 4.1.

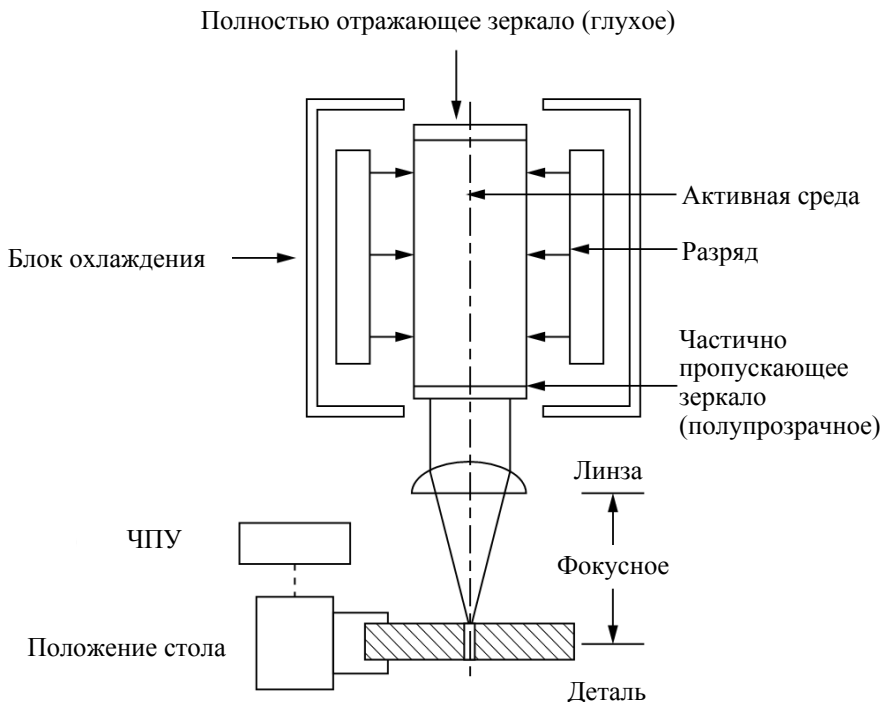


Рис. 4.1. Схема установки при лазерной обработке

## 4.2. МЕХАНИЗМ УДАЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Лазерная обработка основана на том, что лазерное излучение позволяет создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, необходимые для интенсивного нагрева или расплавления практически любого материала.

При воздействии на обрабатываемую поверхность материала часть потока лазерного излучения отражается от нее (рис. 4.2), а оставшаяся часть проникает на малую глубину. Взаимодействие лазерного излучения с обрабатываемым материалом хорошо описывается тепловой моделью, согласно которой весь процесс в целом может быть условно разделен на несколько стадий: 1) поглощение света и преобразование его в тепловые колебания решетки твердого тела за счет теплопроводности; 2) нагревание материала без разрушения; 3) разрушение мате-

риала и разлет образующихся продуктов; 4) остывание после окончания взаимодействия.

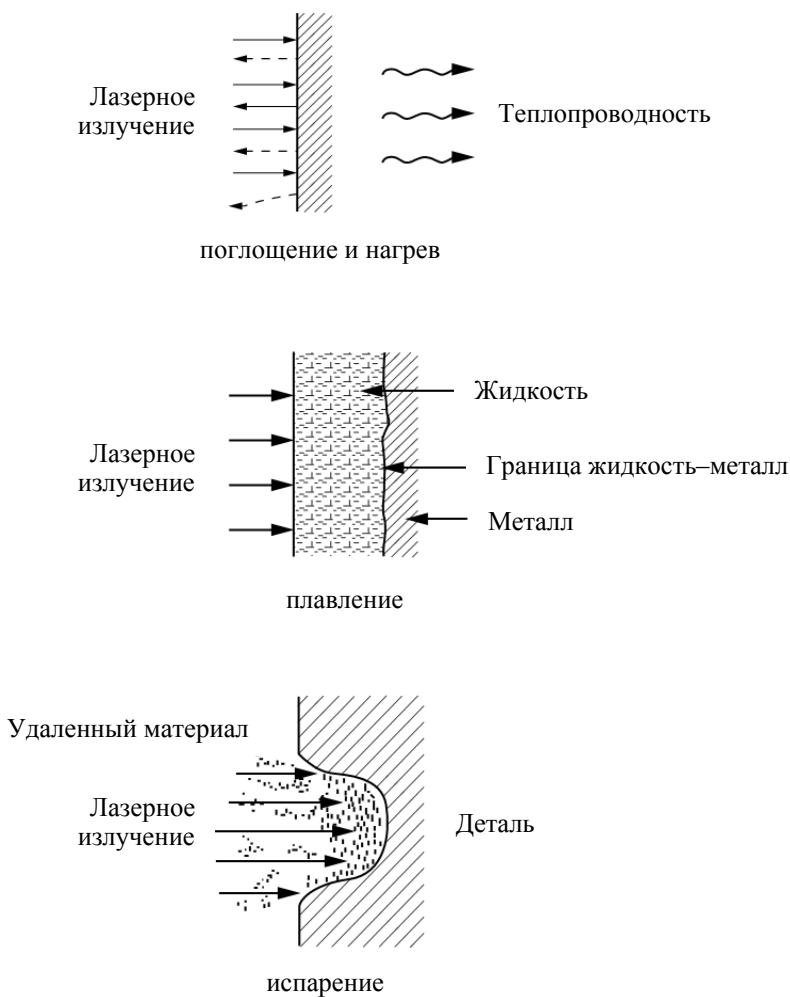


Рис. 4.2. Физические процессы, происходящие во время лазерной обработки

Обработка лазером происходит, когда плотность мощности луча больше, чем та, которая теряется в результате проводимости, конвек-

ции и излучения. Кроме того, излучение должно поглощаться материалом. Плотность мощности лазерного луча,  $P_d$  в импульсном режиме, определяется по формуле

$$P_d = \frac{4L_p}{\pi d_s \Delta T}, \quad (4.1)$$

где  $d_s$  – диаметр пятна лазерного излучения, см;  $L_p$  – мощность лазера, Вт;  $\Delta T$  – длительность импульса лазера, с.

Скорость обработки  $v$  (мм/мин) может быть описана следующим образом:

$$v = \frac{4L_p C_l}{\pi E d_s^2 S}, \quad (4.2)$$

где  $E$  – энергия испарения материала, Вт/мм<sup>3</sup>;  $S$  – толщина обрабатываемого материала, мм;  $C_l$  – постоянная, зависящая от теплофизических свойств материала и эффективности преобразования одного вида энергии в другую.

Объемная скорость удаления материала  $v_{уд}$  (мм<sup>3</sup>/мин) может быть рассчитана следующим образом:

$$v_{уд} = \frac{C_l L_p}{E_v S}. \quad (4.3)$$

При ЛО материал заготовки удаляется посредством нескольких эффектов, включая отражение, поглощение и проводимость света, за которыми следует плавление и испарение. Поведение обрабатываемого материала относительно этих эффектов определяет скорость удаления материала. Отражательная способность зависит от длины волны, свойств материала, качества поверхности, степени окисления и температуры.

## 4.3. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

### 4.3.1. Лазерная обработка отверстий

Композиционные материалы и некоторые сплавы с особыми свойствами широко используются при изготовлении элементов планеров и двигателей самолетов. Суперсплавы часто используются для изготовления компонентов газового тракта авиационного двигателя, таких как лопасти, направляющие фургоны, дожигатели и отливки, при эксплуатации которых может быть достигнута температура 2000 °С.

Разрабатываются и используются современные керамические и титановые сплавы. Такие материалы нуждаются в передовых технологиях при их изготовлении и обработке. Обычное сверление и штамповка оказались неэффективными из-за ударной вязкости материала. Другие нетрадиционные процессы, такие как электрохимическая, ультразвуковая водоструйная и абразивная водоструйная обработка, обладают низкой производительностью и высокой стоимостью инструмента.

С 1970-х годов получение отверстий при помощи лазера зарекомендовало себя как эффективный способ с точки зрения стоимости, качества и надежности для крупномасштабного производства. Получение отверстий лазером выполняется следующими тремя методами.

**А. Прямое (ударное) бурение.** Создает необходимый размер отверстия путем применения одного или нескольких сфокусированных лазерных импульсов. Размер отверстия определяется входной мощностью и настройками фокусировки. Хотя большинство отверстий сверлят одним лазерным импульсом высокой энергии, более эффективно сверлить глубокие отверстия несколькими импульсами низкой энергии.

**Б. С использованием пилотного отверстия.** Состоит из получения пилотного отверстия и последующего увеличения отверстия до необходимого диаметра за счет изменения параметров лазера (путем увеличения размера пятна).

**В. Трепанация.** Используется для больших отверстий. Деталь перемещается или вращается относительно системы доставки лазерного луча или линзы. Из-за низкой энергии каждого импульса величина измененного слоя и величина отклонения от цилиндричности уменьшаются.

**Параметры, влияющие на качество отверстий.** В табл. 4.2 перечислены возможности получения лазером отверстий, а на рис. 4.3 представлены различные факторы, влияющие на качество полученных отверстий.

Таблица 4.2

**Возможности получения отверстий при лазерной обработке**

| Параметры отверстия           | Значения                               |
|-------------------------------|----------------------------------------|
| Диаметр                       | 0,005...1,27 мм, больше при трепанации |
| Глубина                       | 1,7 мм                                 |
| Угол                          | 15...90°                               |
| Конусность                    | 5...20 % от диаметра отверстия         |
| Соотношение глубина/диаметр   | 50:1                                   |
| Глубина бурения (трепанация)  | 6,4 мм                                 |
| Погрешности                   | $\pm 5...20$ % от диаметра             |
| Минимальный радиус скругления | 0,25 мм                                |

Точность и качество размерной лазерной обработки в наибольшей степени определяются объемом жидкой фазы, появляющейся при взаимодействии излучения с металлом, и ее перераспределением при движении по стенкам и дну лунки в конце действия импульса излучения и после его окончания. Толщина слоя жидкой фазы на стенках и дне отверстия обуславливается энергетическими параметрами импульса. Увеличение длительности импульса излучения приводит к образованию в продуктах разрушения большего количества жидкой фазы, существенно затрудняющей управление процессом получения отверстия и увеличивающей разброс параметров отверстий. Чрезмерная длительность импульса (более 1 мс) приводит к значительному росту зоны возможных изменений структуры и свойств материала. Воздействие импульса со значительной длительностью на хрупкие материалы приводит к увеличению зоны термических напряжений и к возникновению трещин. Уменьшение длительности импульса значительно снижает вероятность хрупкого разрушения материала.

Существенное влияние на точность и качество обработки оказывает временная структура светового импульса и форма его огибающей. Оптические системы лазерных установок, служащие для передачи и фокусирования излучения, при правильной юстировке и диафрагмировании части пучка не вносят существенных искажений в форму и размеры поперечного сечения отверстий. В то же время погрешности юстировки соосности лазерного луча и оптической системы могут вызвать искажения распределения интенсивности излучения в области фокусирования и привести к неперпендикулярности оси получаемого отверстия к поверхности обрабатываемой детали, несмотря на ее правильную установку относительно оси оптической системы.

На точность размеров и форму поперечного сечения отверстий в большей степени влияет распределение излучения по углам в пределах диаграммы направленности и распределения интенсивности излучения по сечению луча лазера. Значительным источником погрешности обработки (искажение формы поперечного сечения отверстия) является случайное распределение интенсивности по сечению пучка. Асимметрия угловой расходимости излучения вызывает искажение формы фокального пятна. На форму продольного сечения также оказывает влияние и изменение распределения интенсивности излучения вдоль оси пучка в зоне обработки по мере углубления отверстия.



Рис. 4.3. Параметры, влияющие на качество отверстий, полученных лазером

Кроме энергетических параметров лазерного излучения, на качество получаемой поверхности оказывает влияние и применяемый при обработке вспомогательный газ. Струя вспомогательного газа обычно направляется в область взаимодействия лазерного луча с обрабатываемой поверхностью, чтобы удалить расплавленный материал из области обработки и получить чистый срез. Вспомогательные газы также защищают линзу от брызг удаляемого материала, устанавливая барьер

высокого давления на отверстия сопла. Чистый кислород вызывает быстрое окисление и экзотермические реакции, повышающие эффективность процесса. Выбор воздуха, кислорода или инертного газа в качестве вспомогательного газа зависит от материала и толщины заготовки. Инертный газ, такой как гелий или аргон, следует использовать, если требуется режущая кромка лучшего качества. Следует иметь в виду, что чем меньше диаметр газового сопла и чем меньше его расстояние от поверхности заготовки, тем лучше качество реза. Давление газа также играет важную роль в определении качества и скорости обработки.

Состояние обрабатываемой поверхности и теплофизические свойства материала также оказывают влияние на процесс обработки. Состояние поверхности включает в себя такие характеристики, как отражательная способность и коэффициент поглощения материала. Кроме того, учитываются теплопроводность и коэффициент диффузии, плотность, удельная теплоемкость и скрытая теплота. В связи с этим минимальная энергия лазера, необходимая для испарения пластика, обычно ниже, чем для металлов.

### **4.3.2. Лазерная резка**

Лазерную резку можно выполнять как со сквозным прорезанием материала, так и в виде получения на его поверхности пазов и дорожек.

К лазерной резке можно отнести следующие методы:

- 1) разделительная сквозная резка материалов для получения деталей готовой формы;
- 2) термораскалывание хрупких материалов путем создания в зоне облучения термонапряжений, превышающих предел прочности материала;
- 3) скрайбирование – метод, применяемый для разделения полупроводниковых, керамических и ситалловых подложек на отдельные элементы. Он занимает промежуточное положение между резкой и термораскалыванием.

Классифицировать операции разделения можно и по режимам воздействия излучения на материал. К операциям, проводимым с помощью лазеров непрерывного действия, относят термораскалывание и сквозную резку материала. При выполнении остальных операций используют импульсные и импульсно-периодические лазеры.

Стандартная (коаксиальная) кислородная лазерная резка листов из нержавеющей стали не обеспечивает удовлетворительных характеристик. Грат, который прилипает к нижним краям кромок реза, образует жесткий заусенец, что и ограничивает толщину разрезаемого материала до 3 мм. Для обработки большей толщины нержавеющей стали скорость обработки должна быть снижена. Основными препятствиями при лазерной обработке нержавеющей стали являются низкая текучесть расплава и частично высокая температура плавления оксида хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), что также сдерживает диффузию кислорода на фронте расплава. Для решения задачи лазерной резки нержавеющей стали была разработана схема обработки, в которой используются двойные газовые струи (рис. 4.4) для удаления вязкой ступени на фронте расплава, что позволяет резать нержавеющую сталь быстрее, чище и большей толщины.

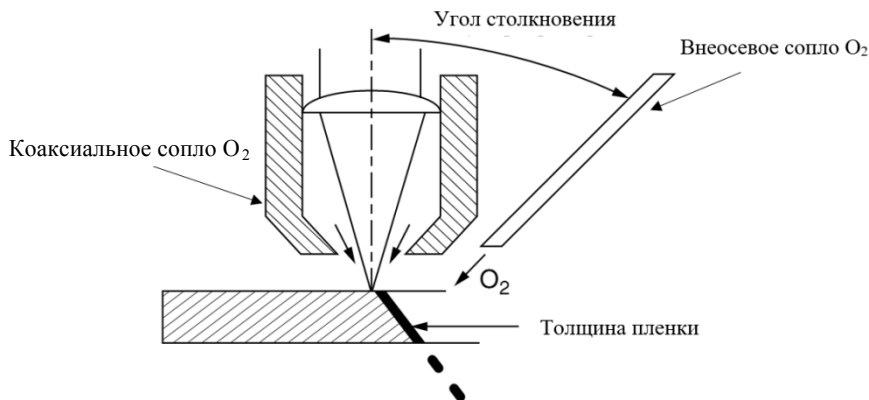


Рис. 4.4. Внеосевая газовая лазерная резка

### 4.3.3. Лазерная маркировка и гравировка

Маркировка – это процесс нанесения определенной информации на детали и изделия с целью их дальнейшего распознавания. Гравировка предназначена для получения надписей, рисунков, а также схематических изображений с целью увеличения срока их использования.

Лазерная маркировка имеет следующие преимущества:

- миниатюрность наносимого знака (размер знака до нескольких десятков микронетров);

- отсутствие механического воздействия на изделие;
- высокая точность и качество нанесения знаков;
- высокая производительность маркировки;
- возможность полной автоматизации процесса.

Лазерную маркировку можно производить по четырем схемам.

*Первая схема* основана на принципе перемещения зоны лазерного воздействия по поверхности материала в соответствии с геометрией наносимого изображения. При этом на обрабатываемом материале образуются бороздки шириной до 800 мкм и глубиной в несколько десятков микрометров. В случае маркировки плотность мощности устанавливается достаточной для плавления материала, а при гравировании увеличивается до частичного испарения материала.

*Вторая схема* основана на сканировании излучения по обрабатываемой поверхности. Знаки наносят точечно-матричным методом. Аналогично способу, применяемому в матричном принтере, изображение формируется из отдельных точек воздействия лазерного луча на поверхность изделия по определенной матрице. Зона лазерной обработки в этом случае представляет собой микролунку диаметром несколько микрометров. Глубина маркировки зависит от мощности лазерного излучения, частоты следования импульсов и скорости перемещения луча. Для увеличения глубины обработки повышают мощность излучения и уменьшают скорость маркировки.

При использовании *третьей схемы* маркировку выполняют с помощью маски. Формирование маркируемого изображения осуществляется путем проецирования лазерного луча сквозь трафаретную маску. Далее изображение переносится уменьшающей его оптической системой на поверхность обрабатываемой детали. Вид маркируемого изображения полностью определяется трафаретным изображением. Для увеличения глубины маркировки в этом случае проводят повторное клеймение. Данную схему используют в ювелирной промышленности.

При использовании *четвертой схемы* маркировку осуществляют с помощью трафарета. В этом случае на обрабатываемую поверхность накладывают трафарет из тугоплавкого материала, контур которого при облучении ограничивает лазерное воздействие на материал. Схема является производительной, однако происходит быстрый износ трафарета и повреждение краевых участков профиля знака при удалении трафарета после маркировки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Зуев, А. Н. Кокора. – Москва : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / под ред. А. Г. Григорьянца. – Москва : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2008. – 664 с.
3. Вейко В. П. Введение в лазерные технологии: опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии» / В. П. Вейко, А. А. Петров. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2009. – 143 с.
4. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / В. С. Коваленко, А. Д. Верхотуров, Л. Ф. Головкин, И. А. Подчерняева. – Москва : Наука, 1986. – 276 с.
5. Вейко В. П. Технологические лазеры и лазерное излучение: опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий» / В. П. Вейко. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007. – 52 с.
6. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – Москва : Машиностроение, 1985. – 496 с.

## 4.4. ПАСПОРТИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МЛ2-1

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

**Цель работы.** Ознакомиться с устройством и работой МЛ2-1 и методикой паспортизации маркировочного лазера.

### Указания к выполнению

Машина лазерной маркировки – это современное высокотехнологичное маркировочное оборудование, которые предпочитает все большее количество предприятий, отдавая должное отличному качеству маркировки и минимальным эксплуатационным расходам.

В зависимости от материала поверхности продукта лазерный луч сжигает материал (бумага, картон, дерево), вносит поверхностное изменение в структуру материала поверхности (стекло, ПЭТ, другие полимеры) или создает химическую реакцию для изменения цвета поверхности (пластмассы, материалы с термочувствительным покрытием). В любом случае результатом этого является четкое контрастное

изображение превосходного качества без изменения во времени, наносимое с высокой производительностью.

Работа выполняется на лазерной машине для маркировки и гравировки МЛ2-1.

МЛ2-1 предназначен для нанесения текстовых и графических изображений на изделия методами лазерной маркировки и гравировки. Машина применяется для художественной и серийной маркировки промышленной продукции и сувенирных образцов, нанесения надписей на приборные панели, мерительный инструмент, клавиатурные поля, для изготовления маркировочных и мнемонических табличек и шильдиков. Дополнительные возможности МЛ2-1 – прецизионная резка тонких фольговых материалов (за счет многократного прохода по контуру), структурирование поверхностей, прошивка отверстий в фольге и фольгированных диэлектриках (опционное программное обеспечение).

Маркируемые материалы: сталь, алюминий, титан, медные сплавы, окрашенные поверхности, керамика, пластмассы, этикеточная самоклеящаяся фольга (tesa laser 6930), аналогичные маркировочные материалы фирмы 3М (3М 7846–7848) и др.

Машина лазерная МЛ2-1 состоит из элементов, представленных на рис. 4.5.

С точки зрения пользователя в лазерной машине (лазерном маркере) можно выделить три основные подсистемы (укрупненно):

- лазерная система;
- сканерно-координатная система;
- управляющий компьютер, работающий под *ОС Windows XP*.

*Лазерная система* обеспечивает требуемые энергетические и пространственные параметры обрабатывающего излучения, заданные требованиями технологии.

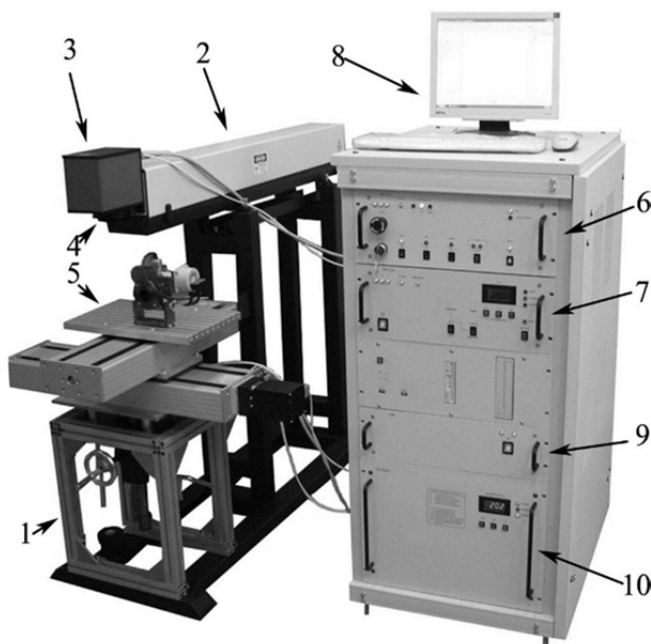
*Сканерно-координатная система* осуществляет заданное перемещение сфокусированного пучка излучения по заданной траектории (чертежу или рисунку) с заданной скоростью и в заданной последовательности. Слово «заданные» здесь означает, что в управляющем компьютере машины имеется заранее подготовленный управляющий файл-задание, в соответствии и под управлением которого используется обработка изделия (например, лазерная маркировка и т. д.).

Файл-задание в системе WeldMARK в соответствии с вышеизложенным состоит как минимум из двух основных частей:

- объектов маркировки (чертежи, рисунки, графические, текстовые и штрихкодové символы, фотографии и любые произвольно скомпо-

нованные изображения из перечисленных объектов). Компьютерное представление объектов описывает и задает путь и последовательность, по которым сканерно-координатная система будет перемещать маркирующий лазерный луч;

– технологической таблицы профилей оборудования, определяющей все рабочие параметры оборудования и режимы обработки (маркировки), т. е. параметры источника питания лазера, блока управления АОЗ, режимы и скорости перемещения сканера для различных используемых режимов маркировки.



*Рис. 4.5. Расположение основных блоков машины МЛ2-1 (комплект с установленными XY-столами и вращателем):*

*1 – каркас с механизмом перемещения по Z и XY; 2 – излучатель лазерный LHCQ.106.111; 3 – блок сканерных дефлекторов RLA-1004; 4 – силовой объектив; 5 – предметный стол с установленным вращателем; 6 – блок управления БКУ2-2; 7 – блок питания лазера ИПЛ6-35; 8 – компьютер управляющий; 9 – блок управления приводами столов; 10 – блок охлаждения СО – 6000 Т*

Оператор может произвольно изменять технологические параметры обработки, запоминать текущие параметры и объекты маркировки, импортировать и редактировать объекты-изображения, сохранять и загружать ранее сохраненные файлы.

В качестве объектов в упорядоченном перечне каждого задания могут присутствовать не только объекты-изображения, но также и некоторые специфические немаркируемые объекты, описывающие дополнительные действия, которые на данном этапе выполнения задания необходимо осуществить (запросы к оператору, к сети, к таймеру, ожидание внешних синхронизирующих сигналов (например, от датчиков конвейера или загрузчика), технологически необходимые задержки, управление приводами вспомогательных столов и оснасток, включение/выключение клапанов пневмосистем и т. д.).

В «автоматическом» режиме управляющий компьютер с помощью координатно-сканерной системы перемещает сфокусированный лазерный луч по заданной траектории и синхронно включает и выключает лазер с требуемыми энергетическими и частотными параметрами, обеспечивает прорисовку (маркировку) заданного объекта-изображения, а также выполняет немаркируемые объекты при их наличии в перечне текущего задания.

В «ручном» режиме оператор может включить или выключить лазер с необходимыми параметрами для фокусировки и настройки положения маркируемой детали и с помощью красного лазера-пилота просмотреть границы контура, занимаемого маркируемым объектом.

### **Оптическая схема**

Лазерный излучатель собран на жестком алюминиевом П-образном основании с торцевыми стенками. На основании излучателя закреплены узлы с оптическими элементами в соответствии с оптической схемой (рис. 4.6), а на передней стенке блок X-Y-дефлекторов (сканерная головка RLA-1004).

Узлы оптических элементов излучателя снабжены механизмами и приспособлениями для юстировки. В излучателе используются квантрон типа QFC.112.4000 или Lagen 033 с эллиптическим позолоченным осветителем, Nd:YAG активный элемент Ø4/100 и лампа накачки типа ДНПЗ-6/90. Модуляция добротности осуществляется с помощью акустооптического модулятора МЗ-321М. В комплект поставки входит набор апертурных диафрагм 5 диаметром 0,8, 1,0, 1,2 мм.

Диафрагма закрепляется на юстировочном устройстве, позволяющем перемещать ее в плоскости, перпендикулярной оптической оси излучения. Дихроичное зеркало 6 пропускает излучение с длиной волны 1,064 мкм и отражает под углом 45° излучение лазера-пилота с длиной волны 0,63 мкм.

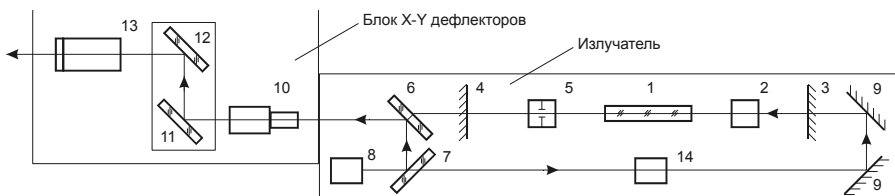


Рис. 4.6. Оптическая схема машины МЛ2-1:

1 – Nd:YAG активный элемент; 2 – акустооптический модулятор МЗ-321М; 3 – заднее зеркало резонатора; 4 – выходное зеркало резонатора; 5 – апертурная диафрагма; 6 – дихроичное зеркало; 7 – зеркало подсветки; 8 – лазер-пилот; 9 – зеркала лазера-пилота; 10 – телескоп (3.5х или 8х); 11, 12 – зеркала X-Y-дефлекторов; 13 – фокусирующий объектив; 14 – фотоприемник (опция)

Квантрон 1 совместно с зеркалами 3 и 4 образует резонатор излучателя. Апертурная диафрагма 5 позволяет выделить моду  $TEM_{00}$  (одномодовый режим), обеспечивающую высокое качество выходного излучения и минимальный размер пятна. При отсутствии диафрагмы 5 выходное излучение лазера многомодовое с повышенной средней мощностью (до 50 Вт). При работе в многомодовом режиме необходимо установить трехкратный телескоп 10. Телескопы предназначены для снижения расходимости выходного излучения.

**Внимание:** запрещается использование восьмикратного телескопа в многомодовом режиме, так как при этом размер лазерного пучка (4...5 мм) превышает размер входного зрачка телескопа (~3 мм), а размер пучка на выходе телескопа (~24 мм) значительно превышает допустимый размер пучка для блока дефлекторов. Нарушение данного требования приведет к перегреву узлов и выходу из строя восьмикратного телескопа, а возможно, и блока дефлекторов.

Излучение лазера может быть промодулировано акустооптическим модулятором 2. Рабочие частоты модуляции 1...50 кГц. Выходное излучение лазера проходит через дихроичное зеркало 6, служащее для совмещения пучка основного излучения ( $\lambda = 1,064$  мкм) и пучка подсветки красного полупроводникового лазера-пилота ( $\lambda = 0,63$  мкм), развернутого на 90° зеркалом подсветки 7. После прохождения через

телескоп 10 пучок излучения попадает на зеркала дефлекторов  $X$ - $Y$ -каналов 11 и 12, разворачивающих пучок по  $X$ - и  $Y$ -координатам соответственно. Объектив 13 ( $f = 165$  мм) фокусирует пучок в пятно размером 80...150 мкм ( $TEM_{00}$ ) или 200...300 мкм ( $TEM_{mm}$ ), перемещающееся по поверхности обрабатываемой детали со скоростью и по траекториям, задаваемым управляющим компьютером. Поворотные зеркала 9 служат для заведения пучка излучения лазера-пилота 8 на оптическую ось излучателя при проведении настроечных и юстировочных работ. Фотоприемник 14 (опция) может быть установлен за зеркалом подсветки 7 или между задним зеркалом 3 и поворотным зеркалом 9. С его помощью можно контролировать выходную мощность (в относительных единицах), стабильность работы, правильность юстировки положения акустооптического модулятора 2.

Оптическая система блока  $X$ - $Y$ -дефлекторов включает зеркала  $X$  11 и  $Y$  12 каналов и фокусирующий объектив 13. Блок дефлекторов крепится к кронштейну, закрепленному на передней стенке излучателя с помощью трех пар винтов, позволяющих проводить небольшую юстировку положения блока дефлекторов относительно излучателя. В комплект поставки входит восьмикратный телескоп с входной апертурой 2,5 мм, который ввинчивается в обойму кронштейна на юстировочном столике в передней части излучателя (перед блоком дефлекторов). Общий вид излучателя и типовая схема представлены на рис. 4.7а и 4.7б.

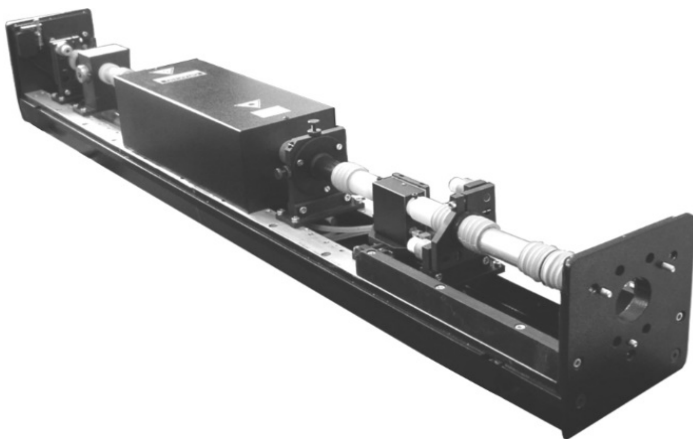


Рис. 4.7а. Излучатель лазерный LHCQ.106.114 – общий вид без крышки, телескопа и блока сканерных дефлекторов

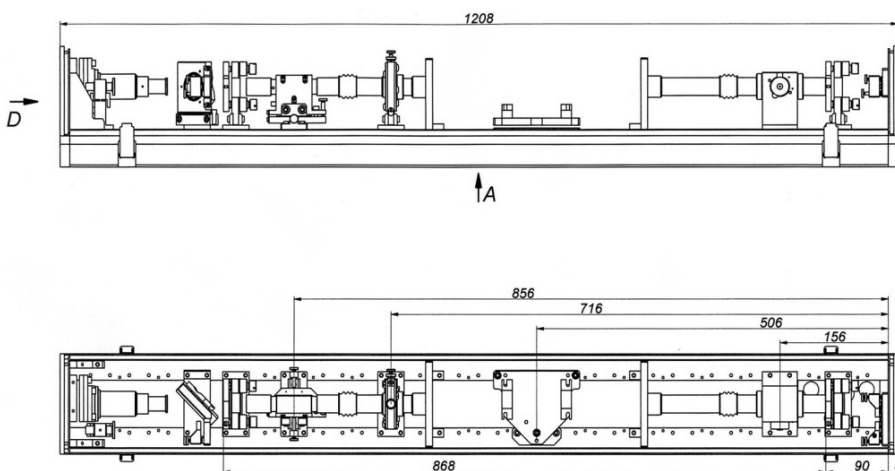


Рис. 4.76. Излучатель лазерный LHCQ.106.114. Типовая схема расположения элементов

### Кинематическая схема

Кинематическая схема включает в себя приводы сканерных дефлекторов, приводы координатных XY-столов и механизм вращательного приспособления. Все компоненты синхронизируются и управляются от встроенного компьютера из программы управления и маркировки WeldMARK v.1.0.4. Гальванодвигатели дефлекторов закреплены на специальном юстируемом кронштейне внутри блока сканерной головки RLA-1004 (рис. 4.8). Установка и настройка положения дефлекторов, а также замена или настройка положения зеркал осуществляется только изготовителем (RayLase, Германия) или его представителями на специальном стенде. Управление дефлекторами осуществляется от блока управления, выполненного на трех платах, закрепленных непосредственно внутри блока сканерной головки на верхней торцевой крышке-радиаторе. Блок дефлекторов является неразборным и не содержит внутри настраиваемых пользователем элементов. Блок запечатан гарантийной пломбой-наклейкой изготовителя или поставщика.

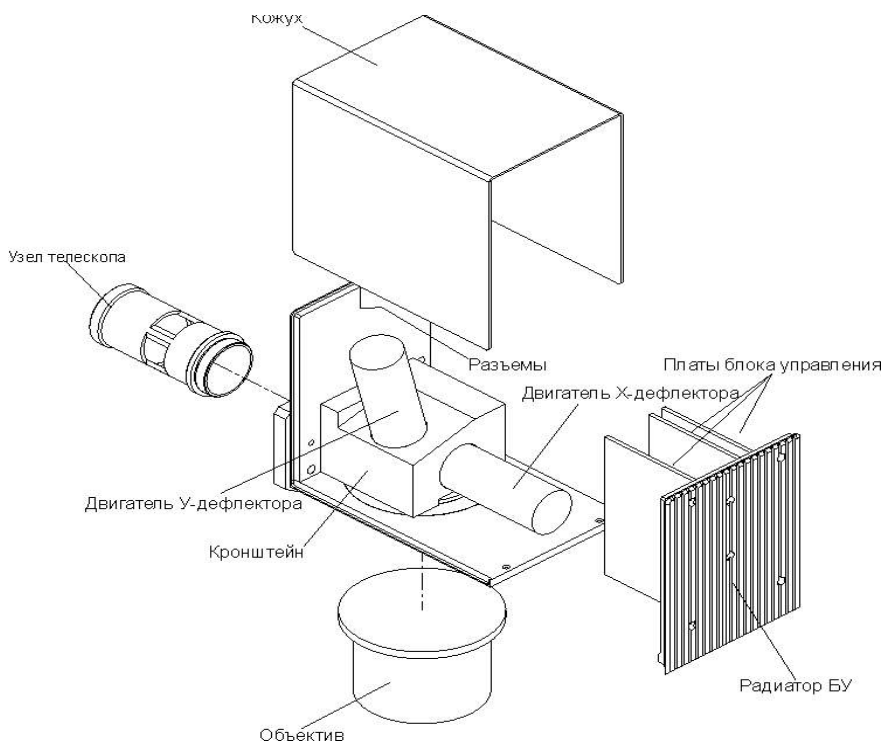


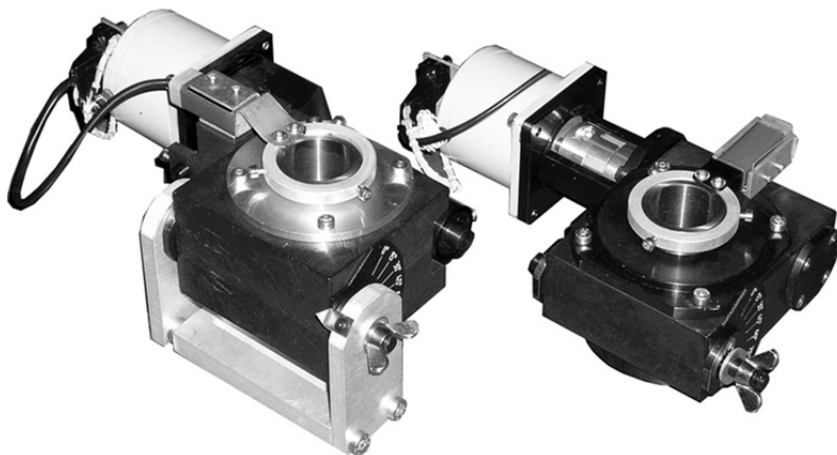
Рис. 4.8. Блок X-Y-дефлекторов. Схема расположения элементов

Деталь крепится на предметном столике (рис. 4.9), закрепленном на подвижной каретке линейных X-Y-столов или на каретке вращающегося стола. При этом обеспечивается возможность перемещения деталей под силовым объективом сканерной головки в пределах, определяемых размерами столов и программными установками координатной системы в WeldMARK. Опционное вращательное приспособление с управляемым приводом на шаговом двигателе предназначено для маркировки небольших деталей вращения, закрепляемых в стандартные инструментальные цанги ( $\varnothing 2 \dots 40$  мм) или зажимной патрон  $\varnothing 80$  мм (опция). Для установки цангового зажима, малых патронов вращательное приспособление имеет посадочное гнездо под конус Морзе № 4.



*Рис. 4.9.* Стол координатный X-Y 400×300. Выставка перпендикулярности по X-Y

Вращательное приспособление устанавливается на рабочем столе под нужным углом к оси движения линейного стола и обеспечивает регулировку своей оси вращения в пределах от 0 до 90° по отношению к вертикальной оси лазерного луча (рис. 4.10).



*Рис. 4.10.* Вращательные приспособления для лазерных станков серии МЛ

## Электрическая схема

Все силовое электрооборудование машины расположено в отсеках стойки питания и охлаждения. Электрооборудование машины включает в себя следующие блоки с повышенным энергопотреблением:

- блок коммутации и управления БКУ-2-2 с источником питания АОЗ (ИПАОЗ) и блоком питания сканера;
- блок питания ламп накачки лазера ИПЛ 6-35;
- блок управления двигателями приводов (БУД);
- система охлаждения СО – 6000 Т;

Машина подключается к розетке или отдельному автомату распределительного щита «3×220/380 В 50 Гц 7.5 кВт» силовым кабелем «СЕТЬ 380 В» блока БКУ-2-2. Кроме того, к болту заземления на корпусе машины или опорного кронштейна должна быть подведена шина защитного заземления сечением не менее 10 мм<sup>2</sup>. Подключение всех остальных блоков к цепям электропитания осуществляется через розетки, расположенные на задней панели блока БКУ-2-2. На задней панели блока БКУ-2-2 расположен защитный автомат «СЕТЬ 380В», при включении которого сетевое напряжение подается на главный пускатель блока. Все блоки в исходном состоянии отключены от сети. При повороте ключа подачи электропитания (расположен слева на передней панели блока БКУ-2-2) в положение «ВКЛ» (или «1») пускатель блока БКУ-2-2 подает электропитание на следующие розетки и соединители, расположенные на задней панели блока:

- «220 В», две розетки для подключения компьютера;
- «ИПЛ, 380 В»;
- «СО, 380 В».

При нормальном состоянии цепей электропитания в верхней части передней панели блока БКУ-2-2 должны быть подсвечены три желтых индикатора («А», «В», «С»), указывающих на наличие фаз сетевого напряжения, и зеленый индикатор нормальной работы БКУ («БКУ ВКЛ.»), а также отключены красные индикаторы блокировок: по охлаждению («СО»), открытой крышке излучателя («ИЗЛ.») и линиям внешних блокировок («ВНЕШН.»).

Включение электропитания всех блоков, установленных в корпусе БКУ-2-2, рис. 4.11, 4.12 (лазер-пилот, узел управления ЭМЗ излучателя, блок управления опционными приводами, блок питания сканера и источник питания АОЗ), осуществляется индивидуальными переключателями на передней панели БКУ-2-2.

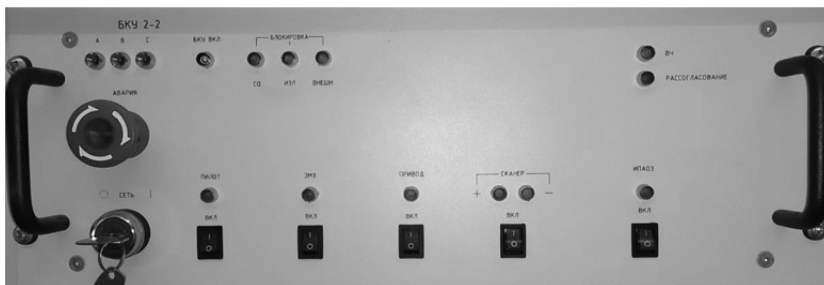


Рис. 4.11. Элементы включения и управления на передней панели БКУ2-2



Рис. 4.12. Расположение элементов включения и разъемов на задней панели БКУ-2-2

С целью защиты АОЗ от перегрева (например, в случае отсутствия охлаждения и возможного выхода АОЗ из строя при последующей подаче охлаждающей воды) включение источника питания ИПАОЗ блокируется, если разомкнута цепь блокировки по системе охлаждения. Включение нужных блоков на панели БКУ-2-2 рекомендуется проводить в направлении «слева направо» (от ключа), выключение – в обратном порядке (к ключу).

В случае возникновения непредвиденных или аварийных ситуаций полное отключение машины от сети можно также осуществить красной кнопкой «АВАРИЯ» («EMERGENCY STOP»), расположенной в верхнем левом углу панели управления БКУ-2-2.

Источник питания ИПЛ 6-35 (рис. 4.13) и система охлаждения СО – 6000 Т подключаются к силовым розеткам «ИПЛ, 380 В» и «СО, 380 В» поставляемыми силовыми кабелями со специальными разъемами.

Включение источника питания лампы накачки ИПЛ 6-35 производится желтым переключателем «СЕТЬ» на передней панели ИПЛ (рис. 4.13) (при включенном автомате защиты блока, расположенном на задней панели ИПЛ). Поджиг лампы накачки в дежурном малотоковом режиме осуществляется красной кнопкой «ПОДЖИГ», расположенной справа на передней панели ИПЛ. Поджига лампы не произойдет, если разомкнута цепь блокировки системы охлаждения излучателя или цепь блокировки самого излучателя (микропереключатель «БЛОКИРОВКА» под кожухом на задней панели излучателя).

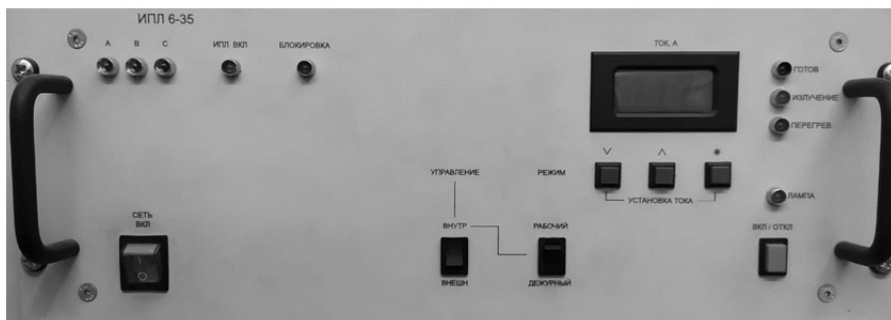


Рис. 4.13. Расположение элементов включения и разъемов на передней панели ИПЛ 6-35

Элементы включения электропитания системы охлаждения СО – 6000 Т (автомат защиты «СЕТЬ ВКЛ.» и переключатель «СЕТЬ ВКЛ/ВЫКЛ.», расположенные на задней панели СО) должны быть всегда включены при нормальной работе. Таким образом, система охлаждения всегда включается первой при повороте ключа управления электропитанием на БКУ-2-2 и выключается последней, обеспечивая достаточное охлаждение лампы накачки.

## Гидравлическая схема

Гидравлическая схема машины изображена на рис. 4.14.

Система охлаждения типа «вода–вода» поддерживает заданный тепловой режим работы лазерного излучателя и обеспечивает автономную диагностику температур и расходов охлаждающей воды в лазерном контуре (дистиллированная вода) и в контуре теплосброса (водопровод, оборотная вода, автономный или цеховой контур).

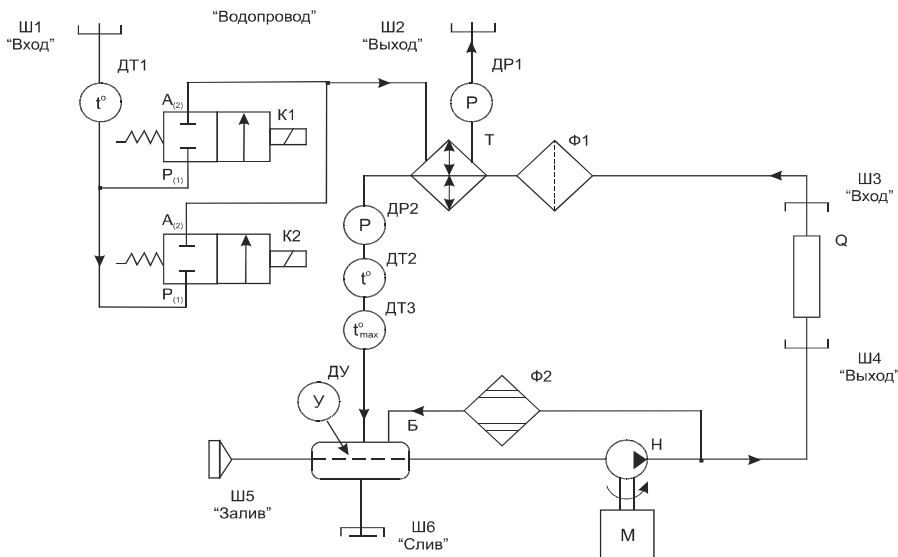


Рис. 4.14. Схема гидравлическая:

$K_1$  и  $K_2$  – электроклапан распределительный;  $T$  – теплообменник типа «вода–вода»;  $H$  – насос центробежный;  $ДР2$  – датчик протока первичного контура;  $ДР1$  – датчик протока вторичного контура;  $Б$  – бак расширительный (12 литров);  $ДТ1$  и  $ДТ2$  – датчики системы термостабилизации;  $Q$  – охлаждаемый квантрон;  $ДТ3$  – датчик предельной температуры (50 °C);  $\Phi 1$  – фильтр механической очистки;  $\Phi 2$  – фильтр ионообменный

При снижении расхода, превышении заданных температурных границ, падений уровня воды в бачке микропроцессор СО выдает необходимые диагностические сообщения на индикатор, а в аварийно-опасных ситуациях включает звуковой сигнал и сбрасывает сигнал «ГОТОВНОСТЬ». Двухконтурная система охлаждения подключается к квантрон  $Q$  излучателя гибкими шлангами (штуцера первичного контура ШЗ «ВХОД» и Ш4 «ВЫХОД») и к водопроводу (оборотной воде) (штуцера Ш1 «Вход» и Ш2 «ВЫХОД»). Все основные блоки системы охлаждения смонтированы на 19" каркасе, установленном в нижней части стойки питания и охлаждения.

## Программное управление

При выполнении большинства задач маркировки управление машиной МЛ2 осуществляется от встроенного управляющего компьютера.

Такой подход дает следующие преимущества:

- обеспечивается быстрый подбор и оптимизация технологических параметров за счет программной настройки в широких пределах с возможностью одновременного использования разных технологий на одной детали без вмешательства оператора;
- осуществляется качественное выполнение маркировки, в том числе и по сложным контурам и при совместной работе сканерной головки и координатных оснасток;
- реализуется воспроизводимость за счет поддержания стабильных технологических параметров и сохранения отлаженных технологий;
- осуществляется быстрая смена заданий с возможностью мгновенного восстановления технологических параметров, сохраняемых в компьютере;
- легко реализуется групповая обработка или сопряжение с конвейерными и технологическими линиями или коммуникационными сетями;
- существенно снижается нагрузка и воздействие вредных факторов лазерного излучения на оператора;
- реализуется возможность программной самодиагностики и контроля оборудования;
- значительно облегчается и ускоряется процесс обучения операторов;
- при необходимости можно быстро получить нестандартное решение за счет изменения или дополнения программы.

Физическое управление машиной при маркировке осуществляется программно через следующие порты и контроллеры:

- управление блоком  $X$ - $Y$ -дефлекторов – контроллер SPICE;
- управление координатными  $XU$ -столами – через контроллер PCIX-004.

Управляющая программа написана для компьютера, программно и аппаратно совместимого с IBM PC. Управляющая программа WeldMARK работает из-под Windows.

Компьютер должен иметь:

- объем ОЗУ – не менее 256 МБ;
- объем видеоОЗУ – не менее 32 МБ;
- тип видеокарты – SVGA;
- операционная система Windows-XP Ru.

После запуска программы появится окно интерфейса полного редактирования WeldMARK, состоящее из следующих пунктов:

- заглавное меню,

- меню,
- линейки,
- панели инструментов,
- рабочее пространство,
- строка состояния,
- прокрутка,
- ярлыки активных заданий,
- менеджер заданий,
- менеджер объектов,
- менеджер профилей,
- управление двигателем.

**Основные условия безопасности.** Особым требованием по технике безопасности при работе на машине лазерной маркировки МЛ 2-1 является работа оператора в специальных защитных очках со стеклами СЗС-22.

## **Порядок включения и выключения**

1. К работе на машине МЛ2-1 допускается только подготовленный и обученный персонал при полной исправности всех цепей, узлов, блоков и наличии необходимых средств защиты (защитные очки со стеклами СЗС-22 или аналогичные).

2. Проверить подключение машины к внешним коммуникациям (вода, слив, вытяжная вентиляция, заземление). Включить необходимые коммуникации.

3. При выключенном блоке питания лазера включить электропитание машины, включив главный выключатель на передней панели блока БКУ-2-2. При этом должна включиться система охлаждения СО – 6000 Т.

4. При необходимости проверить параметры лазерного излучателя и произвести юстировку и настройку.

5. Включить компьютер.

6. На появившейся панели выбрать значок программы WeldMARK.

7. Включить блок питания лазера в «ДЕЖУРНОМ» режиме и выставить требуемые параметры работы в соответствии с описанием на ИПЛ 6-35.

**Внимание!** При необходимости (например, в случае призывного мигания цифрового индикатора с частотой 1 Гц) произвести самокалибровку блока ИПЛ в «МЕСТНОМ» режиме, нажав и удерживая в течение двух секунд кнопку «\*» на ИПЛ. После этого в течение 10 с в ИПЛ настроить таблицы

соответствия реального тока задаваемому, после чего перейти в режим ожидания. Показания на индикаторе не мигают.

8. Установить требуемый для работы силовой объектив.

9. Загрузить в «Менеджер заданий» требуемое задание, при необходимости откорректировать рабочие параметры (профили) в соответствии с «Описанием программы управления WeldMARK».

10. Сделать пробный прогон рабочего задания на пробных образцах. При необходимости скорректировать параметры и настроить процесс на пробных образцах.

11. Работать строго в соответствии с инструкциями управляющей программы.

12. По окончании работы выключить блоки питания ИПЛ 6-35, БКУ-2-2 и другие блоки, снять детали со стола автозагрузчика.

13. Навести порядок на столе машины, убрать изделия и удалить технологическую пыль.

14. При необходимости проверить состояние стекла силового объектива. Удалить пыль мягкой безворсовой тканью. При сильном загрязнении протереть тканью, смоченной спиртом этиловым ректифицированным, ГОСТ 5962–67.

### **Особенности подготовки задания на маркировку**

Предполагаемое маркируемое изображение должно быть выполнено в векторном формате. Для этого используется Компас 3D, CorelDraw. Если на изображении подразумевается заливка каких-то элементов, то обязательно контур этих элементов должен быть замкнутым.

Не допускается повторное наложение линий на контуре. Это наиболее частая ошибка при подготовке изображения для маркировки в векторном формате.

Область маркировки для установки МЛ2-1 составляет  $110 \times 110$  мм. Рисунок не должен быть больше этого размера. Если кроме рисунка необходимо еще и нанесение текста, то его можно выполнить как в графическом редакторе, преобразуя в вектор, так и непосредственно в самом программном продукте для управления установкой для лазерной маркировки и гравировки МЛ2-1.

## **Последовательность выполнения работы**

1. Включить установку согласно пункту включения и выключения.
2. Рабочее поле маркировки (зона обработки по осям  $XU$ ). Загрузить файл и маркировать деталь. Измерить штангенциркулем перемещение по  $X$ ,  $U$  по краям и в центре.
3. Размер выводимого знака или изображения. Загрузить файл и маркировать деталь. Измерить минимальный размер, используя стереомикроскоп МБС-10. Измерить максимальный размер, используя штангенциркуль.
4. Шаг перемещения по координатам  $X$ ,  $U$ . Маркировать линию с минимальным шагом. Измерить на МБС-10.
5. Виды маркируемых материалов. Оценка визуальная. Материалы: нержавеющая сталь, конструкционная сталь, алюминий, в том числе анодированный.
6. Размер пятна излучения вдоль обработки оценивается по испарению пленки металла. Измерить на МБС-10.
7. Программное обеспечение. Поддерживаемые стандартные форматы растровых и векторных изображений.
8. Стол координатный. Максимальное перемещение по  $X$  и  $U$ . Максимальная скорость перемещения. Использовать секундомер для измерения времени перемещения стола по координатам.

## **Содержание отчета**

1. Титульный лист.
2. Наименование и цель работы.
3. Используемое оборудование, постоянные параметры и условия эксперимента.
4. Эскиз маркируемого задания.
5. Режимы маркирования.
6. Выводы по работе.

## **Контрольные вопросы**

1. Основные блоки машины МЛ2-1.
2. Порядок включения и выключения машины МЛ2-1.
3. Техника безопасности при работе на машине МЛ2-1.
4. Основные параметры процесса лазерной маркировки и их влияние на качество обработки.
5. Особенности подготовки задания для маркировки на машины МЛ2-1.

## 5. ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ

### 5.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА

Комбинированные методы обработки относятся к особому классу технологических процессов, вызванных к жизни все повышающимися требованиями к эффективности производства и качеству изделий. Совершенствование конструкций машин, а также успехи в создании высокопроизводительных материалов определили задачи, которые с помощью традиционных методов обработки материалов резанием решить не удается.

Электроалмазное шлифование (ЭАШ) – комбинированный метод обработки, основанный на управляемом микроразрушении обрабатываемого материала в электрическом поле при одновременном действии алмазных зерен шлифовального круга, электролитического растворения и электроэрозии (рис. 5.1).

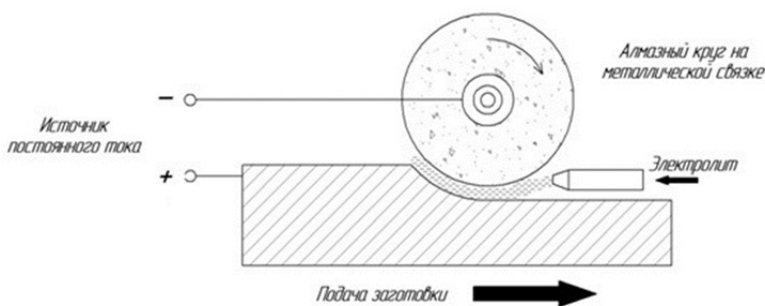


Рис. 5.1. Схема электроалмазного шлифования

Токопроводящая связка шлифовального круга и обрабатываемая деталь – это два электрода в электрической цепи. В зазоре между ними возникают явления, обеспечивающие микроразрушение обрабатываемого материала.

мого материала и изменение рабочей поверхности инструмента: микрорезание алмазными зернами, электрохимическое растворение, электроэрозия и контактное оплавление. Важную роль при этом играют свойства среды, заполняющей межэлектродный промежуток: состав электролита, его температура, насыщение электролита паром и газами, наличие в нем продуктов шлифования и износа круга, продуктов химических реакций и т. д.

## 5.2. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОЛИТУ

Важнейшим условием проведения процесса электрохимической обработки с высокой производительностью и при сравнительно малой энергоемкости является правильный выбор электролитов. Электролит, как известно, в процессе электрохимической обработки выполняет несколько функций. Во-первых, он является средой, в которой происходят химические процессы и содержатся проводящие ток ионы, необходимые для протекания электрохимических процессов. Во-вторых, поток электролита выносит из рабочей зоны продукты анодного растворения металла и пузырьки газа, одновременно охлаждая электроды.

Электролиты образуются растворением в воде веществ (солей, щелочей, кислот), которые диссоциируют там на ионы. Приложенная разность потенциалов приводит ионы в движение, и в цепи возникает электрический ток.

К подбору электролитов необходимо подходить исходя из требований обеспечения высокой производительности. Кроме того, при выборе растворов электролитов для электроалмазного шлифования учитываются такие параметры, как pH среды, электропроводность, ионный состав соответствующих солей, кислот или щелочей. Водородный показатель pH используемого электролита определяется химическим составом обрабатываемого материала. Так, электрохимическое растворение сталей с высокой скоростью происходит в кислотных растворах ( $\text{pH} < 7$ ), а при использовании электролита с щелочной средой ( $\text{pH} > 7$ ) процесс растворения сталей практически прекращается, что объясняется явлениями пассивации поверхности обрабатываемого материала. Кислотные растворы электролитов обладают высокой электропроводностью, что также ведет к увеличению скорости растворения обрабатываемых материалов. Однако применение кислотных электролитов ограничено по причине их агрессивного воздействия на персонал и используемое технологическое оборудование. В связи с этим наибольшее распространение в практике

электроалмазной обработки получили нейтральные водные растворы неорганических солей ( $\text{pH} = 7$ ).

Учитывая катионный и анионный составы электролитов, можно сформулировать следующие условия их выбора:

- состав электролита не должен приводить к осаждению металлических катионов на поверхности катода. Для этого необходимо, чтобы катионы металла, входящие в состав электролита, обладали наибольшим стандартным отрицательным потенциалом ( $-\varphi_0$ ), к ним относятся катионы натрия ( $\text{Na}^+$ ) или калия ( $\text{K}^+$ ). В этом случае на поверхности катода протекает реакция восстановления с выделением в качестве конечного продукта газа, а именно водорода;

- анионный состав электролита должен обеспечить протекание на аноде реакции анодного растворения, для чего необходимо, чтобы электролиты содержали анионы, обладающие высокими положительными стандартными потенциалами ( $+\varphi_0$ ), к ним относятся анионы:  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{ClO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и др.

Известно, что в практике электрохимической обработки применяются электролиты не только на водной основе, но и на основе органических растворителей. Из всего разнообразия органических растворителей необходимо использовать те, которые обеспечили бы требуемые высокие технологические показатели и устойчивое протекание процесса электрохимической размерной обработки. Специфика электрохимической обработки определяет ряд ограничений в применении тех или иных органических растворителей: по токсичности и давлению паров растворителя, по запаху, по экономическим показателям. В связи с этим такие электролиты не получили широкого применения в технологии электрохимической обработки в силу определенной токсичности растворителей и их дороговизны.

### 5.3. ГИДРОДИНАМИКА ЭЛЕКТРОЛИТА

На производительность электроалмазной обработки существенное влияние оказывают такие факторы, как гидродинамика течения электролита в межэлектродном промежутке, температура электролита, степень его газонаполнения и уровень загрязнения продуктами анодного растворения и др.

Перенос вещества связан с протеканием тока между кругом и деталью. На прямой полярности под действием электрического поля поло-

жительно заряженные ионы металла отводятся от поверхности детали (анода), а отрицательно заряженные устремляются к ней.

Например, в условиях электрохимической размерной обработки скорость движения электролита связывают с толщиной диффузионного слоя у поверхности анода и, как следствие, с точностью обработки. Когда скорость реакции определяется скоростью диффузии, достигается значительно меньшая плотность тока, чем при прокачке электролита. Но поскольку скорость течения электролита по зазору распределяется неравномерно, то возникает неравномерное распределение тока, приводящее к неравномерному локальному съему. Однако отмечается, что существует такая область скорости протекания, в пределах которой скорость растворения уже не зависит от скорости электролита. Она называется областью электрохимической кинетики. При постоянном потенциале превышение этой оптимальной скорости протекания не влияет на скорость растворения.

В то же время возможны такие местные снижения скорости электролита, при которых на соответствующих участках анодной поверхности растворение идет по законам диффузионной кинетики, обуславливающей уменьшение скорости растворения обрабатываемого материала.

Происходящее в процессе обработки перемешивание электролита насыщает или обедняет приэлектродные пространства, что влияет на диффузию ионов, а значит, и на скорость реакции.

## **5.4. РАБОЧИЙ ЗАЗОР**

Характер явлений, порождаемых протеканием электрического тока через межэлектродный зазор, во многом зависит также от свойств материалов и характера поверхностей электродов. Из этого следует, что рабочая поверхность алмазного круга, а именно количество и свойства его зерен, а также свойства связки, должна отвечать условиям эффективности алмазного шлифования и удовлетворять требованиям электрофизических и электрохимических процессов.

Межэлектродный зазор в условиях шлифования алмазными кругами с большими нормальными давлениями характеризуется рядом особенностей.

Под влиянием повышенных нормальных давлений (200...250 МПа) зерна алмазного круга внедряются в обрабатываемый материал на значительную глубину. Поэтому расстояние между токопроводящими по-

верхностями связки круга и обрабатываемого материала уменьшается. Считается, что в условиях электроалмазного шлифования величина межэлектродных зазоров составляет 0,03...0,04 мм. При этом возможен контакт отдельных неровностей связки круга и обрабатываемой поверхности, т. е. значения межэлектродных зазоров могут изменяться от наибольшего предельного до нуля. Следовательно, при больших нормальных давлениях величина межэлектродного зазора устанавливается столь незначительной, что без вращения кругов протекание электролита было бы невозможным. В условиях электрохимической обработки это связано с тем, что молекулярное воздействие стенок охватывает весь объем электролита в зазоре, в результате чего резко возрастает гидродинамическое сопротивление. Отсюда следует, что вращение круга является необходимым условием перемещения электролита относительно обрабатываемой поверхности.

Сплошность потока электролита в малом зазоре многократно нарушается из-за наличия режущих зерен, внедряющихся в обрабатываемый материал, из-за срезания стружки, наличия неровностей связки и обрабатываемой поверхности, величина которых соизмерима с расстоянием между средними линиями контактирующих профилей. Поэтому поток электролита в рассматриваемом случае не может быть ламинарным. Это обуславливает интенсивное перемешивание электролита и обновление его в слоях, примыкающих к обрабатываемой поверхности.

Рабочий зазор определяет эффективность обработки в целом. Во всех случаях он должен надежно обеспечивать удаление продуктов анодного растворения с обрабатываемой поверхности. Кроме того, при уменьшении зазора и увеличении точек контакта круга с деталью уменьшается напряжение между электродами, что, в свою очередь, ведет к уменьшению плотности тока, проходящего через зону шлифования, и является причиной снижения интенсивности процесса электрохимического растворения.

## **5.5. РАЗРУШЕНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА. РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ**

При электроалмазном шлифовании в межэлектродном зазоре протекают сложные электрохимические и электрофизические процессы, в результате которых удаляется припуск. Условия электроалмазного шлифования определяются напряжением технологического тока, ха-

рактической стороной круга, номинальной площадью его контакта с обрабатываемой деталью и режимами резания. Между электрическими и механическими параметрами обработки существует определенная связь.

При оптимально подобранных режимах обработки основная часть припуска (до 80 %) удаляется в результате электрохимического растворения, а остальная часть – в результате микрорезания зернами алмазного круга и электроэрозионного воздействия на обрабатываемую деталь.

Оптимальные электрические режимы реализуют низкие напряжения (6...9 В) для избежания значительных электроэрозионных процессов на обрабатываемой поверхности и высокую плотность тока порядка (80...100 А/см<sup>2</sup>). Оптимальной скоростью резания при ЭАШ является  $v = 22...25$  м/с. Дальнейшее увеличение скорости практически не увеличивает производительность, но при этом резко увеличивает износ алмазного круга.

Важным режимным параметром ЭАШ является и удельная нагрузка круга на деталь, в основном определяющая значение межэлектродного зазора, а следовательно, и протекание сопутствующих анодному растворению процессов микрорезания и электроэрозии.

Известно, что температура электроалмазного шлифования ниже, чем при традиционном шлифовании, что особенно заметно при значительных глубинах обработки. При традиционном шлифовании температура равномерно увеличивается с возрастанием глубины резания. При ЭАШ до некоторой глубины температура практически не возрастает, а при дальнейшем увеличении глубины обработки интенсивность роста температур приблизительно соответствует обычному шлифованию, так как наступает процесс «смешанного» шлифования.

## 5.6. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭАШ

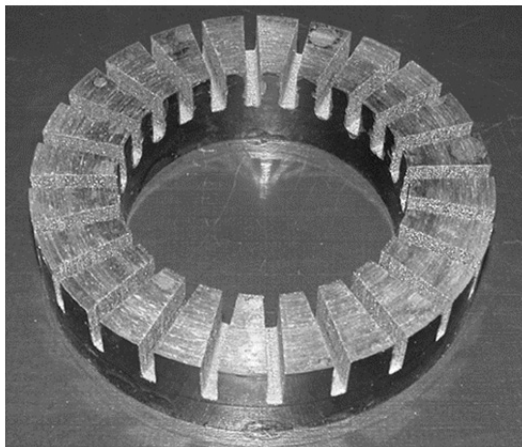
Интенсивное удаление обрабатываемого материала обеспечивает повышение производительности в 1,5...10 раз по сравнению с алмазным шлифованием. Однако оценка электроалмазного шлифования только с точки зрения повышения его производительности не является исчерпывающей. К основным требованиям, предъявляемым к исследуемому процессу, следует отнести и износостойкость алмазного круга. В ряде случаев в зависимости от требуемых условий шлифования она может оказаться основным эксплуатационным свойством, характеризующим качество шлифовального круга.

Под действием сил резания, температур и вибраций, возникающих в процессе обработки, круг изнашивается, теряет первоначальную форму, изменяет режущие свойства. Эти явления отражаются не только на интенсивности съема припуска и себестоимости операции, но и на качестве шлифованных поверхностей. Следовательно, стойкость круга определяет как технико-экономическую, так и физическую сторону процесса шлифования. В большинстве случаев износостойкость кругов при электроалмазном шлифовании оказывается значительно выше, чем при алмазном.

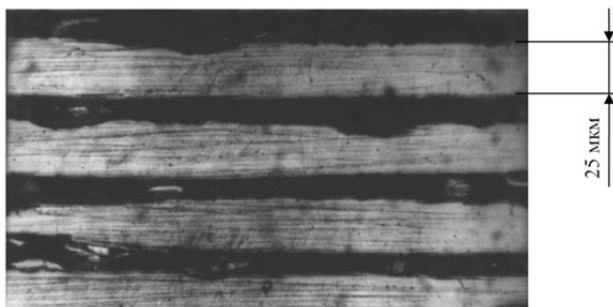
## **5.7. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Необходимо отметить, что процесс электроалмазного шлифования рекомендуется для обработки труднообрабатываемых материалов – твердых сплавов, жаропрочных, нержавеющей сталей, а также магнитомягких материалов.

В частности, данный метод обработки был использован при решении задачи прорезки пазов магнитопровода (рис. 5.2). Данная конструкция представляла собой чередующиеся тонкие (25...30 мкм) слои аморфной либо нанокристаллической ленты и непрочной нетокопроводной связки (рис. 5.3).

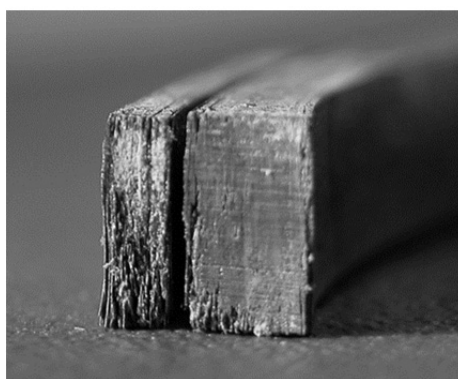


*Рис. 5.2. Конструкция магнитопровода*



*Рис. 5.3.* Микроструктура шлифа композита  
«аморфный сплав – связка»

Выбор электроалмазного шлифования в данном случае был обусловлен несколькими факторами. Во-первых, твердость аморфной (нанокристаллической) ленты достигала значительных величин – 10...11 ГПа. Во-вторых, особенность структурного состояния аморфной ленты обуславливает ограничение по уровню температур в зоне резания. Кроме того, имеющаяся непрочная связка не способна выдерживать уровень нагрузок, характерных для лезвийных методов обработки, и при превышении его происходит разрушение конструкции изделия по связке (рис. 5.4). Таким образом, использование электроалмазного шлифования в качестве технологического метода обработки позволит исполнить указанные ограничения при обработке такого рода конструкций.



*Рис. 5.4.* Расслоение изделия по связке

При традиционных методах шлифования, в том числе и алмазном, ограничивающим фактором при выборе зернистости круга является требование, предъявляемое к качеству обрабатываемых поверхностей, и в первую очередь к шероховатости.

При электроалмазном шлифовании различных материалов и сплавов величина зерна алмазного круга практически не влияет на высоту микронеровностей обработанных поверхностей. Отмечается, что во всем диапазоне изменения электрических и механических режимов электроалмазного шлифования инструментальных материалов при использовании алмазных кругов с различными характеристиками шероховатость обработанной поверхности всегда находится в пределах  $R_a = 0,63 \dots 0,08$  мкм.

Отсутствие заметного влияния зернистости круга на шероховатость при ЭАШ объясняется комплексным действием физико-химических процессов и механического резания, направленных на удаление обрабатываемого материала. Отмечаемое преобладающее влияние доли электрохимического растворения в общем объеме удаляемого материала и определяет малую зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от процесса механического резания.

В связи с этим при выборе зернистости круга при ЭАШ, как правило, руководствуются задачей обеспечения максимальной производительности.

На рис. 5.5 и 5.6 представлены результаты исследований, указывающие на наличие следов резания алмазными зернами круга, и профилограмма поверхности паза магнитопровода после ЭАШ соответственно, подтверждающие высказанные выше соображения.

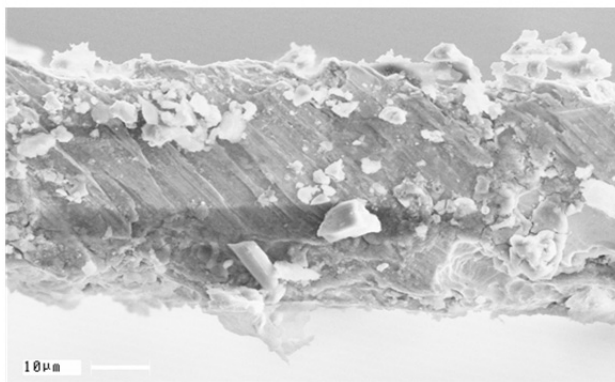


Рис. 5.5. Следы резания алмазными зернами при ЭАШ нанокристаллического сплава 5БДСР

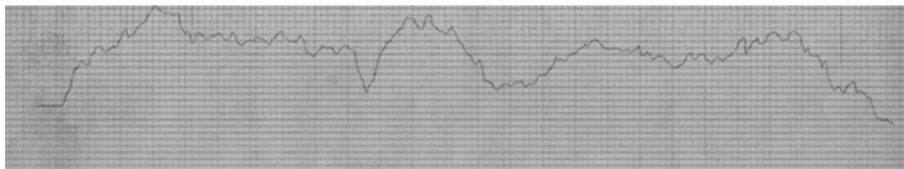


Рис. 5.6. Профилограмма поверхности пазов магнитопровода после ЭАШ:  
В. У. –  $\times 1200$ ; Г. У. –  $\times 60$

## 5.8. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭАШ

В настоящее время не производится серийный выпуск технологического оборудования для электроалмазного шлифования. В связи с этим для реализации процесса ЭАШ необходимо создание нового или модернизация существующего оборудования. Наиболее пригодными для модернизации являются станки шлифовальной группы – заточные, плоско-, кругло- и внутришлифовальные.

На рис. 5.7 представлена схема модернизации инструментального шпиндельного узла полуавтомата модели ЕЗС-167.2 под процесс электроалмазной прорезки пазов в магнитопроводе.

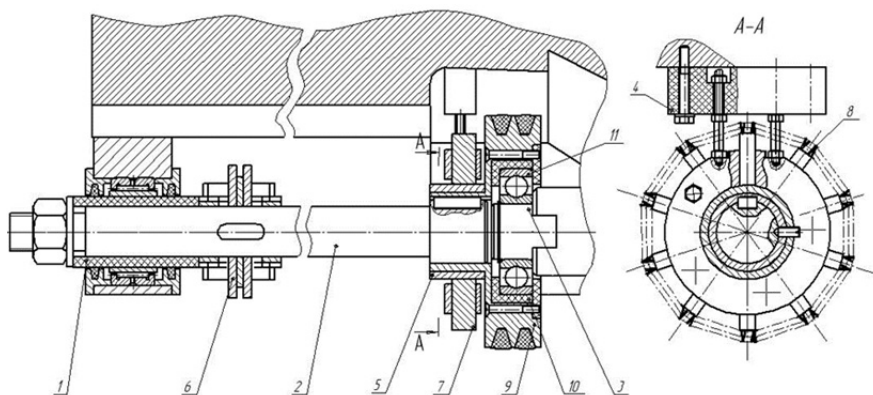


Рис. 5.7. Инструментальный шпиндельный узел полуавтомата ЕЗС-167.2:

1 – втулка капралактановая передняя; 2 – шпиндель; 3 – опора неподвижная (оправка); 4 – вставка текстолитовая; 5 – коллектор медный; 6 – инструментальный блок; 7 – щетки медно-графитовые; 8 – пружина; 9 – шкив; 10 – втулка капралактановая задняя; 11 – подшипник

Для модернизации станочного оборудования необходимо предусмотреть возможность оснащения его источником постоянного тока для подведения технологического напряжения и узлом подачи электролита. Кроме того, необходимо осуществить установку специального контактно-щеточного устройства на шпиндель станка с последующей электрической развязкой его и обрабатываемой детали от станка при помощи диэлектрических втулок и проставок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Черепанов Ю. П.* Электрохимическая обработка в машиностроении / Ю. П. Черепанов, Б. И. Сامةцкий. – Москва : Машиностроение, 1972. – 117 с.
2. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М. Ф. Семко, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др. – Киев : Вища школа. Головное издательство, 1979. – 232 с.
3. *Студенческий Е. И.* Электроалмазное шлифование / Е. И. Студенческий, В. И. Богатырев, Н. Т. Кадышев. – Москва : Машиностроение, 1971. – 81 с.
4. *Иванова М. В.* Особенности анодного поведения аморфных сплавов в условиях электрохимической обработки / М. В. Иванова, Х. М. Рахимьянов, К. Х. Рахимьянов // Высокие, критические электро- и нанотехнологии : сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф., Тула, 19 дек. 2017 г. – Тула : Тульский гос. ун-т, 2017. – С. 10–15. – ISBN 978-5-7679-4027-1.
5. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств : монография / А. С. Янюшкин, С. О. Сафонов, В. А. Торопов, Ю. Н. Стебеньков, Н. Р. Лосева, Т. Т. Ереско, А. Н. Баранов, Д. В. Лобанов, В. Ю. Попов, А. А. Сурьев, С. А. Якимов, А. Б. Лосев, Б. В. Федоров. – Братск : БрГУ, 2006. – 302 с.
6. *Рахимьянов Х. М.* Технологические особенности обработки изделий, выполненных из аморфных и нанокристаллических сплавов / Х. М. Рахимьянов, Б. А. Красильников, К. Х. Рахимьянов // Инновации в машиностроении (Ин-Маш-2015) : сб. тр. 7-й междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – С. 120–125.
7. *Рахимьянов К. Х.* Влияние температуры отжига на структуру и твердость аморфных и нанокристаллических сплавов / К. Х. Рахимьянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2007. – № 2. – С. 14–17.
8. *Рахимьянов К. Х.* Электроалмазная обработка аморфных и нанокристаллических сплавов / К. Х. Рахимьянов // Механики – XXI веку. VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием : сборник докладов. – Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – С. 205–209.
9. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М. Ф. Семко, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 232 с.

10. *Рахимьянов Х. М.* Влияние режимов обработки на производительность электроалмазного шлифования нанокристаллических и аморфных сплавов / Х. М. Рахимьянов, К. Х. Рахимьянов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 99–110.

11. *Рахимьянов Х. М.* Модернизация оборудования для электроалмазного шлифования изделий из аморфных и нанокристаллических сплавов / Х. М. Рахимьянов, Б. А. Красильников, К. Х. Рахимьянов, А. С. Еремина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 37–39.

## **5.9. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА**

**Цель работы.** Ознакомиться с процессом электроалмазной обработки, определить производительность процесса в зависимости от основных параметров обработки.

### **Указания к выполнению**

Сущность электроалмазного шлифования заключается в сочетании процессов анодного растворения материала с механическим съемом продуктов его растворения алмазными зернами. Механизм шлифования, точность обработки и существующие разновидности процесса более подробно представлены в теоретической части настоящего раздела.

Необходимо определить производительность технологического процесса плоского электроалмазного глубинного шлифования деталей с покрытиями и влияние глубины обработки, величины напряжения технологического тока, давления (статической нагрузки) на производительность.

Обработка осуществляется на модернизированном плоскошлифовальном станке модели 3Г71 с продольной подачей по «упругой» схеме (подача осуществляется за счет статической нагрузки). Технологический ток подается от выпрямителя ВАКГ-1600 с плавным регулированием напряжения.

Производительность электроалмазного шлифования зависит от следующих параметров:

- глубины обработки;
- напряжения технологического тока;
- величины статической нагрузки.

Эксперимент осуществляется путем «замораживания» двух параметров и определения производительности в зависимости от третьего параметра.

При выполнении работы подлежат регистрации следующие параметры.

1. Величина статической нагрузки, кг.
2. Величина напряжения технологического тока, В.
3. Глубина обработки, мм.
4. Длина и ширина обрабатываемой поверхности, мм.
5. Величина тока (с определением плотности тока  $A/cm^2$ ).
6. Время обработки, мин.
7. Производительность процесса, г/мин.

Результаты эксперимента должны быть сведены в таблицу и представлены графически.

По результатам проделанной работы должны быть сделаны выводы.

### **Необходимое оборудование, приборы, инструменты и материалы**

1. Плоскошлифовальный станок мод. ЗГ71 и выпрямитель типа ВАКГ-1600 с установленным вольтметром и амперметром.
2. Алмазный круг на металлической связке М1 диаметром 250 мм.
3. Образцы с покрытиями.
4. Набор весов.
5. Штангенциркуль.
6. Секундомер.

### **Порядок выполнения работы**

1. Установить образец в приспособлении и закрепить.
2. Установить величину напряжения, глубину обработки, величину статической нагрузки.
3. Включить вращение шпинделя шлифовального круга и подачу электролита, отрегулировать расход электролита.
4. Включить выпрямитель.
5. Обеспечить продольную подачу стола станка.
6. Снять контрольные замеры времени обработки и величин регистрируемых параметров.

7. Выключить выпрямитель, вращение шпинделя и подачу электролита.
8. Рассчитать линейную производительность обработки по результатам эксперимента.
9. Записать результаты эксперимента в таблицу и построить необходимые графические зависимости производительности и величины (плотности тока) от исследуемых параметров.
10. Оформить отчет по работе.

### **Содержание отчета**

1. Титульный лист.
2. Наименование и цель работы.
3. Схема процесса электроалмазного шлифования.
4. Используемое оборудование, постоянные параметры и условия эксперимента.
5. Эскиз образца с основными размерами.
6. Таблица результатов эксперимента.
7. Графики полученных зависимостей.
8. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается сущность процесса электроалмазного шлифования?
2. Преимущества электроалмазного шлифования перед электрохимической обработкой и алмазным шлифованием.
3. Какие требования предъявляются к электролитам при электроалмазном шлифовании?
4. От каких параметров зависит производительность процесса электроалмазного шлифования?
5. Что характеризуют вольт-амперные зависимости процесса электроалмазного шлифования?
6. Сущность модернизации плоскошлифовального станка для возможности реализации электроалмазной обработки.
7. Какие требования предъявляются к алмазному кругу для электроалмазного шлифования?

## **6. ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА**

### **6.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ**

В последние десятилетия плазменно-дуговая резка, являющаяся разновидностью термической резки, получила широкое распространение в заготовительном производстве.

Низкотемпературная плазма представляет собой нагретый до температуры  $5 \cdot 10^4$  К электропроводящий газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц – ионов. Низкотемпературную плазму, как особое состояние вещества, получают в столбе электрической дуги, которая создается в специальных устройствах – плазмотронах.

Существуют две основные схемы плазменно-дугового разряда – плазменно-дуговая струя и плазменная дуга. В первом случае независимая плазменная дуга возбуждается между независимыми электродами, а обрабатываемое изделие является электрически нейтральным. Во втором – имеет место дуга прямого действия, когда обрабатываемое изделие является одним из электродов.

Принимая во внимание тот факт, что дуговой разряд развивается в узких каналах плазмотрона, становится очевидным, что при относительно небольших расходах плазмообразующих газов удастся получить значительные скорости потоков плазмы.

Физическая сущность плазменно-дуговой резки заключается в расплавлении обрабатываемого материала потоком низкотемпературной плазмы в узком канале реза и последующем выдувании расплава потоком.

Основным технологическим параметром рассматриваемой обработки является мощность дуги (и в первую очередь напряжение), определяющая предельные возможности раскроя по толщине реза.

Сила тока назначается из условий, обеспечивающих требуемый уровень мощности дуги, при которой интенсивность расплавления металла в канале реза соответствовала бы заданной скорости реза. Реализуемая плотность мощности в пятне нагрева плазменной дугой составляет  $10^8 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, что на порядок превышает мощность плазменной струи. При этом тепловой КПД в первом случае достигает 70...80 %, 50...60 % – во втором.

Для понимания физики процесса плазменно-дуговой резки рассмотрим схематичное изображение взаимодействия плазменно-дугового разряда с обрабатываемым материалом (рис. 6.1). Из схемы видно, что формирование реза в обрабатываемом металле осуществляется тремя различными участками плазменной дуги: столбом ( $l_1$ ), анодным пятном ( $l_2$ ) и факелом ( $l_3$ ). Эффективность нагрева на отмеченных участках различна, что и определяет форму фронта продвижения реза при обработке.

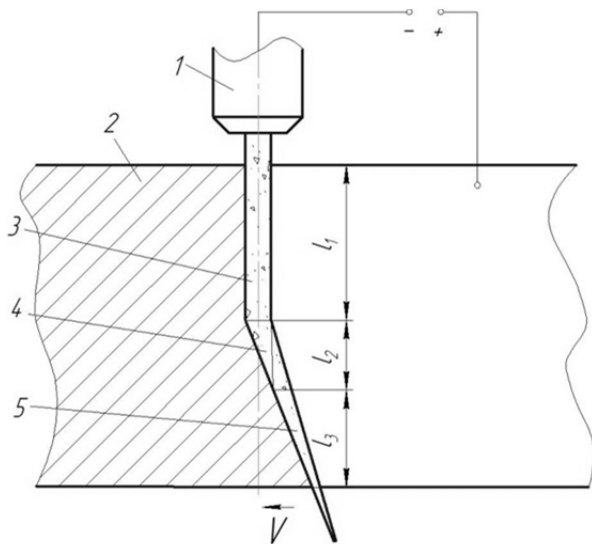


Рис. 6.1. Схема плазменно-дуговой резки:

1 – плазматрон; 2 – обрабатываемый металл; 3 – столб дугового разряда; 4 – анодное пятно; 5 – факел дуги;  $l_1$  – протяженность столба дуги;  $l_2$  – протяженность анодного пятна;  $l_3$  – протяженность факела;  $v$  – направление резки

Ширина и форма реза определяются как режимами процесса, так и параметрами элементов плазмотрона, формирующих геометрию столба дуги. Если управление режимами осуществляется напряжением, током, скоростью резки, составом и параметрами плазмообразующих газов, то геометрия столба в значительной мере зависит от размеров и геометрии режущего сопла. При оптимальных режимах резки и относительно небольшой толщине металла рез формируется с относительно параллельными кромками. Однако физика процесса, характеризующая наличием трех участков теплового источника с разной эффективной мощностью, обуславливает формирование при плазменно-дуговой резке конусности получаемых поверхностей.

Главным технологическим параметром плазменно-дуговой резки является скорость, связанная с энергетическими параметрами плазменной дуги, выбор которых, в свою очередь, определяется как теплофизическими свойствами разрезаемого материала, так и его толщиной. Зависимость скорости резки от отмеченных характеристик определяется выражением

$$v = \frac{0,24IU\eta - q}{\rho t S \Delta s},$$

где  $v$  – скорость плазменно-дуговой резки, [м/ч];  $I$  – сила тока дуги, [А];  $U$  – напряжение на дуге, [В];  $\eta$  – эффективный КПД дуги;  $q$  – интенсивность теплоотдачи в металл, [Вт];  $\rho$  – плотность металла, [кг/м<sup>3</sup>];  $t$  – ширина реза, [мм];  $S$  – толщина разрезаемого металла, [мм];  $\Delta s$  – приращение удельной энтальпии металла, [Дж/кг].

Анализ данной зависимости показал, что при прочих равных условиях скорость реза определяется мощностью дуги за счет изменения как напряжения, так и тока. При этом следует учитывать, что напряжение дуги определяет глубину ее проникновения в металл, из чего следует, что при увеличении толщины разрезаемого металла следует повышать напряжение дуги. Рост тока дуги при постоянном напряжении ведет к увеличению ширины реза.

Влияние теплофизических свойств материала сказывается на скорости реза следующим образом. Более легкие металлы с меньшими значениями теплоемкости и теплопроводности допускают применение больших скоростей обработки.

Как и для всех методов термической резки, качество плазменно-дуговой резки в соответствии с ГОСТ 14792–80 регламентируется сле-

дующими показателями: размерным допуском, неперпендикулярностью поверхности реза, ее шероховатостью и глубиной зоны термического влияния. Допустимые отклонения размеров деталей от номинальных значений для различных классов точности представлены в табл. 6.1, а предельные нормативные отклонения поверхности реза от перпендикулярности и допустимые значения шероховатости и глубины зоны термического влияния для различных классов качества приведены в табл. 6.2 и 6.3.

Таблица 6.1

**Допустимые отклонения (миллиметры) размеров от номинальных значений для различных классов точности по ГОСТ 14792–80**

| Класс точности | Толщина разрезаемого металла, мм | Номинальные размеры деталей, мм |            |             |             |
|----------------|----------------------------------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|
|                |                                  | менее 500                       | 500...1500 | 1500...2500 | 2500...5000 |
| 1              | 5...30                           | ±1,0                            | ±1,5       | ±2,0        | ±2,5        |
|                | 31...60                          | ±1,0                            | ±1,5       | ±2,0        | ±2,5        |
| 2              | 5...30                           | ±2,0                            | ±2,5       | ±3,0        | ±3,5        |
|                | 31...60                          | ±2,5                            | ±3,0       | ±3,5        | ±4,0        |
| 3              | 5...30                           | ±3,5                            | ±3,5       | ±4,0        | ±4,5        |
|                | 31...60                          | ±4,0                            | ±4,0       | ±4,5        | ±5,0        |

Таблица 6.2

**Допустимые нормативные отклонения (миллиметры) поверхности реза от перпендикулярности по ГОСТ 14792–80**

| Класс качества | Толщина металла, мм |         |         |
|----------------|---------------------|---------|---------|
|                | 5...12              | 13...30 | 31...60 |
| 1              | 0,4                 | 0,5     | 0,7     |
| 2              | 1,0                 | 1,2     | 1,6     |
| 3              | 2,3                 | 3,0     | 4,0     |

Таблица 6.3

**Допустимые значения шероховатости поверхности реза и глубины зоны термического влияния по ГОСТ 14792-80**

| Класс качества | Нормы шероховатости, мм, при толщине металла, мм |         |         | Нормы глубины ЗТВ, мм, при толщине металла, мм |         |         |
|----------------|--------------------------------------------------|---------|---------|------------------------------------------------|---------|---------|
|                | 5...12                                           | 13...30 | 31...60 | 5...12                                         | 13...30 | 31...60 |
| 1              | 0,05                                             | 0,06    | 0,07    | 0,1                                            | 0,2     | 0,4     |
| 2              | 0,1                                              | 0,2     | 0,32    | 0,4                                            | 0,8     | 1,6     |
| 3              | 0,2                                              | 0,32    | 0,63    | 0,8                                            | 1,6     | 3,2     |

## 6.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ

Важным для плазменно-дугового способа резки является плазмообразующая среда, в качестве которой используются технические газы, которые по своему воздействию на катод подразделяются на неактивные (азот, аргон, водород) и активные (воздух и кислород). К плазмообразующим газам предъявляются следующие требования:

- обеспечение стабильного горения дуги;
- эффективное преобразование электрической энергии в тепловую;
- равномерная передача энергии по толщине реза;
- отсутствие негативного воздействия как на электрод, так и на обрабатываемый материал.

Использование инертных газов в качестве плазмообразующих обеспечивает хорошую ионизацию в столбе дугового разряда, хорошо защищает вольфрамовый электрод плазмотрона, не оказывает неблагоприятного воздействия на поверхность реза. Однако высокая стоимость инертных газов и невозможность их деионизации в столбе дугового разряда сдерживает их широкое применение в данной технологии. Поэтому для повышения производительности плазменно-дуговой резки и увеличения диапазона обрабатываемых материалов по толщине в качестве добавок к аргону используют двух-трехатомные газы, являющиеся активными теплоносителями. Аргоно-водородные смеси широко используют при резке таких металлов, как магниевые и алюминиевые сплавы.

Плазменно-дуговая резка с применением сжатого воздуха как плазмообразующего газа рекомендуется для конструкционных и высоколегированных сталей. Для повышения производительности в данном случае рекомендуется использование сжатого воздуха с повышенным содержанием кислорода либо чистого кислорода. Однако при этом необходимо обеспечить защиту электрода инертным газом.

Алюминиевые сплавы также рекомендуют резать с использованием азотоводородных смесей. При пониженных требованиях к качеству реза алюминиевые сплавы толщиной 5...20 мм допускается резать в среде воздуха или азота. Особо точные и качественные резы получают на аргоноводородных смесях. Рекомендуемые технологические режимы плазменно-дуговой резки алюминиевых сплавов представлены в табл. 6.4.

Для резки конструкционных сталей в качестве плазмообразующих газов используются воздух или смеси с повышенным содержанием кислорода (до 50 %). Режимы воздушно-плазменной резки конструкционных сталей представлены в табл. 6.5.

Т а б л и ц а 6.4

**Технологические режимы плазменно-дуговой резки алюминиевых сплавов**

| Толщина<br>разрезае-<br>мого ме-<br>талла, мм | Диа-<br>метр<br>сопла,<br>мм | Рабо-<br>чий<br>ток, А | Напря-<br>жение<br>на дуге, В | Расход плазмообразую-<br>щего газа, м <sup>3</sup> /ч |      |              |             | Ско-<br>рость<br>резки,<br>м/мин |
|-----------------------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|------|--------------|-------------|----------------------------------|
|                                               |                              |                        |                               | ар-<br>гон                                            | азот | водо-<br>род | воз-<br>дух |                                  |
| 10                                            | 5                            | 450                    | 85                            | —                                                     | 5,0  | —            | —           | 6,0                              |
| 30                                            | 5                            | 450                    | 90                            | —                                                     | 1,5  | 1,0          | —           | 1,0                              |
| 80                                            | 5                            | 450                    | 110                           | —                                                     | 1,5  | 1,0          | —           | 0,5                              |
| 200                                           | 7                            | 700                    | 165                           | 0,4                                                   | —    | 4,0          | 1,0         | 0,18                             |

Для резки высоколегированных сталей применяются те же технологические режимы, что и для низкоуглеродистых сталей, а в качестве плазмообразующих газов помимо воздуха используют смеси азота и кислорода.

Таблица 6.5

**Режимы воздушно-плазменной резки низкоуглеродистых сталей**

| Толщина<br>разрезаемого<br>металла, мм | Рабочий ток,<br>А | Диаметр<br>сопла, мм | Расход<br>воздуха,<br>м <sup>3</sup> /ч | Скорость<br>резки,<br>м/мин |
|----------------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|
| 10                                     | 200               | 3,0                  | 6,0                                     | 2,0                         |
| 10                                     | 300               | 3,0                  | 6,0                                     | 3,2                         |
| 20                                     | 200               | 3,0                  | 6,0                                     | 0,83                        |
| 20                                     | 300               | 3,0                  | 6,0                                     | 1,57                        |
| 30                                     | 300               | 3,0                  | 6,0                                     | 0,90                        |
| 30                                     | 400               | 3,0                  | 6,0                                     | 1,50                        |
| 50                                     | 400               | 4,0                  | 8,0                                     | 0,48                        |
| 70                                     | 400               | 4,0                  | 8,0                                     | 0,24                        |
| 100                                    | 400               | 4,0                  | 8,0                                     | 0,08                        |
| 130                                    | 450               | 4,0                  | 8,0                                     | 0,03                        |

Технологический режим по скорости реза для медных сплавов занижен по сравнению со сталями, что связано с более высокими значениями теплоемкости и теплопроводности. В качестве плазмообразующих газов в этом случае используются азот либо его смеси с водородом.

Анализ технических характеристик и технологических возможностей плазменно-дуговой резки показал, что данный способ предназначен в основном для резки листовых материалов от 10 мм и выше. Нецелесообразность использования данной технологии для малых толщин металлов (до 10 мм) объясняется техническими особенностями процесса. Так, диаметр сопла, определяющий ширину реза, сопоставим и даже превосходит толщину разрезаемого материала, что при используемых значениях тока (200...700 А) не обеспечивает достаточной концентрации энергии в зоне реза и не позволяет получить высокое качество и точность реза при значительной зоне термического влияния. Таким образом, плазменно-дуговая резка в рассмотренном выше исполнении может рассматриваться как предварительная резка листовых материалов, требующая дополнительной механической обработки.

### **6.3. ТОНКОСТРУЙНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Совершенствование технологии плазменно-дуговой резки, направленное на повышение эффективности процесса как с позиций обеспечения высоких показателей точности и качества обработки, так и достижения максимальной производительности при резке широкой номенклатуры металлов и сплавов, позволило разработать эффективную технологию и оборудование тонкоструйной плазменной резки. Достижение повышенных показателей точности и качества реза в сочетании с высокой производительностью процесса позволяет рассматривать тонкоструйную плазменную резку как инновационную технологию в заготовительном производстве.

Отличительной особенностью данной технологии является сочетание высокой производительности процесса резки, присущей плазменно-дуговому способу, с достижением показателей точности и качества реза, характерных для лазерной обработки. Данный факт позволяет рассматривать тонкоструйную плазменную резку как альтернативу лазерной обработке для резки листовых металлических материалов толщиной до 10 мм.

Для понимания физических основ тонкоструйной плазменной резки необходимо изучение как самого процесса формирования плазменной дуги, так и ее взаимодействие с обрабатываемым материалом. Конструктивная схема элементов плазмоторона для тонкоструйной плазменной резки представлена на рис. 6.2.

Для создания режущей дуги между катодом плазмоторона и деталью (анодом) предварительно зажигается пилотная дуга между катодом и соплом, которая и приводит к частичной ионизации плазмообразующего газа, подаваемого в канал плазмоторона. Ионизированный газ, будучи электропроводным, на выходе из сопла плазмоторона замыкает электрическую цепь «катод – деталь», зажигая режущую дугу, которая и является источником тепловой энергии для разделения материала детали. В то же время не вся дуга на своем протяжении участвует в процессе обработки.

Выделяют характерные участки в столбе плазменной дуги (рис. 6.3).

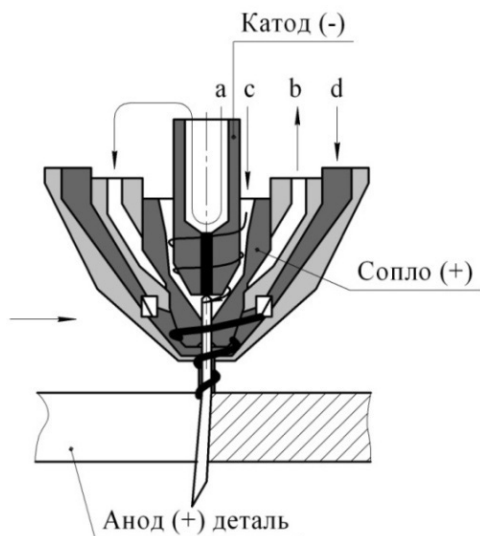


Рис. 6.2. Конструктивная схема формирования тонкоструйной плазмы:

$a, b$  – каналы охлаждения катода и сопла;  
 $c$  – канал плазмообразующего газа;  $d$  – канал завихряющего газа

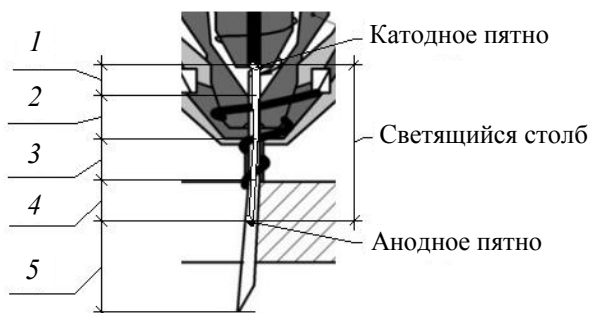


Рис. 6.3. Характерные участки столба плазменной дуги

Так, участок 1, имеющий название «закрытый столб», находится между катодным пятном и верхним срезом канала сопла. Данному

участку характерно относительно спокойное течение плазмообразующего газа. Следующий участок 2 столба дуги подвержен сжатию охлаждаемыми стенками сопла. Далее от нижнего среза сопла вплоть до поверхности обрабатываемой детали расположен участок 3, который в отличие от предыдущего находится в открытом пространстве. При этом его стабилизация и направление обеспечиваются соосным потоком плазмы и оболочкой холодного неионизированного плазмообразующего газа, а также потоком завихряющего газа. Дополнительное воздействие на дугу завихряющего газа осуществляет дополнительное ее сжатие и стабилизацию. Сжатие дуги, уменьшающее поперечное сечение столба, делает возможным повышение плотности мощности. С технологических позиций стабилизация дуги улучшает качество реза, уменьшает графообразование на нижней кромке реза, повышает точность формы реза за счет уменьшения оплавления на верхних кромках. Введение сжатия и стабилизации дуги завихряющим газом и является отличительным моментом в технологии тонкоструйной плазменной резки. Так, при использовании традиционных технологий плазменно-дуговой резки ширина реза достигает 5 мм при толщине реза 10 мм, а при использовании тонкоструйной плазменной резки ширина реза составляет 1,8 мм.

Участок 4 в столбе плазменной дуги, расположенный от поверхности реза вплоть до анодного пятна, непосредственно участвует в разделении обрабатываемого материала, продукты которого в расплавленном состоянии выносятся из зоны реза плазменной струей (участок 5).

Если элементы 1, 2, 3 столба плазменной дуги являются участками, на которых происходит ее формирование, то участки 4, 5 обеспечивают формообразование канала реза в обрабатываемом материале.

### **6.3.1. Технологическое оборудование для тонкоструйной плазменной резки**

На рис. 6.4 показан технологический комплекс тонкоструйной плазменной резки, состоящий из следующих основных блоков: системы ЧПУ BURNY PHANTOM ST 1, координатного стола с порталом 2, плазмотрона PerCut 160 3, источника тока Hi – Focus 130i с газовой консолью 4, газобаллонного оборудования 5.

Системой ЧПУ осуществляется перемещение плазмотрона по заданной траектории, а раскрой выполняется по программе обработки

единичной детали или по программе раскладки деталей в пределах листа с учетом информации о настройках процесса для выполнения требуемой точности формообразования.

Источник технологического тока  $\text{Ni}$  – Focus 130i обеспечивает требуемые энергетические параметры процесса, а встроенная газовая консоль – расходы плазмообразующего и завихряющего газа.



Рис. 6.4. Технологический комплекс тонкоструйной плазменной резки

В настоящее время на рынке представлен широкий ряд установок тонкоструйной плазменной резки с источниками тока от 80 до 440 А, обеспечивающий раскрой металлических материалов толщиной от 0,5 до 90 мм с высоким качеством реза и низким отклонением реза от перпендикулярности (от  $-1^\circ$  до  $+2^\circ$ ) во всем диапазоне толщин. При этом скорость раскроя варьируется от 6 м/мин (при раскрое конструкционных сталей толщиной 1 мм) до 0,3 м/мин (при раскрое алюминиевых сплавов толщиной 90 мм).

### 6.3.2. Тонкоструйная плазменная резка однородных металлических материалов

Исследования тонкоструйной плазменной резки металлических материалов показали следующие результаты.

1. Раскрой низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 3 мм производился на технологических режимах:

- плазмообразующий газ – кислород;
- завихряющие газы – кислород, азот;
- режущий ток – 50 А;
- скорость обработки – 2,2 м/мин.

Шероховатость поверхности реза после обработки на данных режимах составляет  $Ra = 1,8$  мкм.

Внешний вид поверхности реза стали Ст3 показан на рис. 6.5.

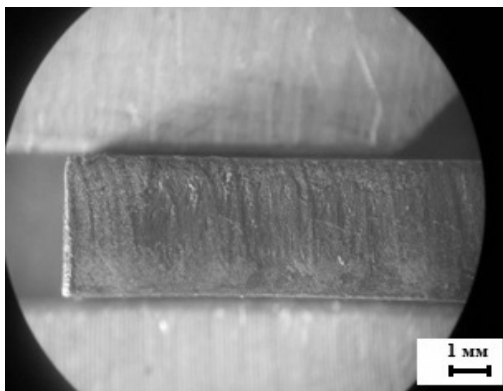


Рис. 6.5. Внешний вид поверхности реза  
стали Ст3

2. Технологические режимы раскроя нержавеющей стали 12X18H10T толщиной 2 мм:

- плазмообразующий газ – воздух;
- завихряющий газ – азотоводородная смесь в соотношении 95/5 %;
- режущий ток – 30 А;
- скорость обработки – 1,3 м/мин.

Шероховатость поверхности реза составила  $Ra = 3,6$  мкм.

Морфология поверхности реза нержавеющей стали 12X18H10T показана на рис. 6.6.

Появление на нижней кромке реза небольшого количества грата объясняется химическими реакциями окисления металла вследствие высоких температур в зоне реза как с атмосферным воздухом, так и с неионизированной частью плазмообразующего газа с образованием тугоплавких соединений типа  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Появление в расплаве подобного рода окислов приводит к повышению его вязкости и затруднению полного удаления из зоны реза.

3. При раскросе методом тонкоструйной плазменной резки алюминия А5М толщиной 3 мм технологические режимы идентичны режимам, применяемым для обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Отличие состоит лишь в скорости раскроя – для алюминия она составляет 1,4 м/мин. Раскрой на данных режимах также показал наличие грата на нижней кромке реза, что обуславливается (так же как и при резке нержавеющей стали) образованием тугоплавких оксидов алюминия.

Внешний вид поверхности реза алюминия А5М показан на рис. 6.7.

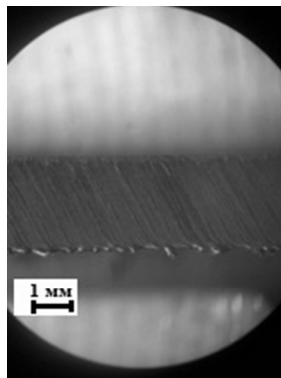


Рис. 6.6. Морфология поверхности реза стали 12Х18Н10Т

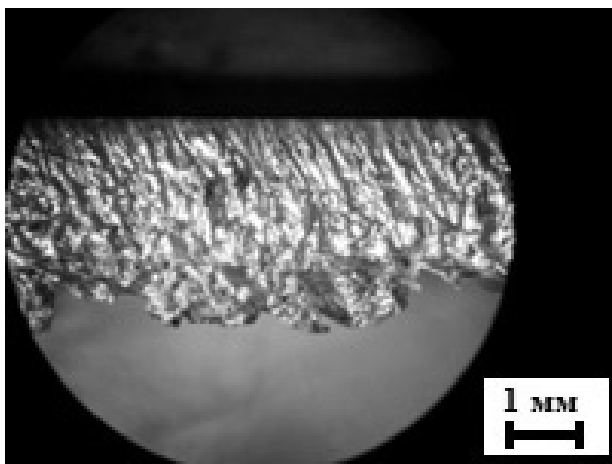


Рис. 6.7. Внешний вид поверхности реза алюминия А5М

Исключение графа при обработке нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов следует ожидать при замене плазмообразующего газа (воздуха) в схеме обработки на инертный газ (водород, аргон), что позволит исключить образование тугоплавких оксидов в расплаве.

4. Раскрой меди М1 толщиной 2 мм производился на технологических режимах, схожих в части газовой составляющей с режимами раскроя низкоуглеродистой стали:

- плазмообразующий газ – кислород;
- завихряющие газы – кислород, азот;
- режущий ток – 35 А;
- скорость обработки – 1,3 м/мин.

Анализ морфологии поверхности реза, представленный на рис. 6.8, свидетельствует о хорошем качестве раскроя с шероховатостью поверхности реза  $Ra = 2,9$  мкм.

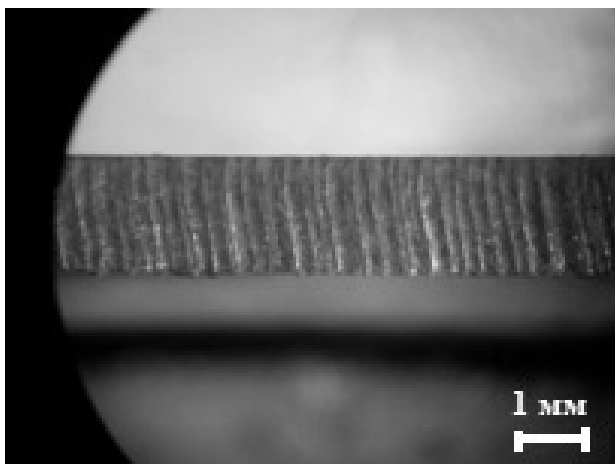


Рис. 6.8. Морфология поверхности реза меди М1

### **6.3.3. Тонкоструйная плазменная резка биметаллических композиций**

В настоящее время в промышленности все большее применение находят новые классы конструкционных материалов, в том числе слоистые композиции разнородных материалов, полученные прокаткой или сваркой взрывом. Металлы, составляющие подобного рода компо-

зиции, могут обладать совершенно разными механическими и физико-химическими свойствами, и соответственно стоит вопрос обработки данного класса материалов, в том числе и в заготовительном производстве на этапе разделительных операций листового материала.

Анализ специфики современных термических методов раскроя материалов (лазерная, кислородная, плазменная обработка) показал, что для обработки биметаллических композиций, выполненных из разнородных материалов, привлекательным методом с позиций точности, качества реза, производительности и экономичности процесса обработки является тонкоструйная плазменная резка.

Однако при обработке слоистых композиций существует ряд вопросов технологического характера.

– Так как в соединении присутствуют совершенно разные классы материалов, то применительно к какому из них следует назначать технологические режимы обработки (токовый режим, составы плазмообразующего и завихряющего газа, скорость обработки)?

– С какой стороны биметаллического соединения производить раскрой?

Экспериментальные исследования тонкоструйной плазменной резки биметаллических композиций позволили сформулировать обобщенные технологические рекомендации по раскрою подобного рода материалов:

– назначение режимных параметров (вид плазмообразующего и завихряющего газа, давление и расход, токовый режим, ориентировочный диапазон скоростей обработки) следует осуществлять исходя из толщины пакета биметаллической композиции;

– при наличии в выборе нескольких технологических схем, что является характерным для обработки в диапазоне малых и средних толщин реза, предпочтение следует отдать схеме с наименьшим значением токового режима, обеспечивающей формирование наименьшей ширины реза, а следовательно, реализующей наилучшие условия для удаления продуктов расплава, обеспечивающие благоприятную морфологию поверхности реза и минимизирующие графообразование на его кромках;

– если в биметаллической композиции имеет место преобладание одного из материалов по толщине, то выбор технологической схемы должен быть ориентирован на этот материал, и раскрой композиции необходимо проводить с его стороны;

– при сопоставимости толщин материалов, составляющих биметаллическую композицию, технологическая схема раскроя должна соот-

ветствовать материалу с наименьшей кинематической вязкостью расплава и наименьшей склонностью к образованию тугоплавких химических соединений элементов расплава с газовой средой в канале реза;

- при выборе лобовой стороны раскроя биметаллической композиции необходимо иметь в виду, что материал с повышенной вязкостью расплава должен находиться в нижней части пакета;

- для биметаллических композиций материалов, обладающих существенной разницей в температурах плавления, характерно расширение канала реза, если материал с минимальной температурой плавления находится в нижней части пакета;

- выбор в качестве лобовой стороны материала с высокой теплопроводностью приведет к формированию реза со значительным отклонением от перпендикулярности на его участке. Смена лобовой стороны позволит повысить точность реза на участке материала с высокой теплопроводностью, но возможно осаждение на нем элементов расплава с верхнего участка;

- при установлении режимных параметров раскроя биметаллической композиции с материалом с высокой теплопроводностью в верхней части пакета скорость раскроя следует назначать ближе к нижней границе рекомендованного диапазона. В противном случае возникает опасность непрореза пакета на всю толщину;

- для исключения образования дефектов на поверхности реза и графообразования на его нижних кромках при раскрое биметаллических композиций, в состав которых входят материалы, склонные к образованию нитридов и оксидов в процессе резки, следует выбирать технологические схемы с инертными газами в качестве плазмообразующих и завихряющих;

- для эффективного удаления продуктов расплава из канала реза для обработки композиций, составляющими которой являются материалы с повышенной кинематической вязкостью, следует рекомендовать технологические схемы с максимальными значениями давлений и расходов плазмообразующего и завихряющего газа.

Ниже приведены результаты раскроя ряда биметаллических композиций методом тонкоструйной плазменной резки.

1. Биметаллическая композиция «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» толщиной 5 мм (сталь Ст3 – 3 мм, сталь 12Х18Н10Т – 2 мм):

- раскрой на режимах обработки конструкционных сталей (плазмообразующий газ – кислород, завихряющий газ – азот);

- режущий ток – 50 А;

- скорость обработки – 1,5 м/мин;
- обработка производилась со стороны стали Ст3.

Данные технологические режимы обеспечивают достижение максимальной точности реза пакета, высокое качество поверхности реза ( $Ra = 1,5...2,0$  мкм), полное отсутствие грата на нижней кромке реза (рис. 6.9).

2. Раскрой биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» толщиной 6 мм (сталь Ст3 – 3 мм, алюминий А5М – 3 мм) проводился на абсолютно идентичных технологических режимах, что и композиция «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое пакета со стороны стали.

Геометрия реза данной композиции представлена на рис. 6.10, а внешний вид его поверхности – на рис. 6.11. Высокая точность реза (отклонение от перпендикулярности  $\sim 1,5^\circ$ ) и низкая шероховатость ( $Ra \sim 2,5$  мкм) наблюдаются на верхнем (стальном) участке биметалла. На нижнем (алюминиевом) участке имеет место расширение канала реза до 0,1...0,2 мм на сторону, что является следствием существенной разницы в температурах плавления стали и алюминия. Осаждение расплава на нижнем участке вызвано ослаблением газодинамических потоков в зоне расширения канала реза.

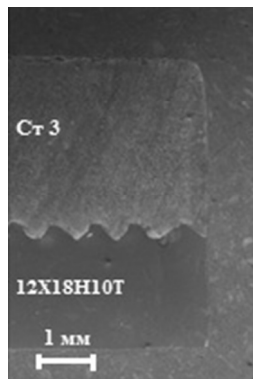


Рис. 6.9. Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»

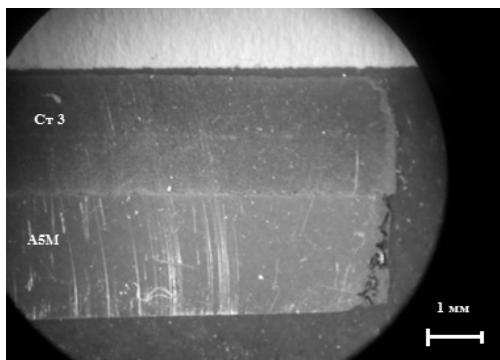


Рис. 6.10. Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М»

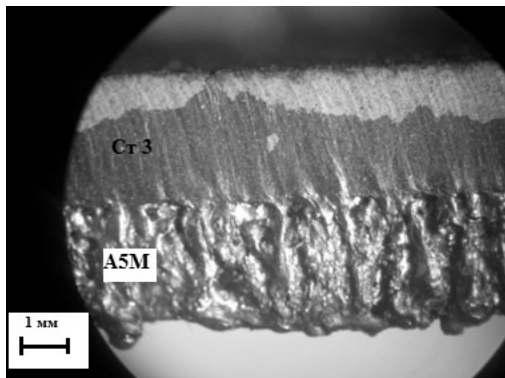


Рис. 6.11. Внешний вид поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М»

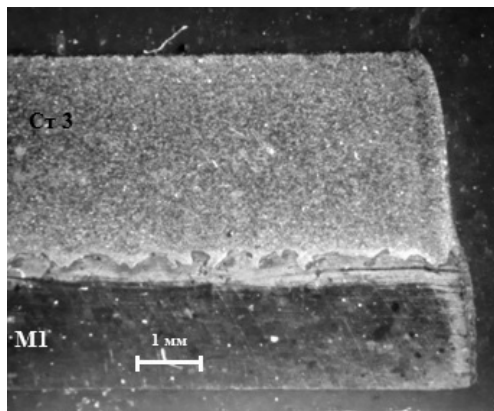
3. При обработке биметаллической композиции «сталь Ст3 + медь М1» толщиной 5 мм (сталь Ст3 – 3 мм, медь М1 – 2 мм) использовалась та же схема обработки, что и для предыдущих композиций, отличие состояло только в скорости обработки – 1,75 м/мин. Раскрой также производился со стороны стальной составляющей биметаллического пакета.

Геометрия реза показана на рис. 6.12, внешний вид поверхности реза – на рис. 6.13. Использование данной схемы обработки обеспечивает приемлемое качество реза композиции. При этом в канале реза на участке меди формируется наплыв размером 0,15...0,17 мм на сторону, появление которого можно объяснить тем, что часть расплава стали Ст3 с верхнего участка осаждается на нижнем вследствие высокой теплопроводности меди. Исследование микрогеометрии поверхности реза указало на низкое значение шероховатости. Так, на участке стали –  $Ra = 1,5...2,5$  мкм, меди –  $Ra = 3,0...6,0$  мкм, что является характерным для раскроя этих материалов с использованием тонкоструйной плазмы. Экспериментально установлено полное отсутствие грата на нижних краях реза.

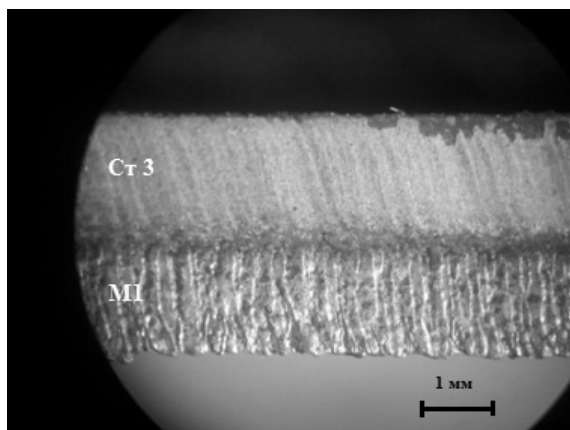
Анализ тонкоструйной плазменной резки показывает ряд преимуществ данной технологии:

- возможность обработки широкого спектра металлических материалов и сплавов в диапазоне толщин до 90 мм;
- высокая точность и качество реза;
- высокие показатели производительности процесса;

- маленькая зона термического влияния;
- отсутствие грата на нижней кромке реза;
- небольшие эксплуатационные расходы;
- конкурентоспособная стоимость оборудования.



*Рис. 6.12.* Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + медь М1»



*Рис. 6.13.* Внешний вид поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + медь М1»

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ширшов И. Г.* Плазменная резка / И. Г. Ширшов, В. Н. Котиков. – Ленинград : Машиностроение, 1987. – 192 с.
2. *Быховский Д. Г.* Плазменная резка / Д. Г. Быховский. – Москва : Машиностроение, 1972. – 348 с.
3. *Васильев К. В.* Плазменно-дуговая резка. Перспективный способ термической резки / К. В. Васильев // Сварочное производство. – 2002. – № 9. – С. 26–28.
4. *Рахимянов А. Х.* Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей / А. Х. Рахимянов // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение. – 2014. – № 2 (63). – С. 46–55.
5. *Рахимянов А. Х.* Влияние режимов тонкоструйной плазменной резки на качество обработки нержавеющей стали 12X18H10T / А. Х. Рахимянов, Х. М. Рахимянов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. : Ч. 2 / под ред. А. Г. Суслова, А. М. Маркова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 78–85.
6. *Рахимянов А. Х.* Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов / А. Х. Рахимянов, Б. А. Красильников // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. : Ч. 2 / под ред. А. Г. Суслова, А. М. Маркова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 71–77.
7. *Рахимянов А. Х.* Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов / А. Х. Рахимянов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. : Ч. 2 / под ред. А. Г. Суслова, А. М. Маркова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 66–70.
8. *Рахимянов А. Х.* Технологические особенности раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при тонкоструйной плазменной резке / А. Х. Рахимянов, Х. М. Рахимянов, Б. А. Красильников // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение. – 2014 – № 3 (64). – С. 51–67.
9. *Рахимянов Х. М.* Особенности формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций, выполненных из разнородных материалов / Х. М. Рахимянов, А. Х. Рахимянов, А. Н. Смирнов // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2016. – № 1 (70). – С. 22–30. doi:10.17212/1994-6309-2016-1-22-30.
10. Advantages of high-precision plasma cutting for processing bimetallic compositions / Kh. Rakhmyanov, A. Rakhmyanov, A. Zhuravlev // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 294–298. – doi: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294>

## **6.4. ПАСПОРТИЗАЦИЯ МАШИНЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ «ППЛ ТЕРМИТ»**

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА**

**Цель работы.** Ознакомиться с устройством и работой машины термической резки и методикой ее паспортизации. Ознакомиться с содержанием паспорта на устройство, освоить практические приемы определения основных технологических характеристик оборудования.

### **Указания к выполнению**

Плазменная резка металла – высокоэффективный, производительный и перспективный способ обработки металлов в заготовительном производстве.

Процесс плазменной резки основан на локальном расплавлении металла и выдувании жидкого металла потоком плазмообразующего газа. Расплавление металла осуществляется совместным воздействием электрической дуги, горящей между плазмотроном и обрабатываемой деталью, и потоком плазменного газа.

Плазменная резка позволяет обрабатывать прокат черных и цветных металлов и сплавов толщиной до 100 мм. Она находит все более широкое применение при обработке нержавеющей сталей и цветных сплавов на основе меди, алюминия, титана.

В производстве металлоконструкций плазменная резка обеспечивает получение деталей, не нуждающихся в дальнейшей обработке. Применение плазменной резки позволяет отказаться от последующей обработки кромок для сварки.

Лабораторная работа выполняется на машине термической резки «ППл Термит».

Машина термической резки «ППл Термит» (портальная плазменная) (рис. 6.14) предназначена для раскроя токопроводящих материалов (конструкционных сталей, алюминия и т. д.) толщиной до 30 мм и состоит из системы ЧПУ Burny Phantom 1, координатного стола 2, плазмотрона 3 и источника плазменной резки HiFocus 130i.

При работе на оборудовании угрозу для здоровья персонала могут представлять:

- высокое напряжение;
- электромагнитные поля;
- тепловое и световое излучение;

- газ и испарение обрабатываемого материала;
- шум;
- использование газовых баллонов высокого давления.



*Рис. 6.14. Расположение основных блоков машины термической резки*

В процессе плазменной резки металлов образуются чад и пыль. Во избежание последствий для здоровья необходимо обеспечить:

- вентиляцию;
- откачку газов и чада;
- при резке гальванических материалов использовать специальные защитные маски;
- не допускать превышения максимальной допустимой концентрации вредных веществ.

При плазменной резке происходит расплавление материала, часть которого в ходе обработки либо разбрызгивается, либо образует шлак. Во избежание возникновения пожара и получения ожогов необходимо:

- не хранить воспламеняющиеся вещества и жидкости в зоне работ (в радиусе 10 м) или нагревать их при помощи плазмотрона;

- обрезанный материал хранить на складе и в дальнейшем перерабатывать;

- соблюдать правила противопожарной безопасности.

При плазменной резке применяется газ под давлением.

Во избежание взрыва газобаллонного оборудования предписывается следующее:

- газовые баллоны в процессе работы должны стоять прямо, а не в наклонном виде;

- не использовать поврежденные газовые баллоны, редукторы и оборудование;

- использовать редукторы только для соответствующих газов;

- запрещается использовать редукторы, смазанные маслом или жиром;

- все части установки, соприкасающиеся с кислородом, должны быть обезжирены;

- баллон с кислородом присоединять непосредственно к редуктору;

- пробу давления газа брать в соответствии с требованиями технического обслуживания.

Оборудование для плазменной резки должно соответствовать следующим нормам:

- EN 60974-1 (VDE 0544 ч. 1) Электрические режущие дуги – источник тока для сварки;

- EN 60974-7 (VDE 0544 ч. 7) Электрические режущие дуги – форсунка (горелка);

- EN 60974-10 (VDE 0544 ч. 10) Электромагнитная совместимость (EMV) – требования.

## **Устройство и работа установки**

В машине термической резки можно выделить две основные системы:

- систему числового программного управления (СЧПУ) Burny Phantom ST;

- источник плазменной резки HiFocus 130i.

СЧПУ Burny Phantom ST осуществляет последовательное перемещение режущего инструмента (плазмотрона) по траектории, заданной чертежом детали, с установленной скоростью.

Источник плазменной резки HiFocus 130i обеспечивает требуемые энергетические параметры и расходы газов, заданные используемой технологией раскроя.

Задание основывается на программе обработки детали или программе укладки деталей на лист материала в сочетании с информацией о настройках процесса, включающей в себя скорость резки, ширину реза, геометрическую ориентацию (зеркальность), масштабирование, вращение, количество деталей, параметры листа и его расположение на раскройном столе, тип процесса и информацию о состоянии задания (прерывание, выполнение). Задание можно найти в списке файлов экрана «Выбора задания» (Run01).

Информация о задании «прикреплена» или связана с каждой программой обработки детали, когда производится настройка процесса резки. Это означает, что контроллер сохраняет всю информацию о настройках, и если программа обработки детали будет вновь применена, ее информация о настройках (скорость обработки) применяется автоматически для резки тех же деталей и из того же материала. Эта информация сохраняется до тех пор, пока программа обработки детали не будет удалена.

Для максимальной производительности процесса раскроя система управления Burny Phantom ST использует встроенное в Microsoft Windows® XP программное обеспечение по управлению движением на базе ПК. Это программное обеспечение позволяет оператору быстро выбирать, изменять и использовать большое количество программ обработки деталей для любых новых или уже используемых машин фигурной резки.

Система разработана таким образом, что позволяет выполнять несколько задач одновременно, т. е. после начала резки можно выполнять параллельные задачи: например, готовить следующую деталь для резки, загружать или изменять программы раскроя других деталей и т. д. Затем можно вернуться к исходному экрану, на котором отображается операция резки. Система управления Burny Phantom может быть сконфигурирована под конкретные ежедневные задачи, и набор этих задач будет сохранен после отключения/включения питания.

Система состоит из металлического корпуса с передней панелью, которая включает в себя жидкокристаллический сенсорный цветной экран, дисковод и порт USB, мембранные кнопки управления и переключатели подъема / опускания режущего инструмента. На задней панели установлены 17 разъемов для подвода питания и ввода / вывода данных. При открытии передней панели осуществляется доступ к внутренним компонентам системы.

## Передняя панель

На рис. 6.15 показана передняя панель Burny Phantom и ее основные элементы (сенсорный экран и кнопки управления).

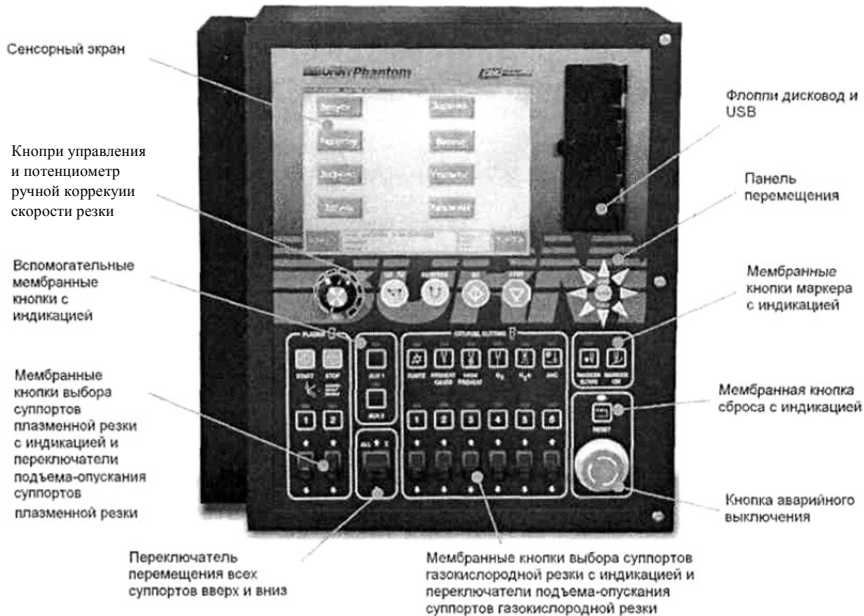


Рис. 6.15. Передняя панель системы управления Burny Phantom

## Сенсорный экран

Сенсорный жидкокристаллический экран позволяет отслеживать и управлять работой Burny Phantom касанием экрана, без использования клавиатуры или мыши. Есть две важные области, общие для всех экранов Burny Phantom.

Кнопки и области выбора на экранах легко узнаваемы и предоставляют быстрый доступ к программному обеспечению. Изображение на каждом экране зависит от режима. Особенности сенсорного экрана представлены в табл. 6.6. На рис. 6.16 показан общий вид сенсорного жидкокристаллического экрана.

Таблица 6.6

### Особенности сенсорного экрана

| Выбор                   | Функция                                                                                  |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Уменьшенное изображение | Увеличение детали в окне расширенной графики                                             |
| Кнопка прокрутки        | Перемещение линии прокрутки вверх или вниз по списку. Выделяет название выбранного файла |
| Кнопка (-и)             | Вывод соответствующего экрана, функции или предыдущего экрана                            |

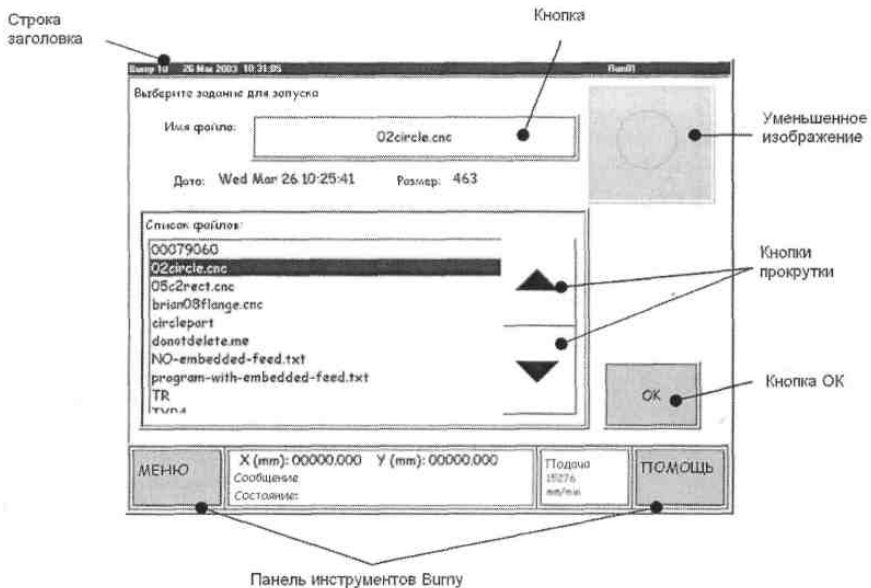


Рис. 6.16. Жидкокристаллический сенсорный экран

### Кнопки управления

Мембранные кнопки управления позволяют управлять процессом резки вручную (рис. 6.17). В табл. 6.7 описаны органы управления вручную и даны краткие сведения по их назначению.



Рис. 6.17. Мембранные кнопки управления

Таблица 6.7

### Блок скорости подачи и мембранные кнопки управления

| Орган управления                       | Описание                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Потенциометр коррекции скорости подачи | Поворотом ручки по часовой стрелке или против нее вручную устанавливается скорость подачи Burny Phantom на 0...120 %                                                                                         |
| GO TO – ПЕРЕЙДИ                        | Применяется для перемещения к предустановленной позиции по активной программе обработки детали или к начальному положению относительно раскройного листа                                                     |
| REVERSE – ВОЗВРАТ                      | При нажатии процесс резки останавливается и машина совершает обратное движение по траектории резки. Возврат продолжается, пока нажата кнопка. Для возобновления резки необходимо нажать мембранную кнопку GO |
| GO – ВПЕРЕД                            | Нажать для начала резки                                                                                                                                                                                      |
| STOP – СТОП                            | Нажать для остановки процесса резки или текущего перемещения                                                                                                                                                 |

### Панель перемещения

Панель перемещений (Jog Pad) позволяет управлять машиной резки нажатием направляющих стрелок (рис. 6.18). Перемещение машины продолжается до тех пор, пока стрелка нажата. Для фиксации движения необходимо нажать кнопку фиксации Latch Jog, а затем кнопку выбранного направления движения машины. Движение машины термической резки продолжается до тех пор, пока:

- не нажата кнопка STOP;
- не нажата стрелка противоположного направления движения;

- не достигнуто ограничение перемещения машины (срабатывание концевого выключателя) в заданном направлении.

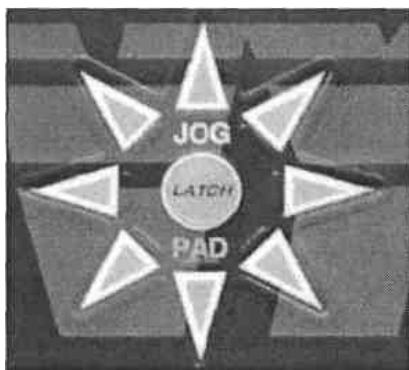


Рис. 6.18. Панель перемещения (Jog Pad) и кнопка фиксации (Latch)

### Управление процессом плазменной резки



Рис. 6.19. Органы управления плазменной резкой

Органы управления, показанные на рис. 6.19, предназначены для управления механизмом подъема плазмотрона в процессе плазменной резки. Два переключателя механизма подъема позволяют управлять двумя суппортами.

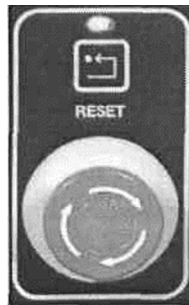
### Кнопки сброса и аварийной остановки

При нажатии и удержании в течение двух секунд мембранной кнопки сброса (Reset) выключаются суппорты и функции резки, выбранные на панели управления Burny Phantom ST. Если нажата кнопка аварийной остановки, то для реактивации пульта управления и приводов необходимо нажать кнопку сброса Reset (рис. 6.20).

При нажатии кнопки аварийной остановки все функции панели управления приводов Burny Phantom ST деактивируются, а приводы отключаются. Для реактивации функций пульта управления и приводов необходимо:

- повернуть кнопку аварийной остановки по часовой стрелке;

- нажать и удерживать мембранную кнопку сброса Reset, пока не загорится светодиод кнопки сброса.



*Рис. 6.20. Кнопки сброса (Reset) и аварийной остановки*

### **Переключение между режимами и экранами**

Назначение операции или изменение ее режимов осуществляется нажатием кнопки «Меню» в нижнем левом углу каждого экрана. На экране главного меню выбирается один из восьми режимов. Для переключения между режимами и экранами необходимо:

- когда на экране отображается главное меню, нажать кнопку «Меню» снова для отображения режима «Запуск» (Run) и для появления последнего активного экрана;

- нажать кнопку «ОК» для перехода к следующему экрану режима или «Отмена» (Cancel) – для возврата в предыдущий. Экраны в каждом режиме расположены в логическом порядке по их функциям;

- после нажатия кнопки режима появляется последний активный экран. Для возврата в предыдущий экран данного режима нажмите кнопку «Отмена» (Cancel), для перехода в следующий экран нажмите кнопку «ОК».

### **Перемещение по списку**

Некоторые экраны показывают список названий файлов или значения параметров для их обработки. Для выбора файла или параметра из списка и его применения или изменения необходимо подвести к нему курсор. Это делается одним из следующих способов:

- нажатием на файл или параметр на мониторе;

- с разъемами клавиатуры и мыши;
- линией волоконно-оптического кабеля;
- удаленным пультом управления;
- кабелем отвода питания вспомогательной линии.



## Включение питания

Питание подается на устройство через выключатель на его задней панели. Расположение выключателя показано на рис. 6.21.

После включения питания необходимо проверить конфигурацию параметров движения. При обнаружении отклонения произвести переустановку на основании параметров по умолчанию, тогда на экране появится сообщение с подробной информацией об ошибке и дальнейших действиях. В зависимости от ошибки управление движением может быть отключено.

При включении питания появляются экраны, показанные на рис. 6.22.

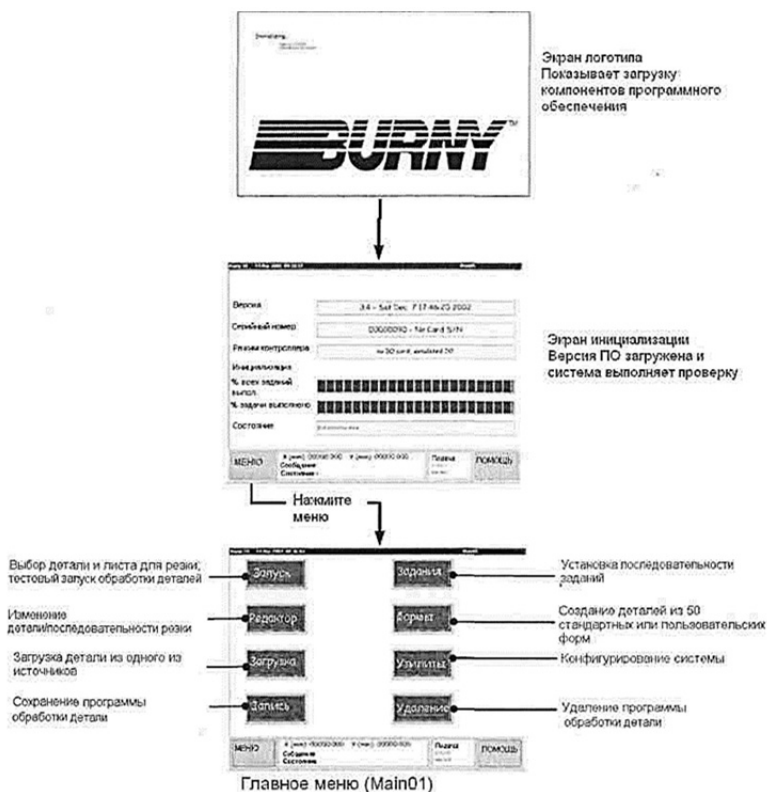


Рис. 6.22. Экраны инициализации Burny Phantom

## Выключение

Рекомендуется выключать систему следующим способом:

- нажать «Выключить» на экране «Утилиты» (Util01);
- при появлении экрана «Подтверждение выключения» (UtilYesNo) нажать «ОК».

Начинается отключение контроллера числового программного управления. На экране появляется заставка «Режущие плазмотроны», затем питание может быть отключено выключателем на задней панели.

При выборе режима «Утилиты» будет показан последний активный экран. Для возврата к экрану Util01 нажмите «ОК», «Отмена» или «Назад», пока не появится экран Util01 (рис. 6.23).

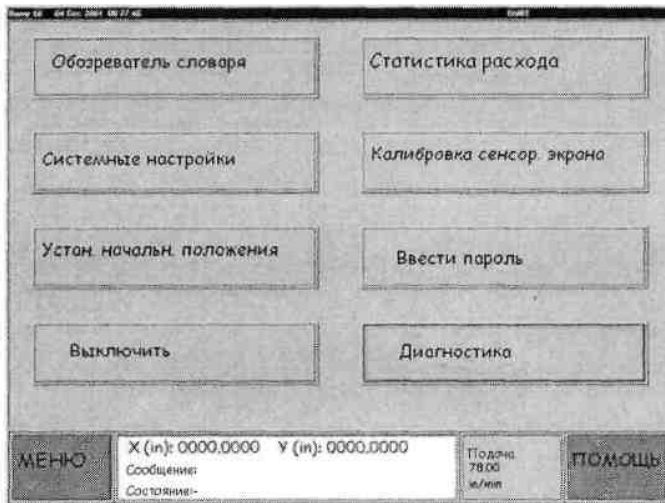


Рис. 6.23. Варианты выбора на экране «Утилиты» (Util01)

## Управление Burny Phantom

Процесс управления Burny включает в себя две главные функции:

- подготовка программы обработки детали. Программы или загружаются, или создаются в режиме форм. Добавляется информация о процессе резки, т. е. скорость, ширина реза и т. д. Теперь все готово для резки;
- резка детали. Начинается и заканчивается с помощью органов управления панели управления.

## Программы обработки деталей и файлы заданий

Файлы, задающие траекторию движения режущего инструмента, бывают двух типов: программа обработки детали и файл задания.

Программа содержит необходимую информацию для создания детали, например размеры, геометрия и пр.

Файл задания содержит информацию о программе детали, в частности о скорости резки, ширине реза, геометрической ориентации, масштабе, вращении, параметрах и положении листа, типе процесса, времени обработки и т. д.

Условия обработки могут быть добавлены к программе детали с двух экранов:

- Run Setup Screen (Run02) – экран настроек запуска, если деталь необходимо обработать сразу;
- Job Setup Screen (Job04) – экран настроек заданий, где можно задать скорость подачи, ширину реза для заданий, которые будут выполняться в будущем.

## Описание режимов

Система управления Burny Phantom ST имеет восемь основных режимов, которые могут быть выбраны с экрана главного меню (рис. 6.24). В каждом режиме применяется свой набор экранов для взаимодействия с оператором. В этой многозадачной операционной системе может быть выбран больше чем один режим.

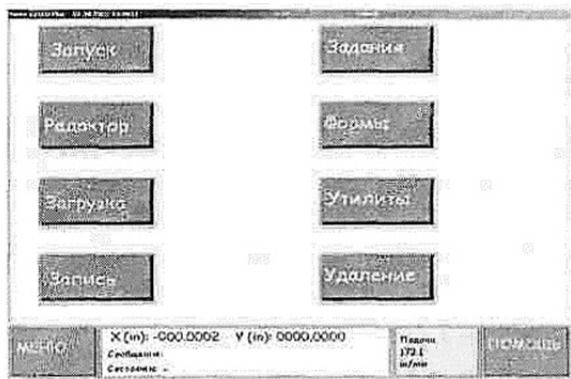


Рис. 6.24. Экран главного меню (Menu01)

## Обзор операций режимов

В табл. 6.8 перечислены восемь режимов и операции, осуществляемые в каждом режиме. Названия режимов соответствуют названиям разделов, где можно найти дополнительную информацию по режимам.

Таблица 6.8

### Режимы и операции работы

| Режим              | Операции                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Запуск<br>Run      | Выбрать программу обработки детали<br>Ввести настройки для программы обработки детали и листа<br>Осуществить тестовый запуск<br>Осуществить резку детали                                                                     |
| Редактор*<br>Edit* | Редактировать существующую программу обработки детали, пользовательскую форму или файл ASCII<br>Написать новую программу обработки детали                                                                                    |
| Загрузка<br>Load   | Выбрать устройство для загрузки<br>Выбрать папку<br>Выбрать программу обработки детали<br>Выбрать каталог-получатель<br>Копировать файл в Burny Phantom с конверсией (преобразованием) в программы обработки деталей         |
| Запись<br>Store    | Выбрать устройство-получатель<br>Выбрать исходный каталог (тип файла)<br>Выбрать файл<br>Выбрать каталог-получатель (зависит от устройства-получателя)<br>Выбрать выходной код преобразования (конверсии) (программы детали) |
| Задания<br>Jobs    | Подготовить и ввести программу обработки детали в список заданий<br>Проверить и модифицировать элементы программы обработки детали по списку заданий<br>Удалить задание из списка                                            |

| Режим                | Операции                                                                                                                                                                                  |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Формы<br>Shapes      | Создать программу обработки детали по одной из стандартных типовых форм<br>Создать программу обработки детали по созданной пользовательской форме                                         |
| Утилиты<br>Utilities | Проверить значение параметров управления<br>Изменить значение параметров управления<br>Настроить машину регулировкой параметров управления                                                |
| Удаление*<br>Delete* | Удалить файл из каталога программ обработки деталей, ASCII, дополнительных (вспомогательных) кодов, конфигурации CAD или пользовательских форм<br>Удалить файл с флoppi-диска в дисководе |

*Примечание:* \* Не может быть выполнен во время резки.

### Часто используемые экраны

Чаще всего при работе на Vurnu используются следующие экраны:

- панель инструментов;
- экран главного меню;
- экран состояния;
- экран скорости подачи;
- экран помощи;
- экран клавиатуры;
- экран цифровой клавиатуры;

### Панель инструментов

Панель инструментов Vurnu расположена внизу каждого экрана (рис. 6.25). При нажатии соответствующей области на панели инструментов осуществляется переход от текущего экрана к одному из четырех видимых экранов: «Главное меню» (Menu), «Помощь» (Help), «Состояние» (Status) или «Скорость подачи» (Feedrate). Нажатие на то же место на панели снова возвращает к предыдущему экрану.

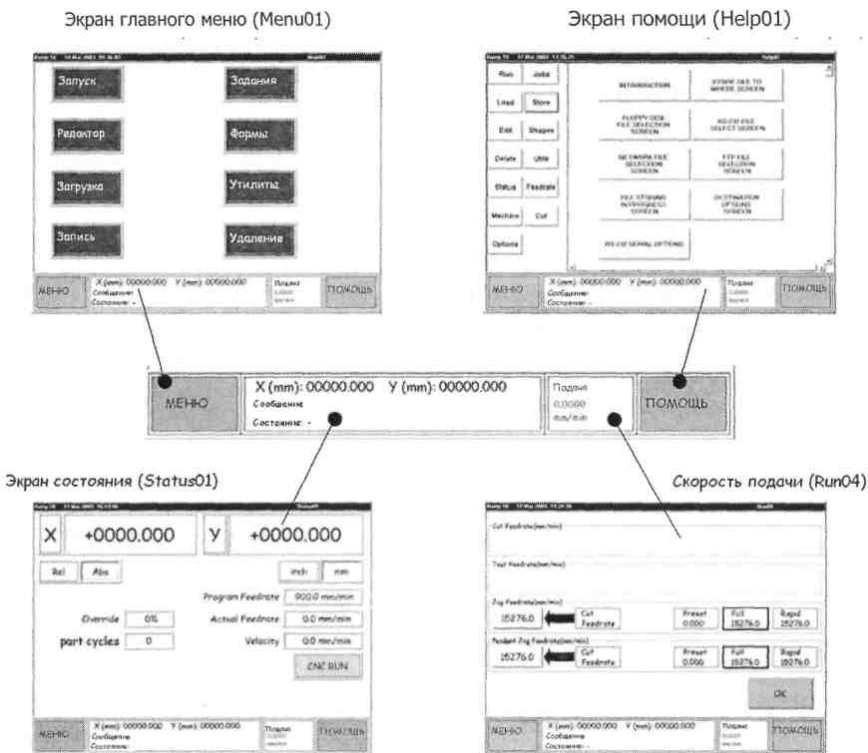


Рис. 6.25. Панель инструментов Vmru и связанные с ней экраны

## Меню

Нажатие кнопки «Меню» (Menu) приводит к переходу к экрану главного меню. Возможно выбрать любой из восьми режимов и перейти в него. При нажатии «Меню» дважды появляется последний активный экран режима «Запуск» (Run).

## Окно состояния

Окно состояния дает краткую картину о текущем положении инструмента, информацию о состоянии программы обработки детали и состоянии работы системы управления Vmru, как показано на рис. 6.26.

Для более подробного просмотра состояния системы нажмите на «Status Window». Появится «Status Screen». Нажмите на окно «Status» для возврата в предыдущий экран.

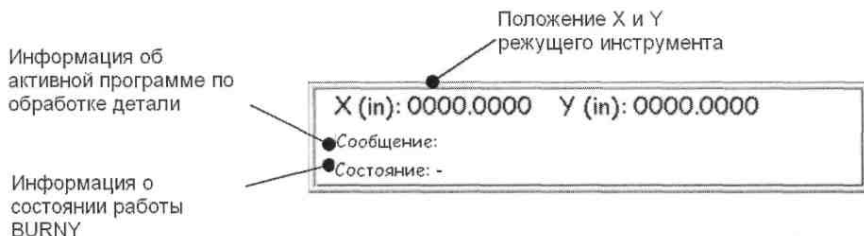


Рис. 6.26. Детали окна состояния на панели инструментов

Фон окна состояния показывает один из шести цветов, обозначающих состояние системы. Цвета и их значения перечислены в табл. 6.9.

Таблица 6.9

#### Значение цветов фона окна состояния

| Цвет      | Описание                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Белый     | Система управления Burny активна и готова                                                                                                                                                                                                                    |
| Зеленый   | Активна программа по резке / обработке детали                                                                                                                                                                                                                |
| Желтый    | Одна из осей превысила ограничение по ошибке рассогласования                                                                                                                                                                                                 |
| Красный   | Контроллер движения отключен из-за ошибки или аварийного останова. В этом случае система управления Burny не функционирует как контроллер и работу двигателей не отслеживает                                                                                 |
| Синий     | На экране состояния (Status 01) была выбрана кнопка «Числовое программное управление отключено» (CNC ВЫКЛ)                                                                                                                                                   |
| Оранжевый | Предупреждение о перегреве – внутренняя температура устройства Burny слишком высокая. Чтобы увидеть подробное состояние системы, нажмите на окно состояния для просмотра экрана состояния. Для возврата в предыдущий экран нажмите на окно состояния еще раз |

## Экран «Описание» («Status»)

Экран Status (рис. 6.27) содержит информацию:

- о положениях по осям  $X/Y$ ;
- скорости подачи;
- состоянии программы резки;
- включениях и выключениях числового программного управления.



Рис. 6.27. Экран состояния (Status 01)

## Меры безопасности

1. К работе на установке термической резки допускаются лица, прошедшие вводный инструктаж по технике безопасности при работе на оборудовании в качестве оператора.
2. Запрещается приступать к работе:
  - без заземления;
  - с неисправными системами блокировки и аварийного отключения;
  - с поврежденными электрическими разъемами и соединителями;
  - со снятыми защитными кожухами и панелями.
3. После окончания работы машину необходимо отключить от сети.
4. Оператору при работе категорически запрещено:
  - работать с открытыми защитными кожухами и экранами или отключенной блокировкой;

– смотреть без средств защиты на плазменное излучение или его зеркальное отражение.

5. Обязательно работать с приточно-вытяжной вентиляцией.

6. Работы на установке проводить в специальных защитных очках со стеклами СЗС-22 или аналогичными.

К работе на машине термической резки допускается только подготовленный и обученный персонал. Все цепи, узлы и блоки должны быть исправными.

### **Порядок включения и выключения**

1. Проверить подключение машины к внешним коммуникациям (вытяжная вентиляция, заземление, режущие и завихряющие газы, воздух). Включить необходимые коммуникации.

2. При выключенном блоке питания машины термической резки включить электропитание машины, включив главный выключатель на стойке управления.

3. Включить плазменный источник HiFocus 130i и выставить необходимые технологические параметры плазменной резки.

4. Включить систему ЧПУ Burny Phantom ST и загрузить программу обработки. Внести информацию о процессе резки: скорость резания, ширина резания и т. д.

5. Произвести обработку.

6. Выключить систему ЧПУ Burny Phantom ST и плазменный источник HiFocus 130i.

7. Закрыть баллоны с режущими и завихряющими газами, отключить вытяжную вентиляцию.

### **Порядок выполнения работы**

1. Включить установку согласно правилам включения / выключения.

2. Проверить размеры перемещения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ; полученные значения занести в отчет.

3. Проверить максимальную скорость рабочего хода и величину ускоренного перемещения; полученные значения занести в отчет.

4. Проверить работу системы слежения (определить максимальную высоту слежения и полученное значение занести в отчет).

5. Проверить диапазон регулирования расхода плазмообразующих и завихряющих газов (по ротаметру); полученные значения занести в отчет.

6. Проверить минимальную ширину реза при помощи микроскопа БМИ-МБС; полученные значения занести в отчет.

7. Проверить функционирование дистанционной системы наблюдения.

### **Содержание отчета**

1. Титульный лист.
2. Наименование и цель работы.
3. Схема процесса обработки.
4. Используемое оборудование, постоянные параметры и условия эксперимента.
5. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Охарактеризуйте область применения плазменной резки.
2. Назовите основные блоки машины термической резки «ППЛ Термит».
3. Перечислите основные меры техники безопасности при работе на машине тонкострунной плазменной резки.
4. Как устанавливаются технологические параметры процесса резки на плазменном источнике HiFocus 130i?
5. Как вводится информация о процессе резки в систему ЧПУ Burny Phantom ST?

**Рахимянов Харис Магсуманович  
Гилета Виктор Павлович  
Гаар Надежда Петровна  
Семенова Юлия Станиславовна  
Локтионов Александр Анатольевич  
Рахимянов Андрей Харисович  
Рахимянов Константин Харисович**

## **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ**

**Учебное пособие**

Редактор *Л.Н. Ветчакова*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Корректор *Л.Н. Кинит*  
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*  
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 26.02.2020. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.  
Уч.-изд. л. 10,46. Печ. л. 11,25. Изд. № 266/19. Заказ № 425. Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20