

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭТП

# Разделы курса

- 1. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
- 2. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА
- 3. ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ
- 4. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ
- 5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
- 6. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
- 7. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
- 8. ТЕРМОРЕЗАНИЕ

# 1. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

- Нагрев сопротивлением
- Индукционный нагрев
- Диэлектрический нагрев
- Дуговой нагрев
- Электронно- и ионно-лучевой нагрев
- Плазменный нагрев
- Лазерный нагрев

Теплопроводность характеризуется:

ТЕПЛОВЫМ  
ПОТОКОМ

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\ell \cdot F \cdot \lambda}$$

конвекции  
й

закон Ньютона-  
Рихмана

$$Q = \alpha_k (T_c - T_r) \cdot F,$$

излучение  
м

$$Q = C_s \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

Электрический ток, проводники 1 и 2  
рода.

Закон Ома для металлов имеет вид

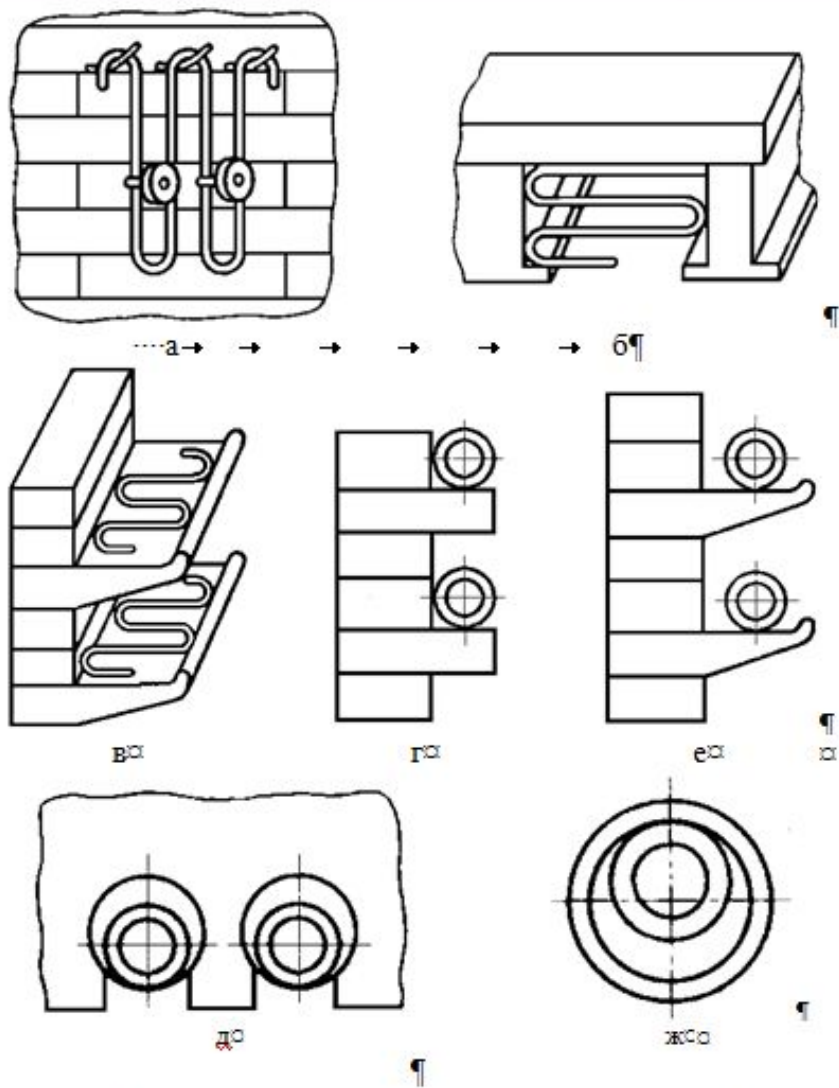
$$j = n_e \cdot e_o \cdot \mu_e \cdot E,$$

Закон Джоуля - Ленца:

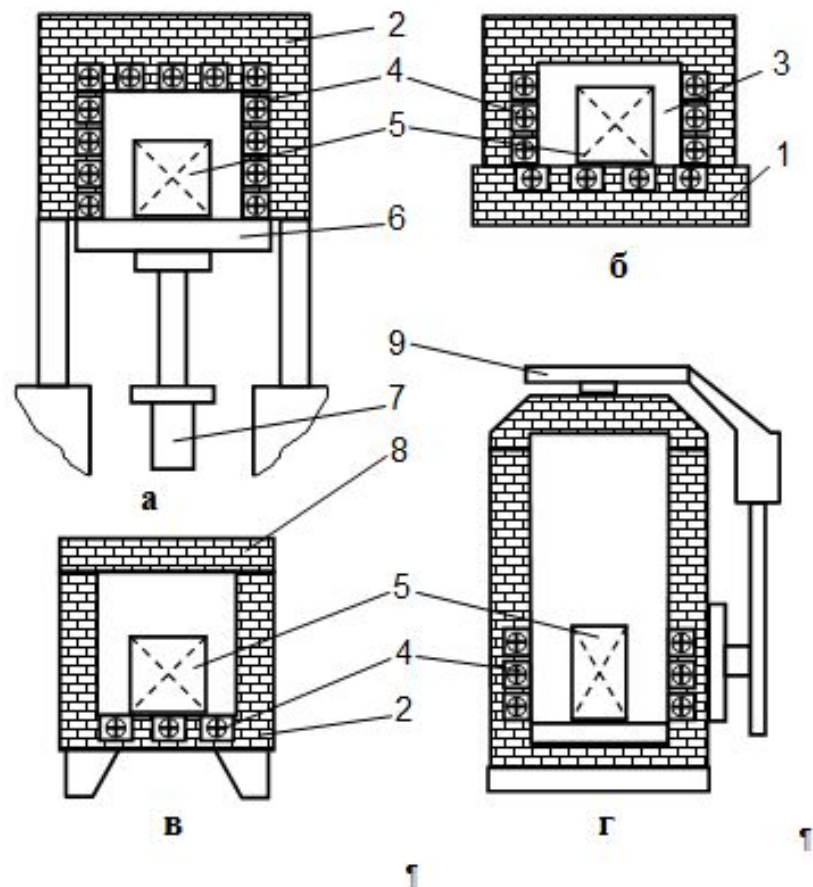
$$Q = I^2 \cdot R \cdot t,$$

Выделяющаяся  
в проводнике  
мощность:

$$P = \frac{U^2 \cdot S}{\rho \cdot \ell}$$



Расположение нагревателей в электрических печах



Печи сопротивления периодического действия: а – элеваторная; б – колпаковая; в – камерная; г – шахтная; 1 – стенд; 2 – камера печи; 3 – жаропрочный муфель; 4 – нагревательные элементы; 5 – нагреваемое изделие (салка); 6 – опускающийся под; 7 – подъемное устройство; 8 – свод; 9 – механизм подъема свода

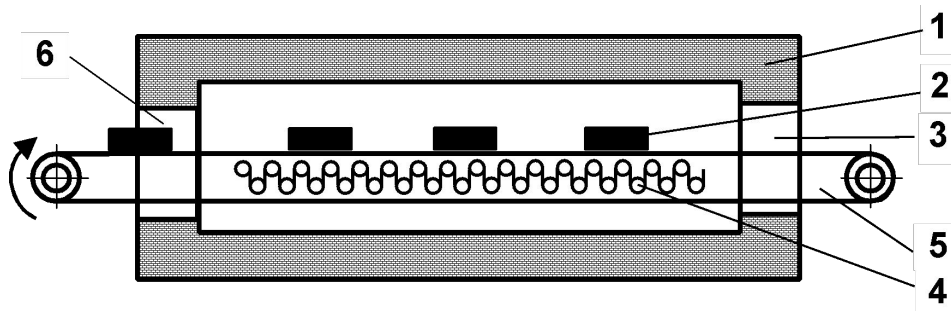


Схема конвейерной электropечи: 1 – теплоизолированный корпус; 2 – нагреваемое изделие; 3 – разгрузочное окно; 4 – нагревательные элементы; 5 – конвейер; 6 – загрузочное окно

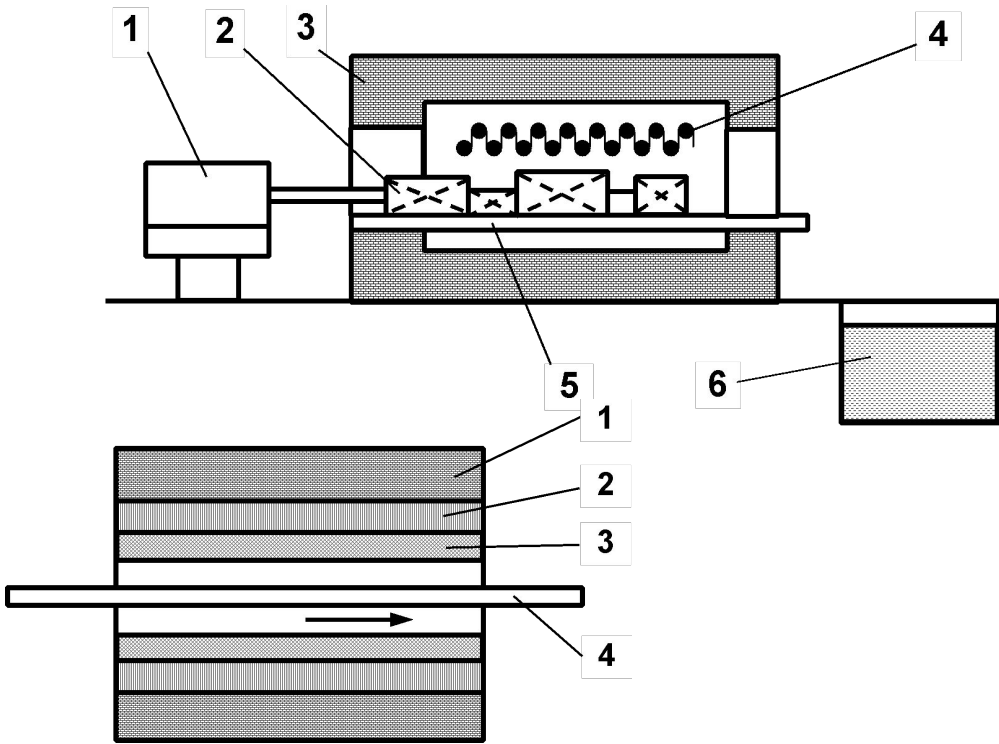


Схема толкательной печи: 1 – толкатель с приводным механизмом; 2 – нагреваемые изделия; 3 – теплоизолированный корпус; 4 – нагревательные элементы; 5 – подина печи; 6 – закалочная ванна

Протяжная электropечь: 1 – теплоизолирующий корпус; 2 – нагревательный элемент; 3 – муфта; 4 – нагреваемые изделие

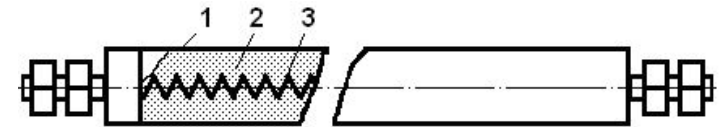
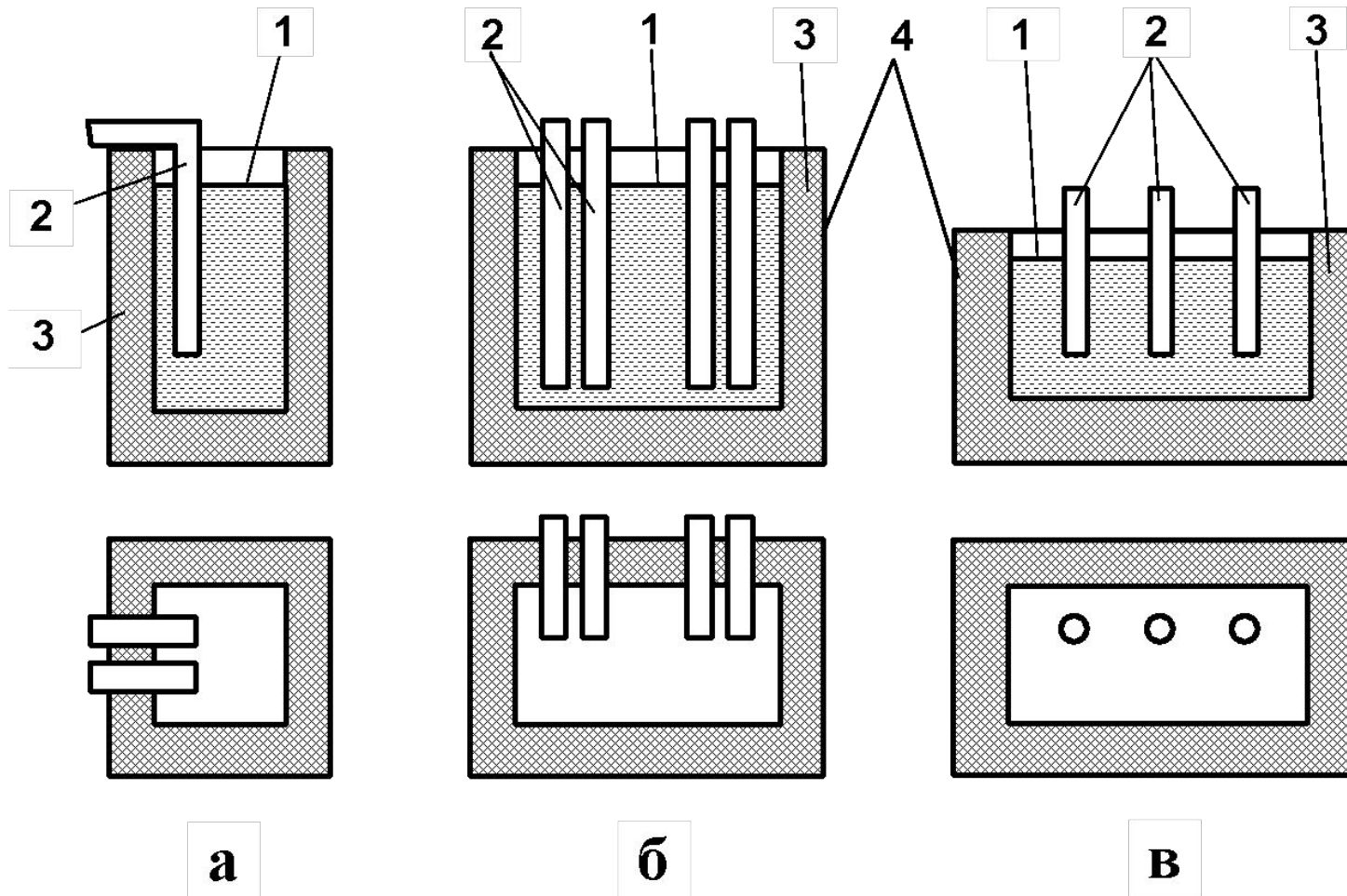


Схема трубчатого электронагревателя ТЭНа



Схемы электродных ванн с близко расположенными электродами: а, б – однофазные; в – трехфазные; 1 – уровень расплава соли; 2 – электроды; 3 – футеровка; 4 – кожух

# Электрошлаковые процессы

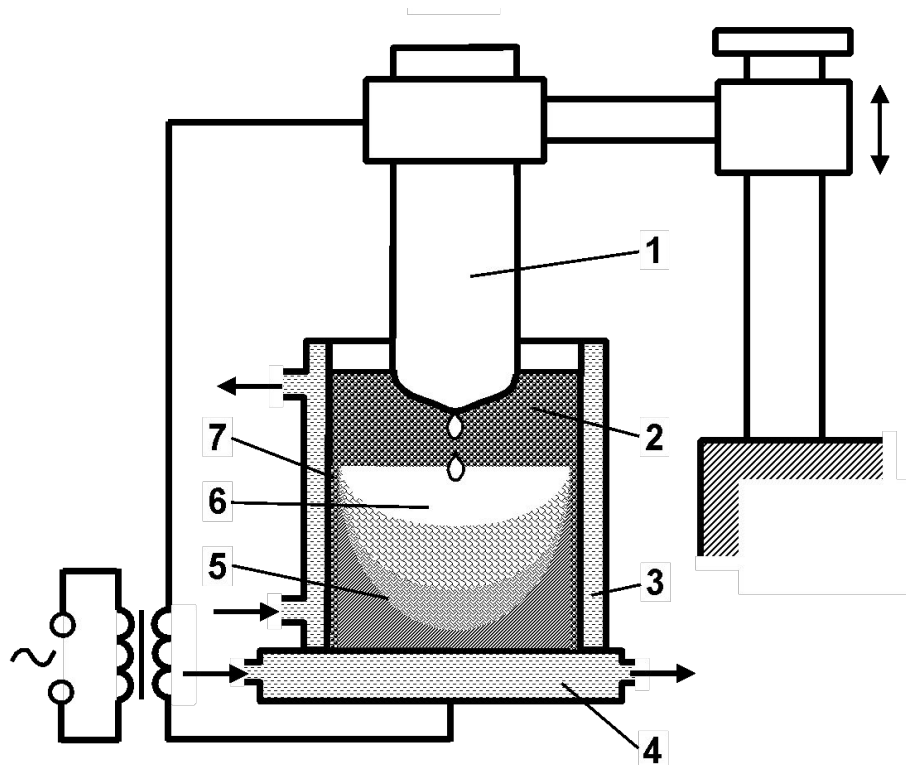


Схема установки ЭШП

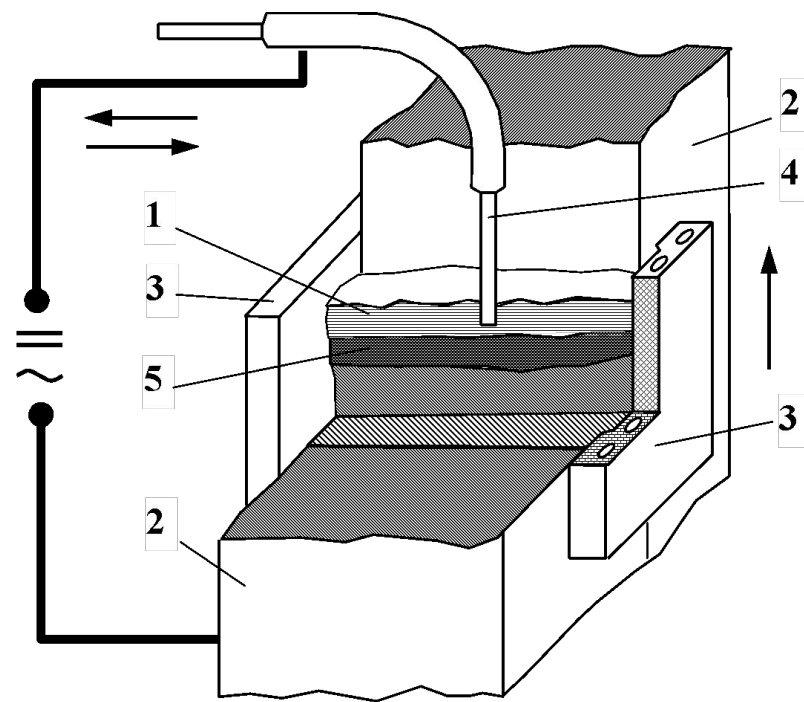
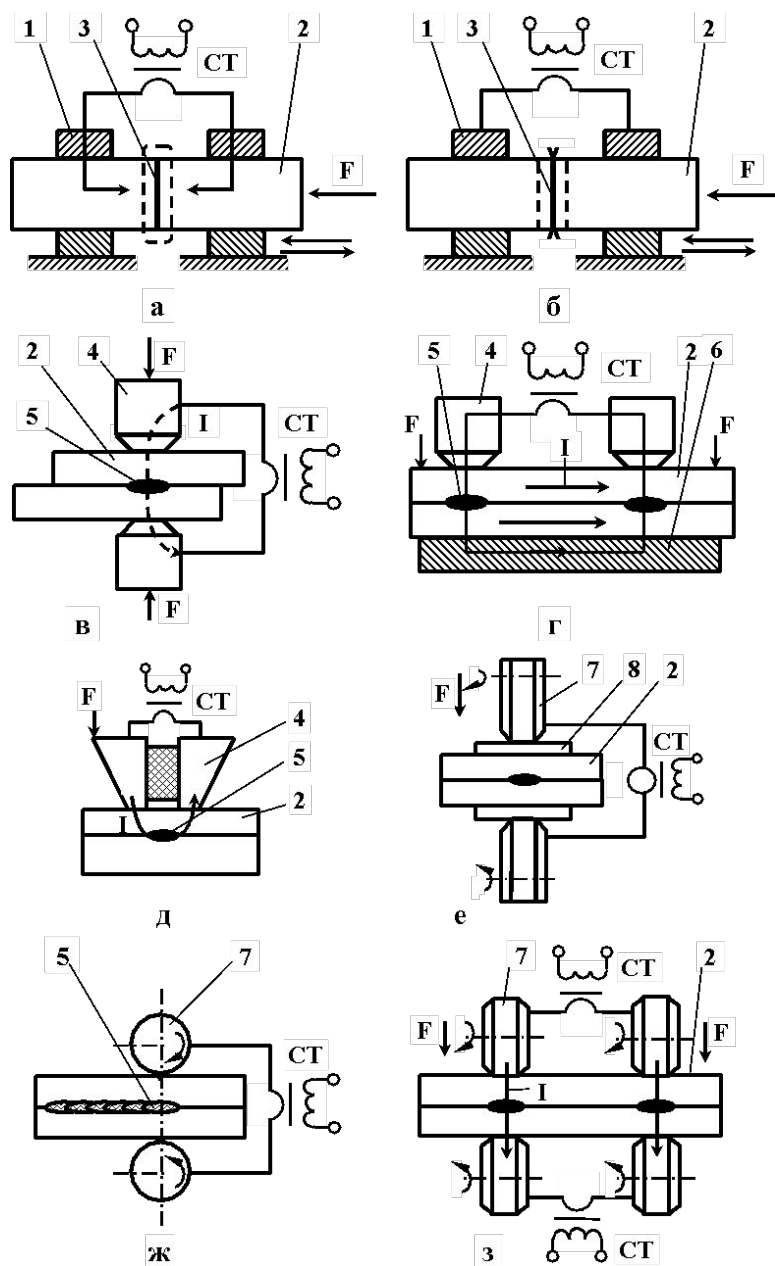


Схема ЭШС



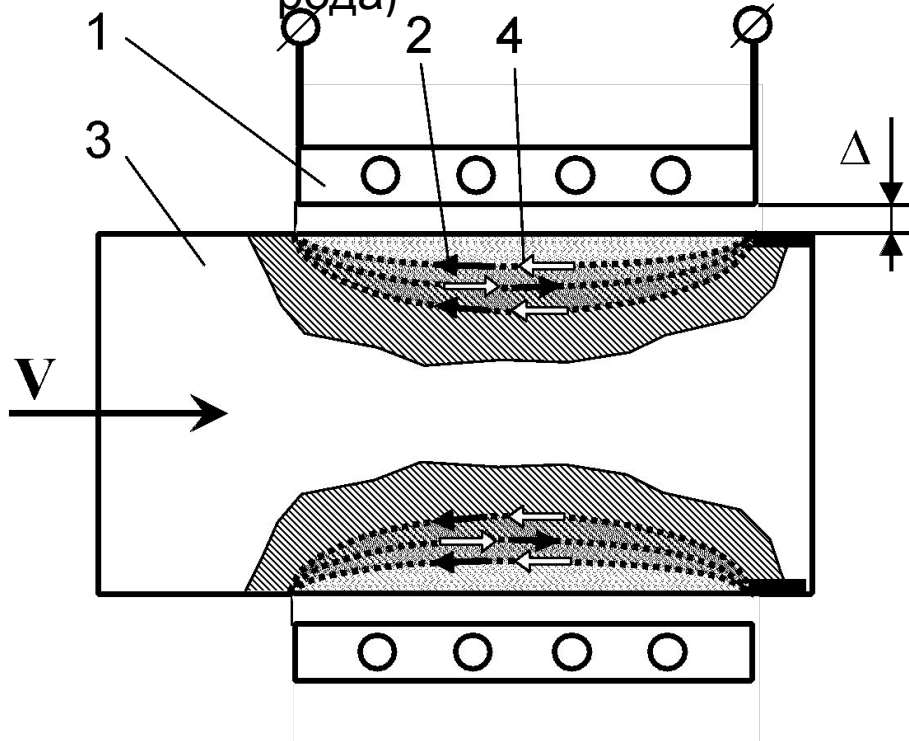


Схемы основных методов контактной сварки: стыковая сварка сопротивлением (а) и оплавлением (б); контактная сварка односточечная (в); двухточечная (г); односторонняя (д); роликовая сварка через подкладные элементы (е); одной парой (ж); двумя парами (з)

Закон Джоуля - Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t,$$

# Индукционный нагрев (проводников первого и второго рода)



Принципиальная схема индукционного нагрева: 1 – индуктор; 2 – магнитный поток в нагреваемом теле; 3 – нагреваемое тело; 4 – наведенный ток;  $\Delta$  – воздушный зазор

Возникающая ЭДС в нагреваемом теле  $E = 4,44 \cdot \Phi \cdot \omega \cdot f \cdot 10^{-8}$  (В) при известном значении сопротивления нагреваемого тела обеспечивает возникновение в нем вихревого тока 4 и выделение соответствующей мощности:

$$P = I^2 \cdot r = E^2 \cdot \frac{r}{Z^2}.$$

Глубина проникновения

$$\Delta_{\text{э}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}.$$

# Индукционные плавильные установки

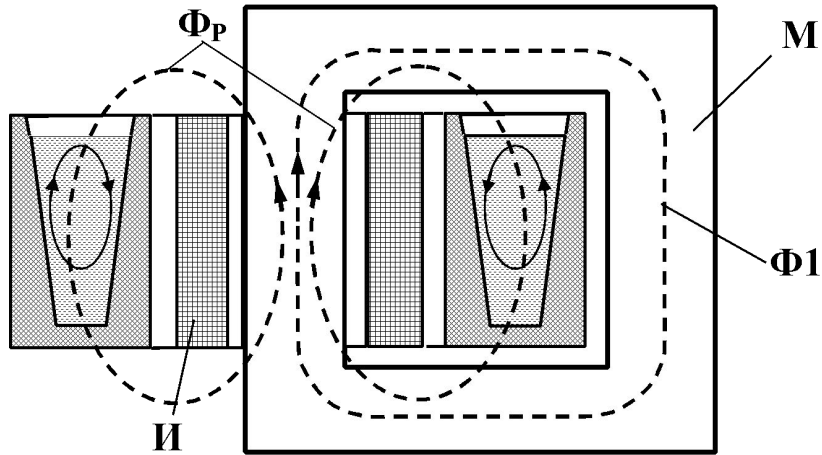
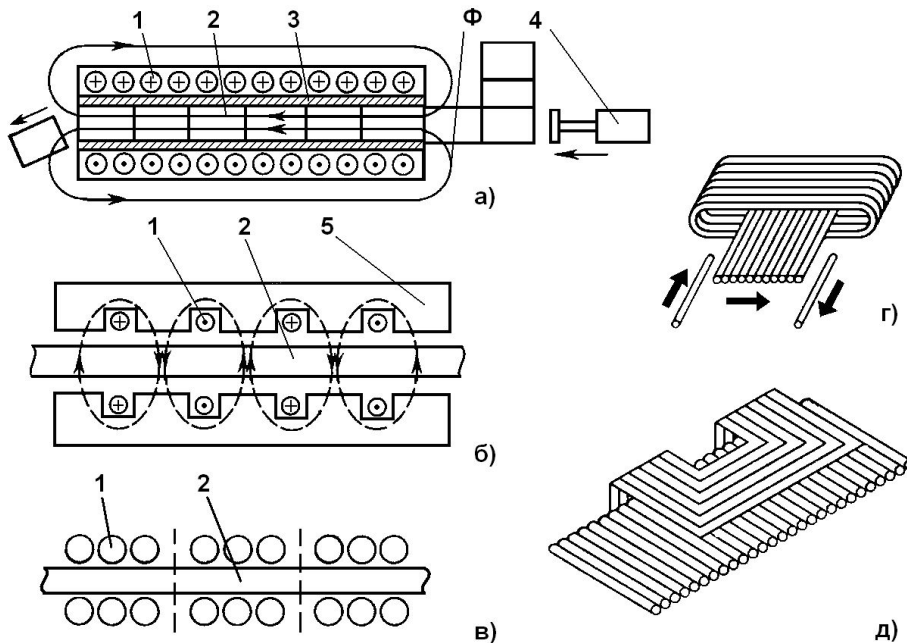
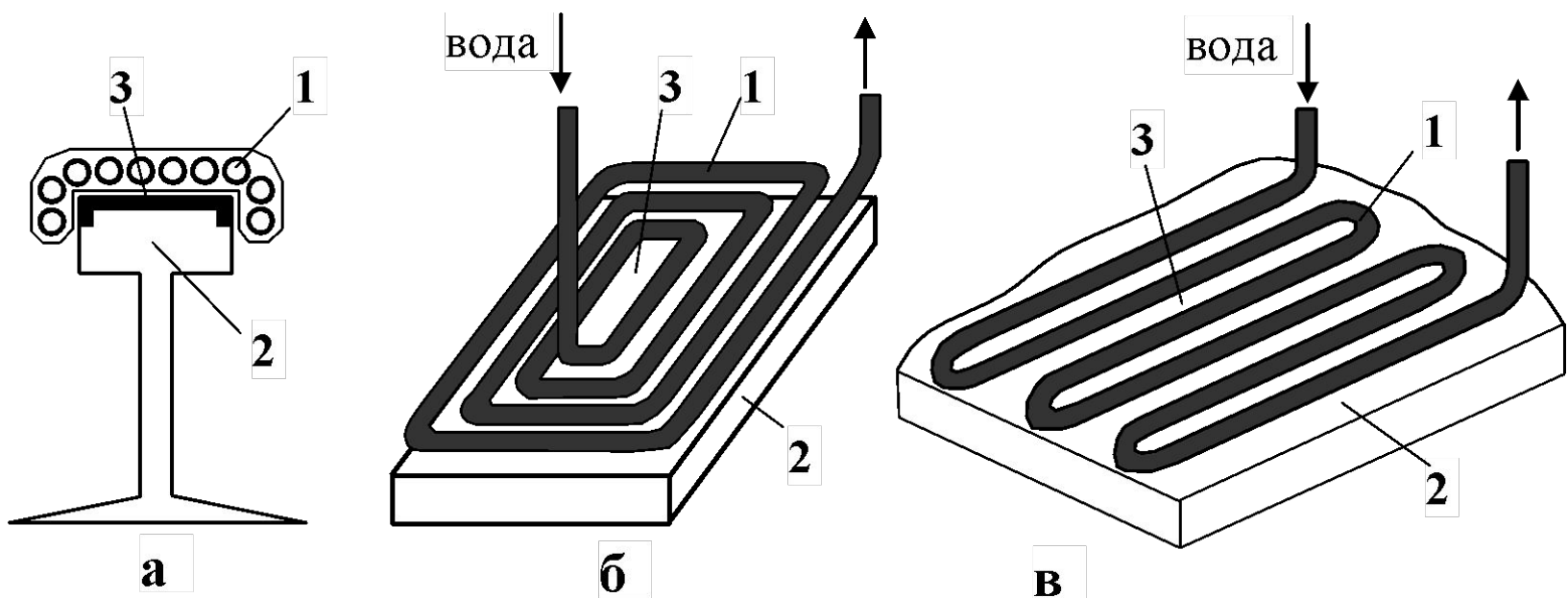


Схема канальной открытой однофазной печи со стержневым магнитопроводом



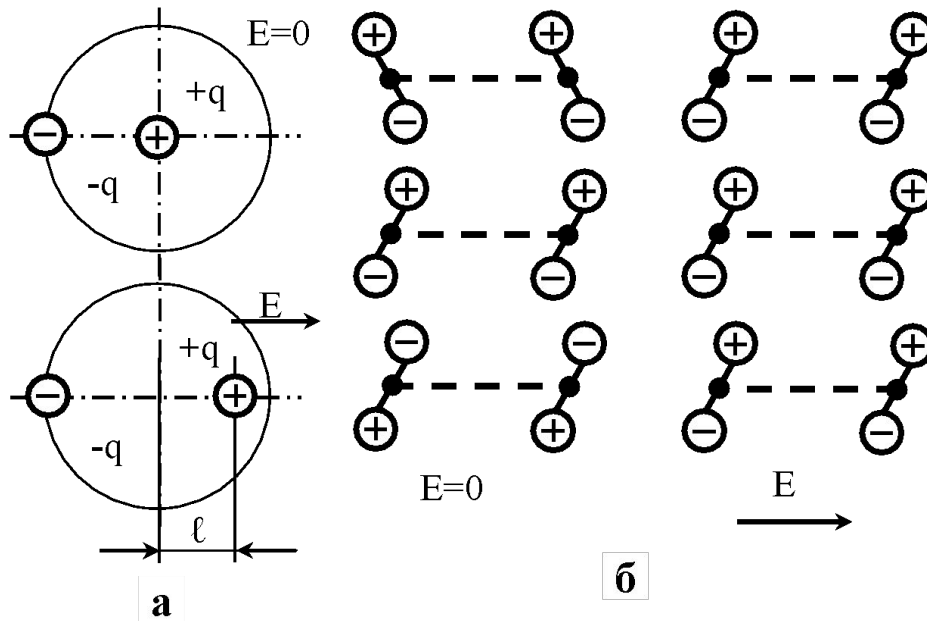
Схемы индукционных нагревательных установок непрерывного действия в продольном (а, в, г) и поперечном (б, д) магнитном поле;

1 – индуктор; 2 – нагреваемое изделие; 3 – теплоизоляция; 4 – механизм перемещения заготовки; 5 – магнитопровод.



Технологические схемы поверхностного индукционного нагрева плоских тел: 1 – индуктор; 2 – нагреваемое изделие; 3 – нагреваемый слой изделия

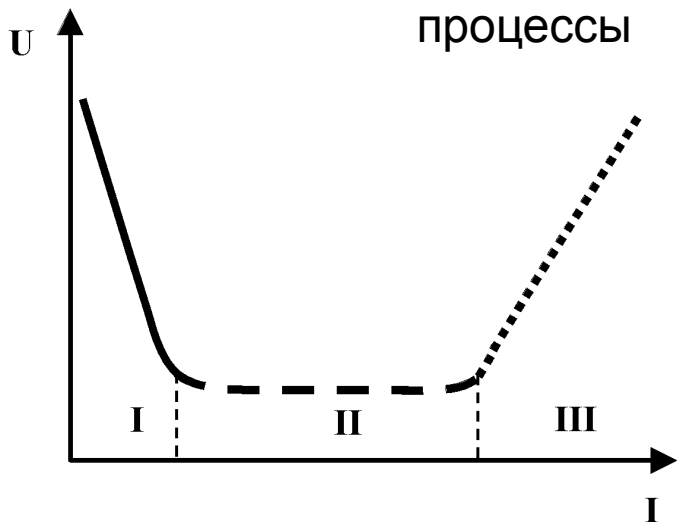
## Диэлектрический нагрев



Виды поляризации диэлектрика в электрическом поле: а – поляризация атомов; б – ориентационная поляризация

Основой диэлектрического нагрева является быстрое и равномерное выделение теплоты при прохождении тока через диэлектрик или полупроводник, помещенный в переменное электрическое поле. В результате центры электрического действия положительных и отрицательных частиц не совпадают и во внешнем пространстве такая молекула воспринимается как диполь, т. е. как система двух равных, но противоположных зарядов  $+q$  и  $-q$ , смещенных друг от друга на расстояние  $l$

# Дуговые процессы



Вольтамперная характеристика электрической дуги

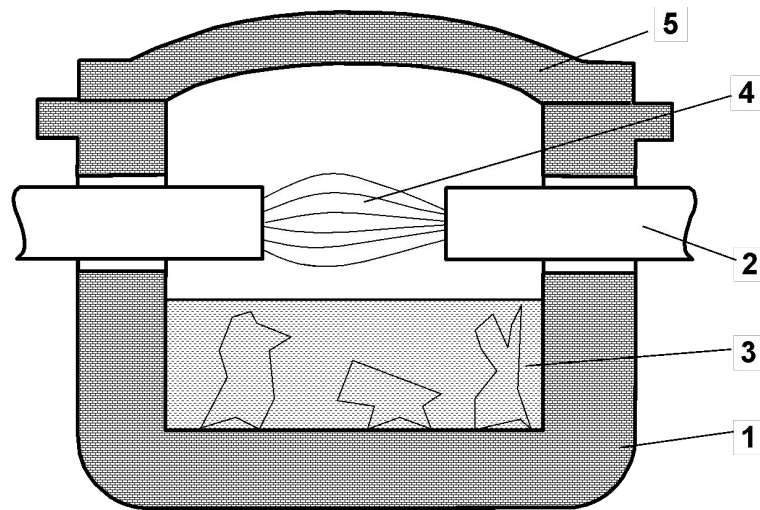


Схема дуговой печи косвенного действия

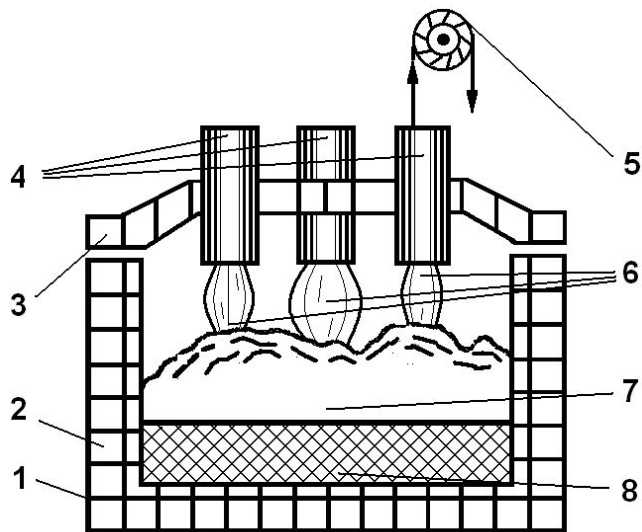


Схема дуговой сталеплавильной печи (прямого действия)

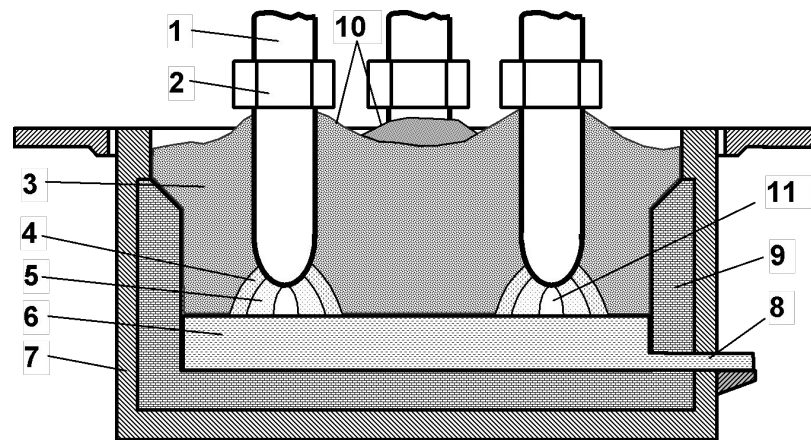


Схема печи для бесшлакового и малошлакового процесса (печи сопротивлением)

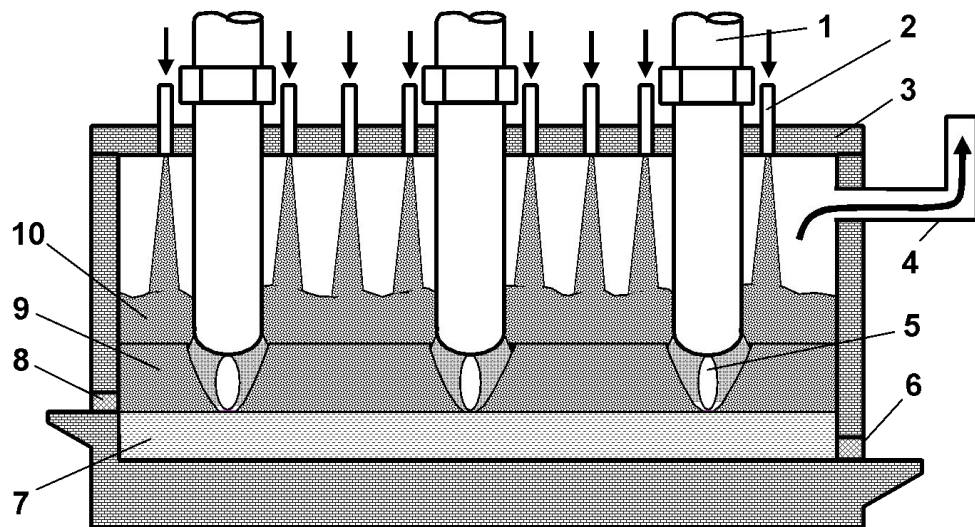


Схема печи для многошлакового процесса

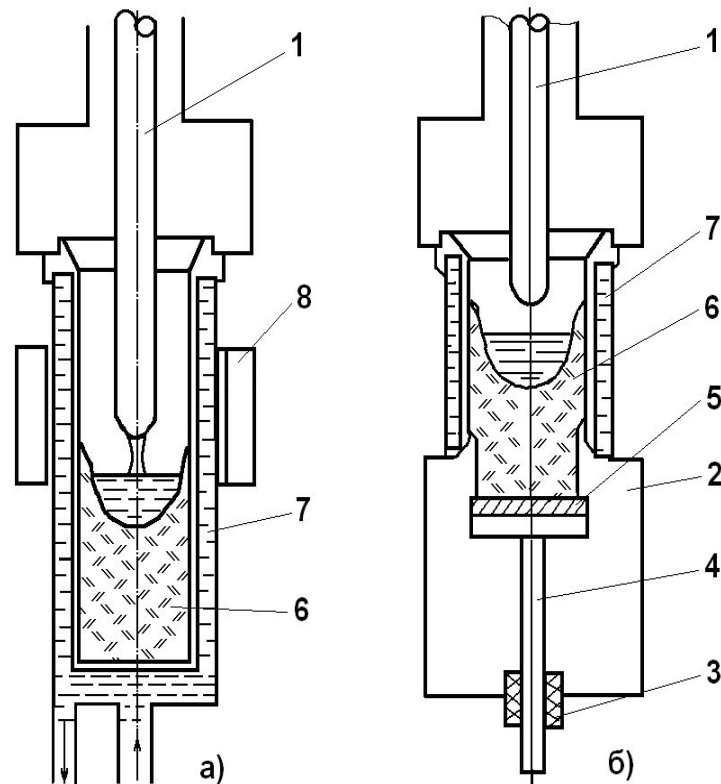


Схема ВДП с глухим кристаллизатором (а) и с вытягиванием слитка (б): 1 – электрод; 2 – холодильник; 3 – вакуумное уплотнение штока; 4 – тянущий шток; 5 – поддон; 6 – слиток; 7 – кристаллизатор; 8 – соленоид

# Плазменные процессы

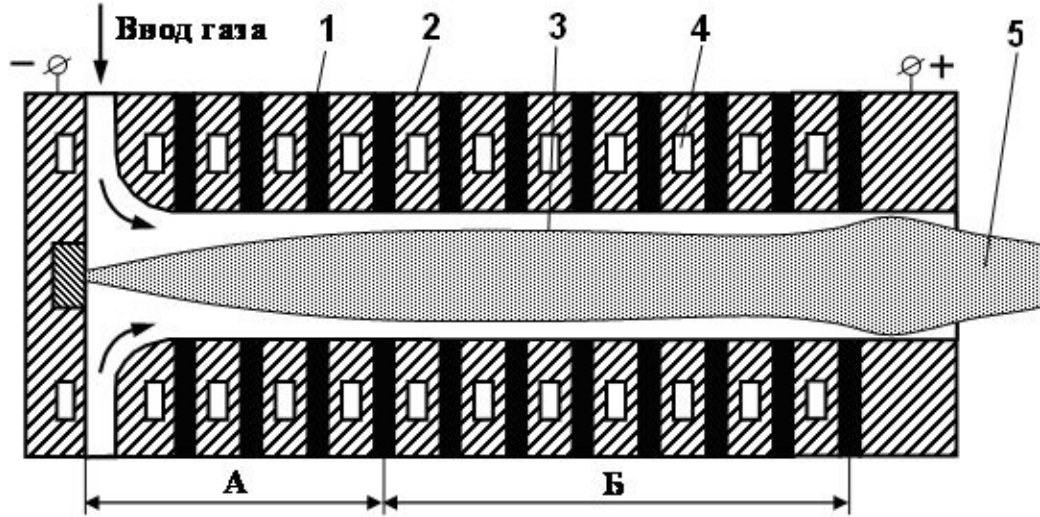
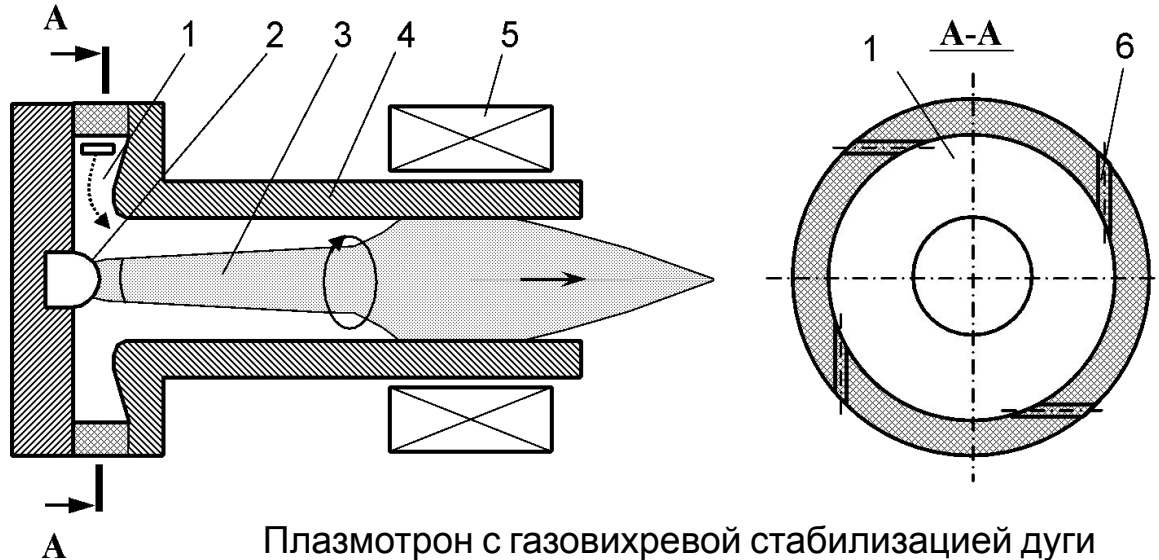


Схема плазматрона со стабилизацией дуги стенкой: А – переходный участок; Б – установившийся участок столба дуги; 1 – тепло- и электроизолятор; 2 – медная секция; 3 – дуга; 4 – охлаждение; 5 – плазма



Плазмотрон с газовихревой стабилизацией дуги



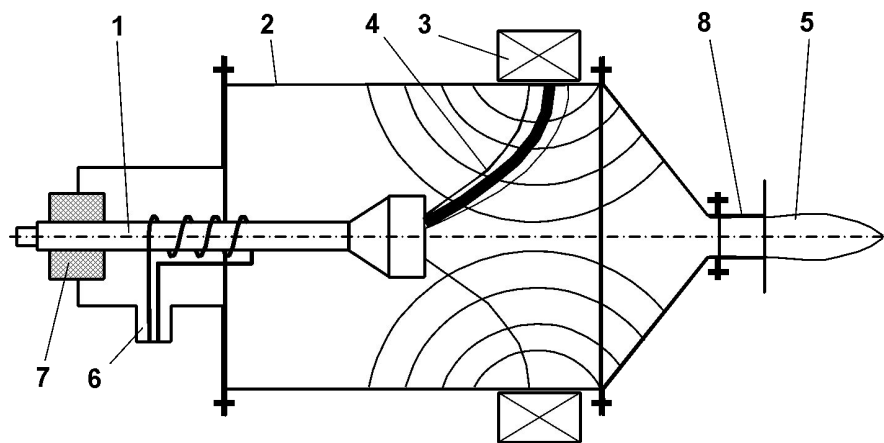
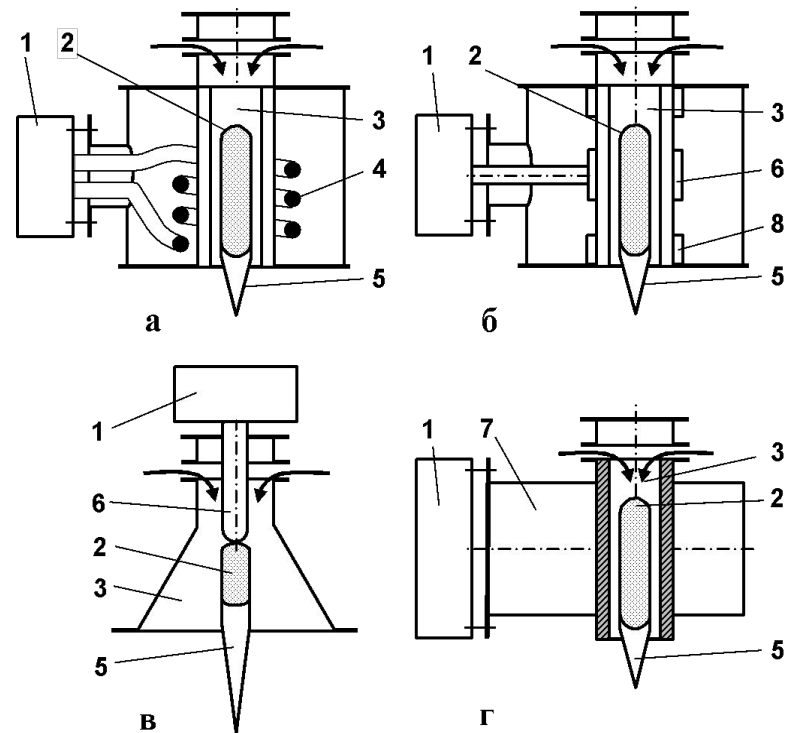


Схема плазматрона с магнитной стабилизацией дуги: 1 – центральный электрод; 2 – внешний электрод; 3 – соленоид; 4 – столб дуги; 5 – струя плазмы; 6 – подвод газа; 7 – изолятор; 8 - сопло



Схемы высокочастотных плазматронов

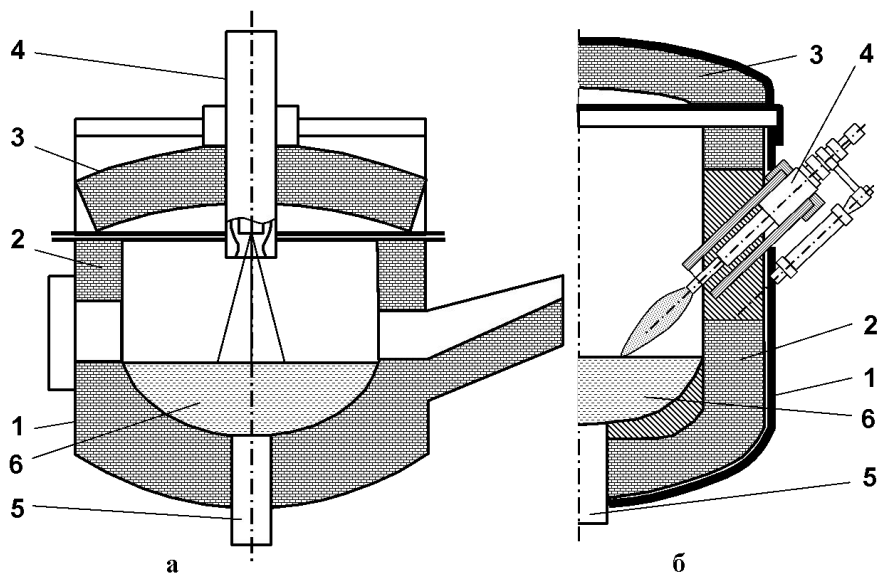


Схема плазменной печи с керамическим тиглем: а – с одним плазматроном в своде; б – с плазматронами, установленными в стенках:

1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – свод; 4 – плазматрон; 5 – подовый электрод; 6 - переплавляемый металл

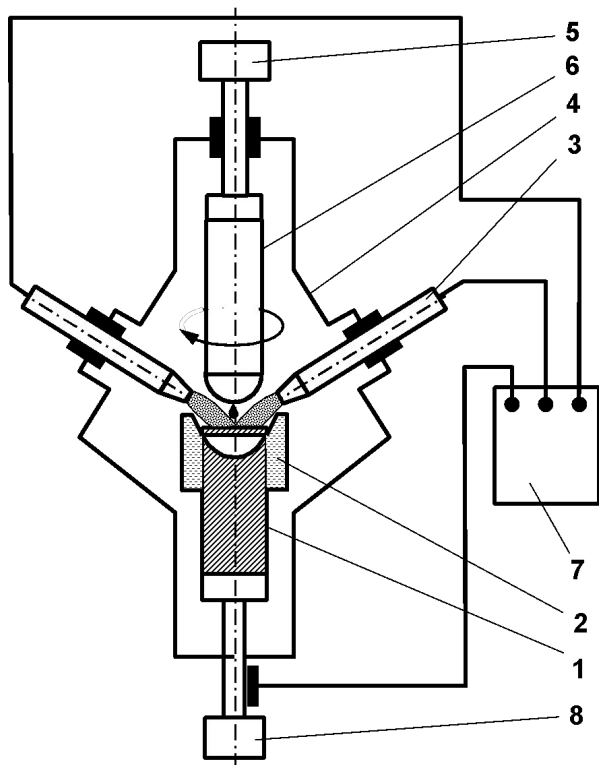


Схема печи для плавки в кристаллизаторе: 1 – слиток; 2 – кристаллизатор; 3 – плазмотрон; 4 – корпус печи; 5 – механизм подачи и вращения заготовки; 6 – переплавляемая заготовка; 7 – источник питания; 8 – механизм вытягивания слитка

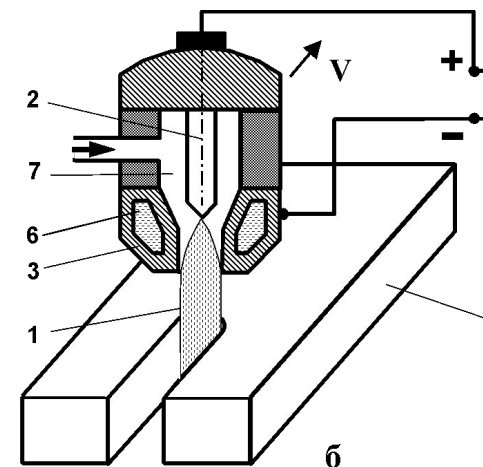
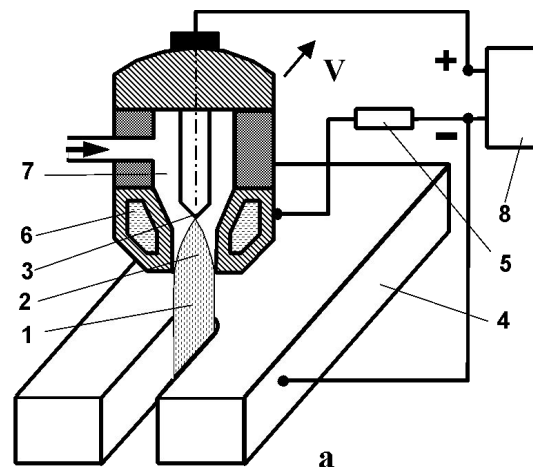


Схема резки металла плазменной дугой прямого (а) и косвенного действия (б): 1 – струя плазмы; 2 – дуга; 3 – катод; 4 – разрезаемый металл; 5 – сопротивление, ограничивающее ток дежурной дуги; 6 – система водяного охлаждения сопла; 7 – разрядная камера; 8 - источник питания

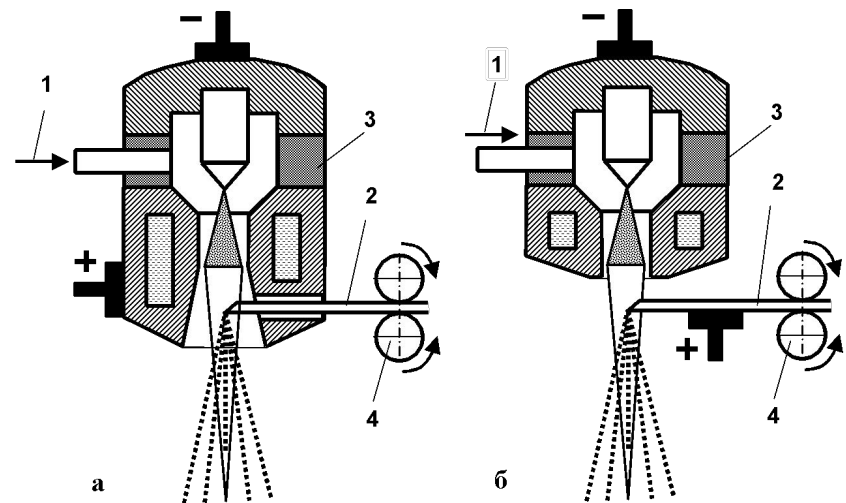
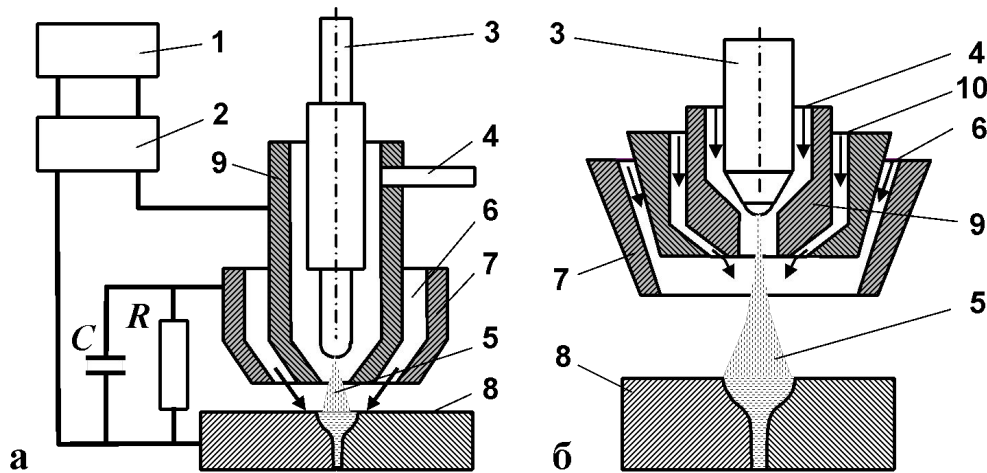


Схема устройств плазменной сварки: а – электрическая схема; б – схема потоков газа в плазматроне плазменной дуги: 1 – сварочный источник питания; 2 – осциллятор; 3 – неплавящийся электрод; 4 – плазмообразующий газ (аргон), 5 – плазменный поток; 6 – поток защитного газа; 7 – сопло для защитного газа; 8 – изделие; 9 – внутреннее сопло; 10 – поток фокусирующего газа

Схемы распыления обесточенной (а) и токоведущей (б) проволок дуговой плазмой: 1 – плазмообразующий газ; 2 – присадочная проволока; 3 – электроизолятор; 4 – подающий механизм

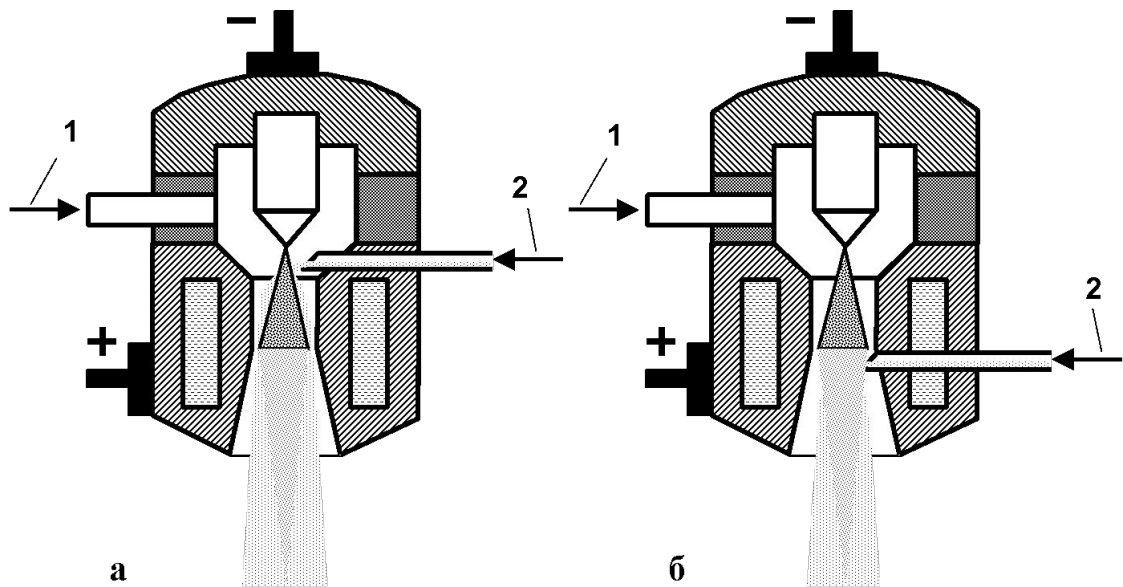


Схема ввода напыляемого порошка в столб плазменной дуги (а) и плазменную струю (б): 1 – плазмообразующий газ; 2 – присадочный порошок с газом

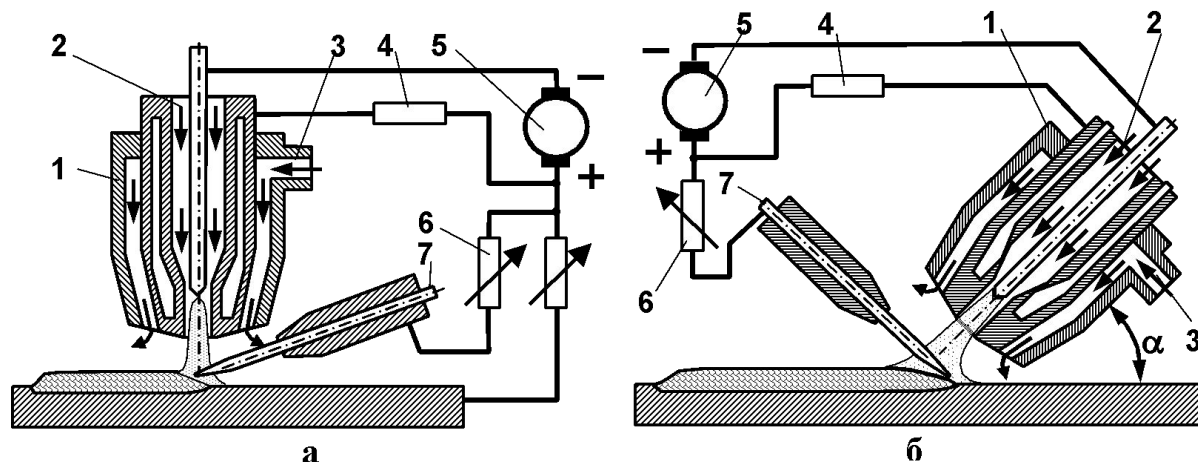
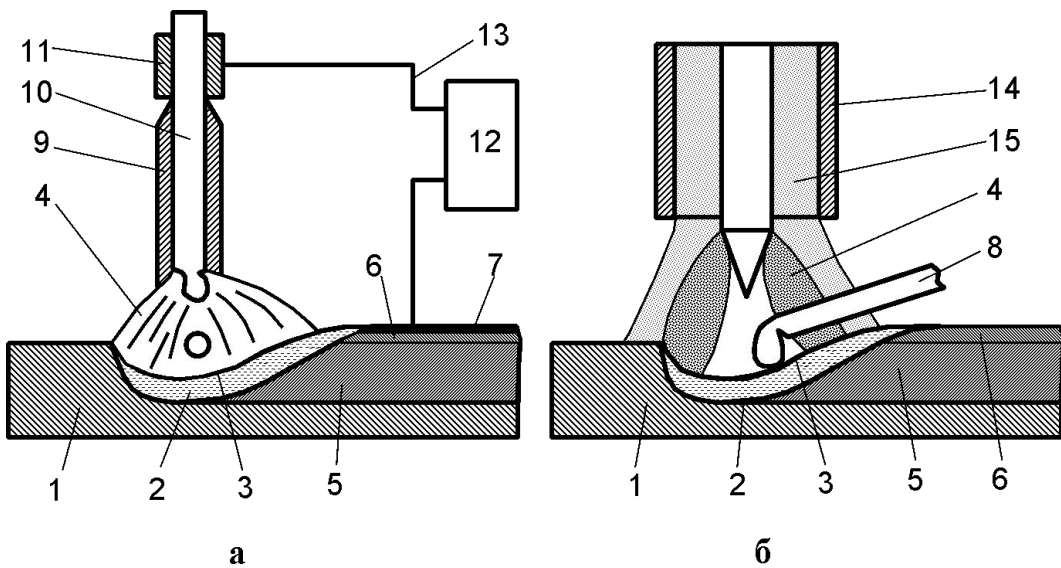


Схема наплавки с присадочной проволокой: а – изделие под током; б – изделие обесточено:

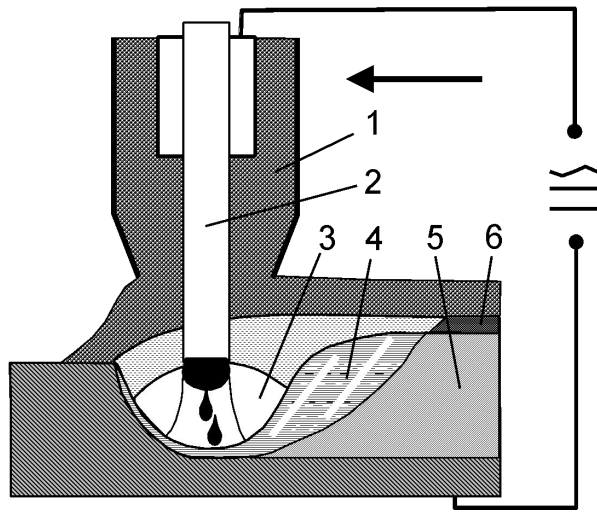
1 – горелка; 2 – ввод плазмообразующего газа;

3 – канал для ввода защитного газа; 4 – ограничительное сопротивление;

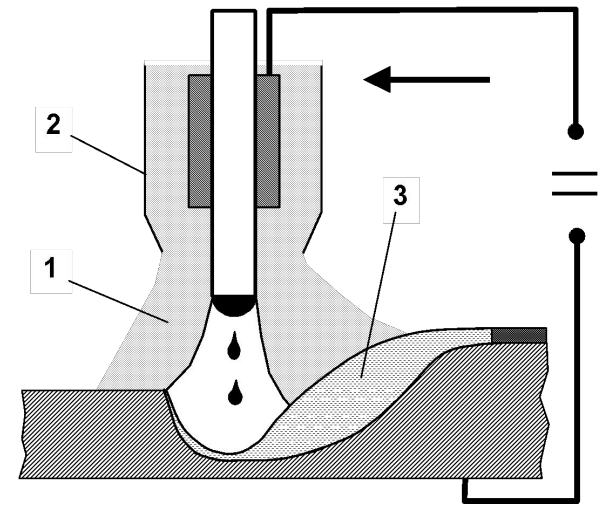
5 – источник питания; 6 – балластное сопротивление; 7 – присадочная проволока



Ручная дуговая сварка покрытым (а) и неплавящимся (б) электродом: 1 – основной металл; 2 – сварочная ванна; 3 – кратер; 4 – сварочная дуга, 5 – проплавленный металл; 6 – наплавленный металл; 7 – шлаковая корка; 8 – присадочный материал; 9 – покрытие электрода; 10 – стержень электрода; 11 – электрододержатель; 12 – источник питания; 13 – токоподвод; 14 – сопло; 15 – защитный газ



Сварка под флюсом: 1 – флюс; 2 - электродная проволока; 3 – газовый пузырь; 4 – сварочная ванна; 5 – шов; 6 - шлаковая корка



Сварка в защитном газе: 1 – защитный газ; 2 – сопло; 3 – сварочная ванна

# Электронно-лучевой нагрев

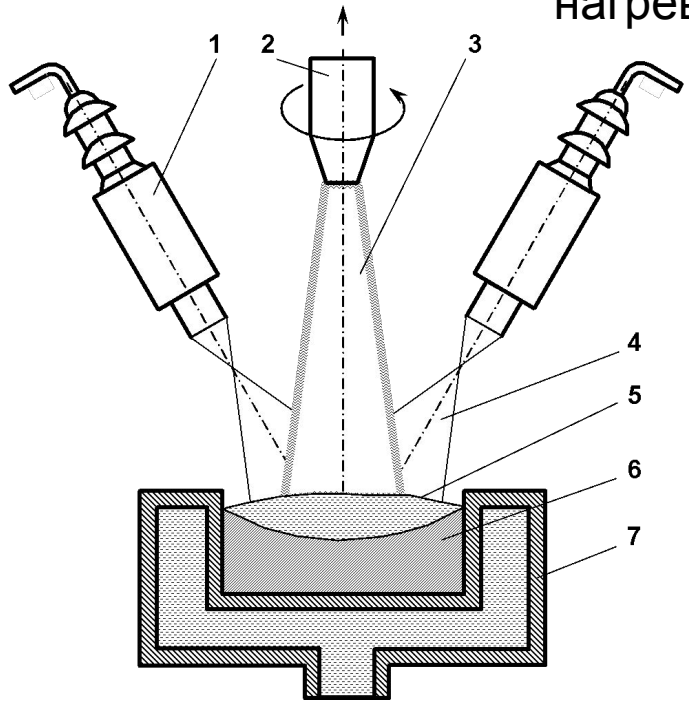


Схема ЭЛУ для выращивания монокристаллов: 1 – электронная пушка, 2 – затравка, 3 – монокристалл, 4 – электронный луч, 5 – расплав переплавляемого материала, 6 – переплавляемый материал, 7 – водоохлаждаемый тигель

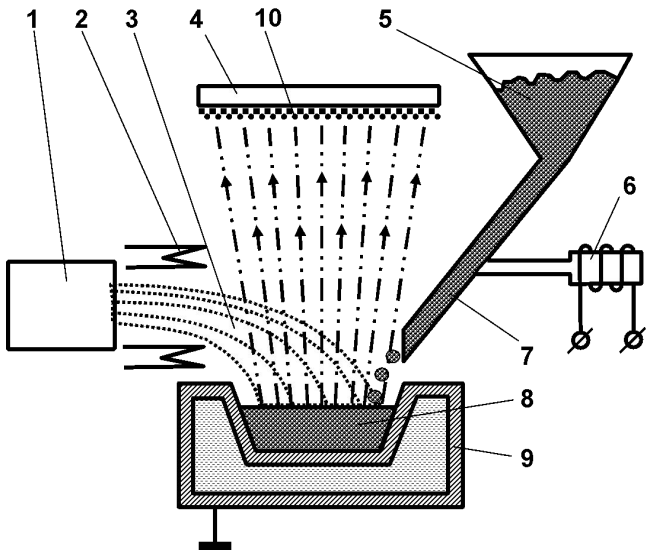
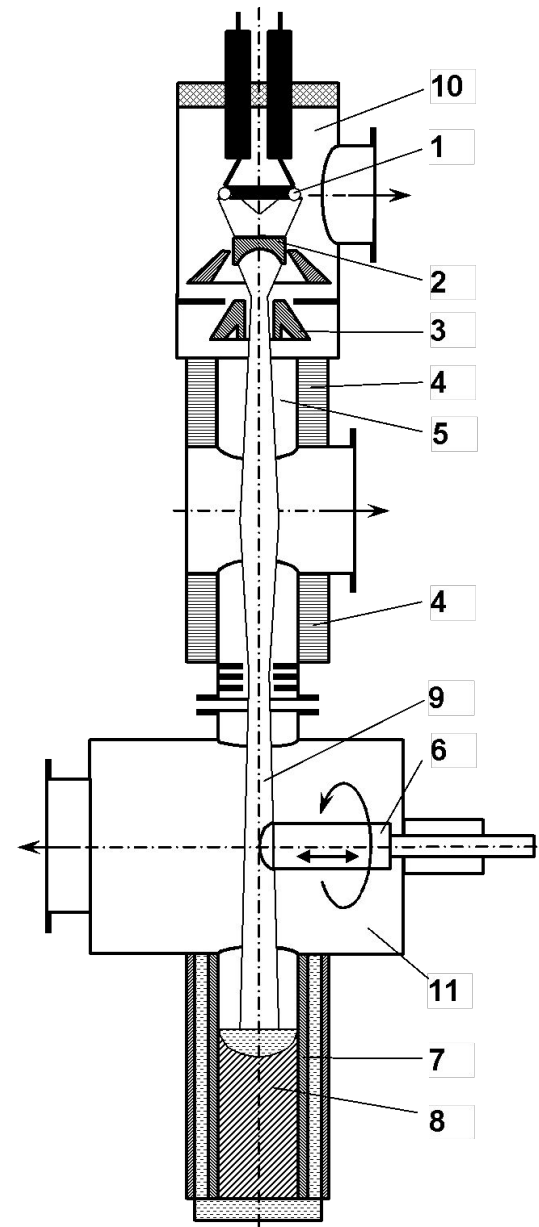


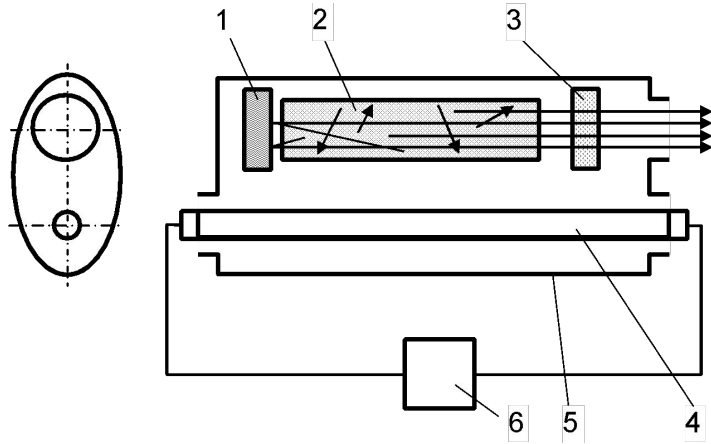
Схема электронно-лучевой испарительной установки

Схема ЭЛУ с аксиальной пушкой: 1 – катод вспомогательный, 2 – катод основной, 3 – анод, 4 – магнитная система, 5 – лучепровод, 6 – электрод-заготовка, 7 – кристаллизатор с охлаждающей жидкостью, 8 – переплавленный металл, 9 – электронный луч, 10 – катодная камера,

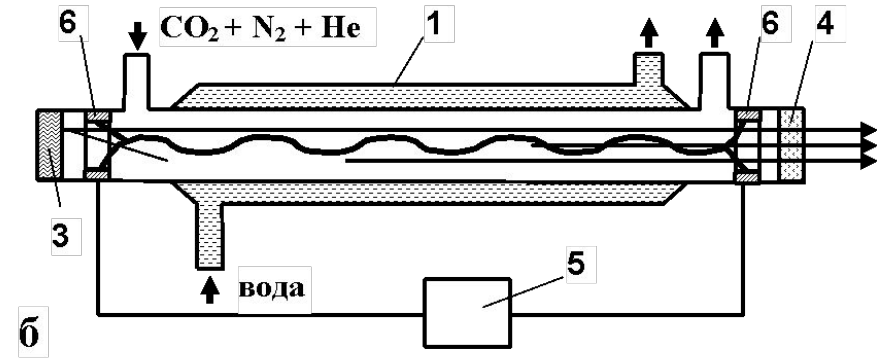
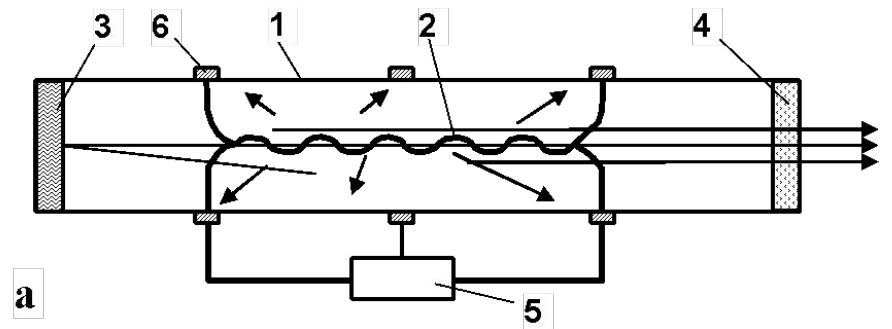


# Лазер

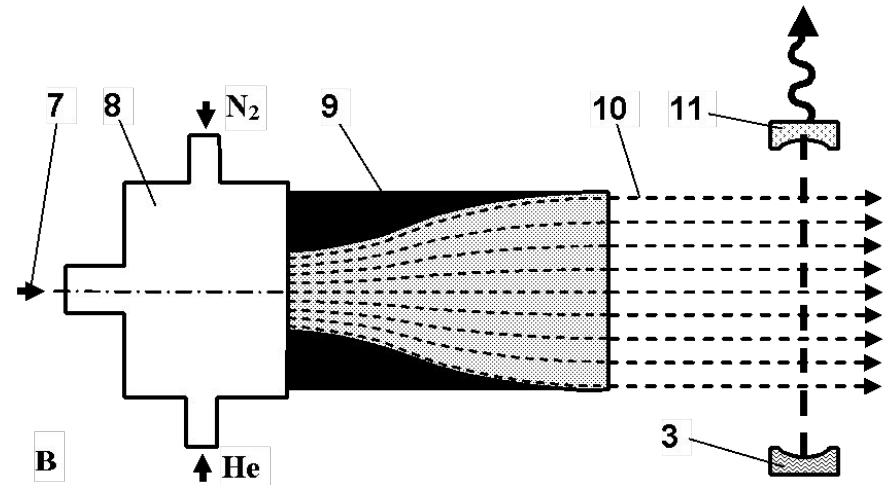
ы



Принципиальная схема  
твердотельного лазера



Схемы газовых  
лазеров: а – гелий-  
неоновый;  
б – углекислотный;  
в – газодинамический



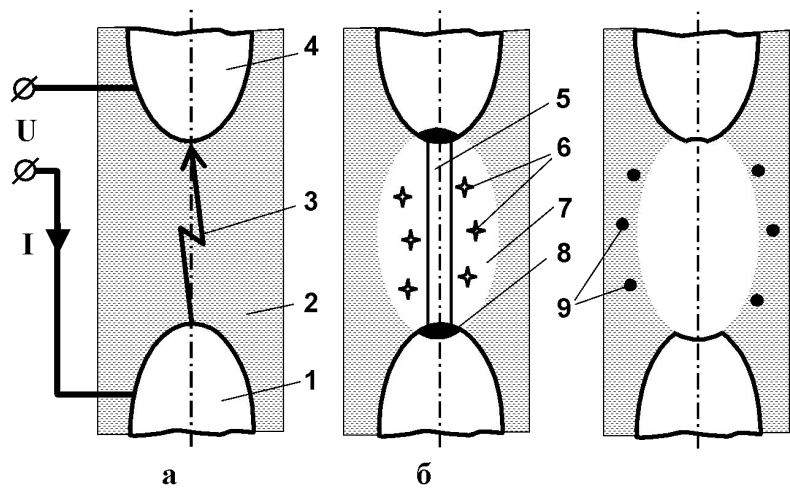
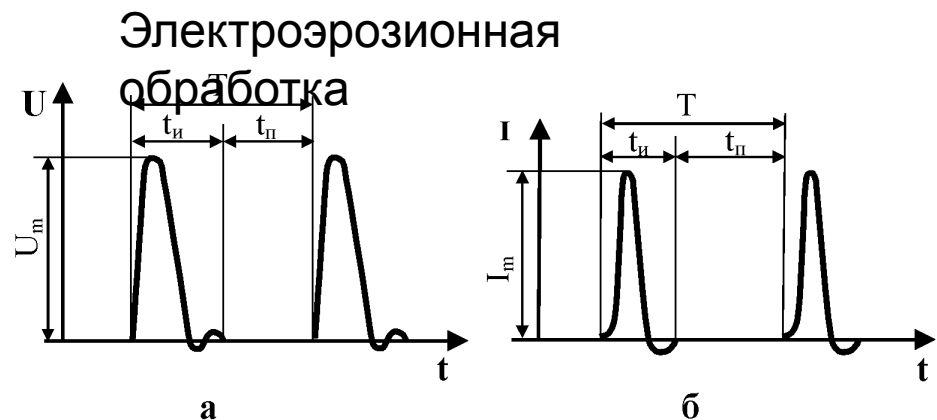


Схема физических процессов в межэлектродном промежутке при электроэрозионной обработке



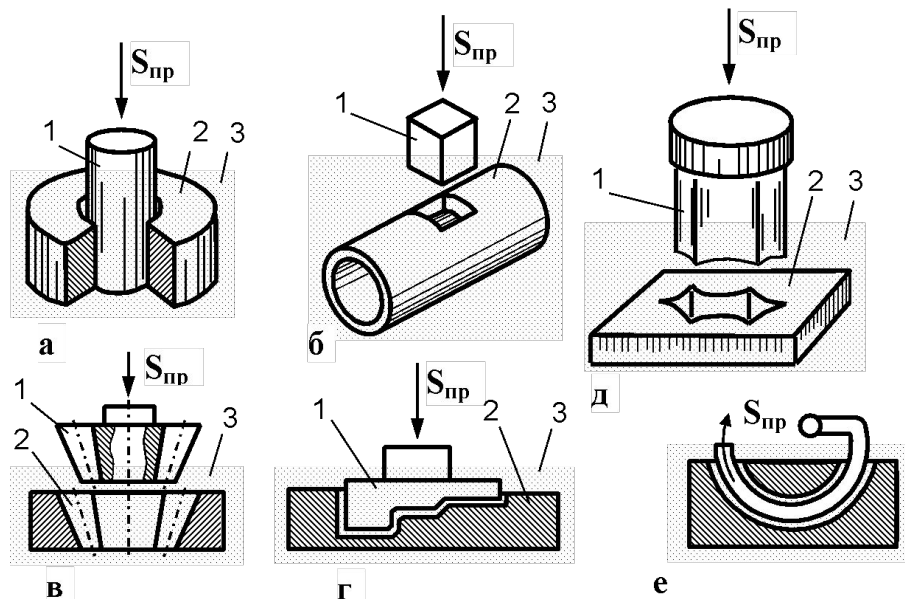
Импульсы напряжения и тока:  $U$  – напряжение на электродах; 1 – ток в межэлектродном промежутке

### Электроискровая обработка

$W=4-5$  Дж;  $f$  до  $1,5 \cdot 10^6$  кГц;

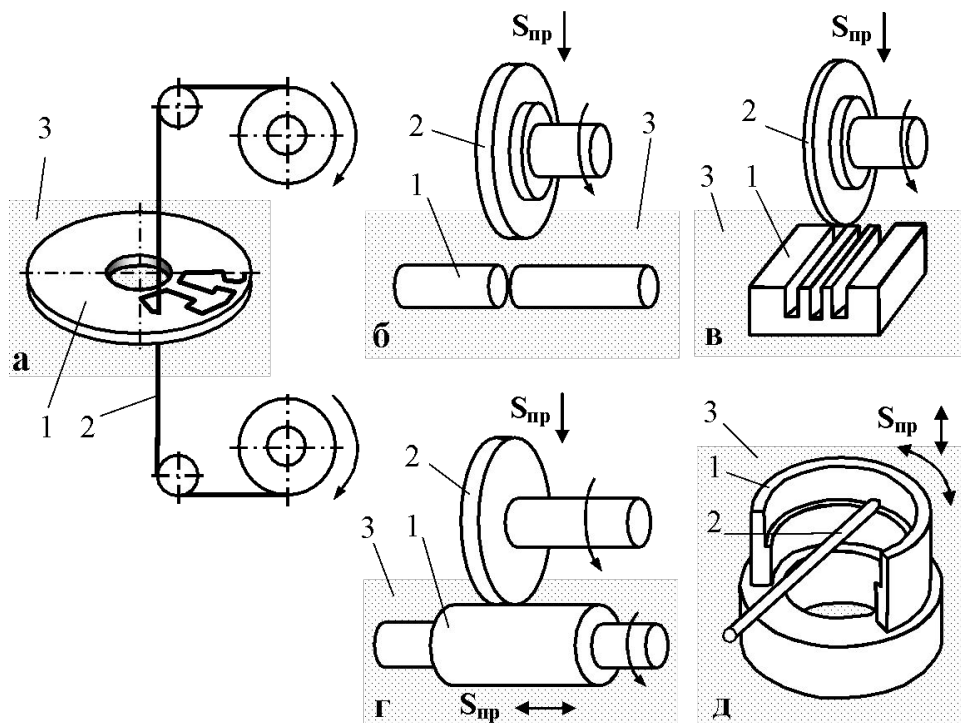
$U=250$  В

$Ra=1-2$



Схемы электроэрозионной обработки профилированным электродом: 1 – заготовка; 2 – электрод-инструмент; 3 – диэлектрическая жидкость;  $S_{пр}$  – направление подачи инструмента; методы прямого (а-г) и обратного (д) копирования; е – прошивание отверстий с криволинейной осью





Схемы электроэрозионной обработки непрофилированным электродом: а – вырезание сложнопрофильных деталей; б – резка заготовки; в – вырезка паза; г – электроэрозионное шлифование; д – растачивание; 1 – заготовке; 2 – не профилированный электрод; 3 – диэлектрическая жидкость

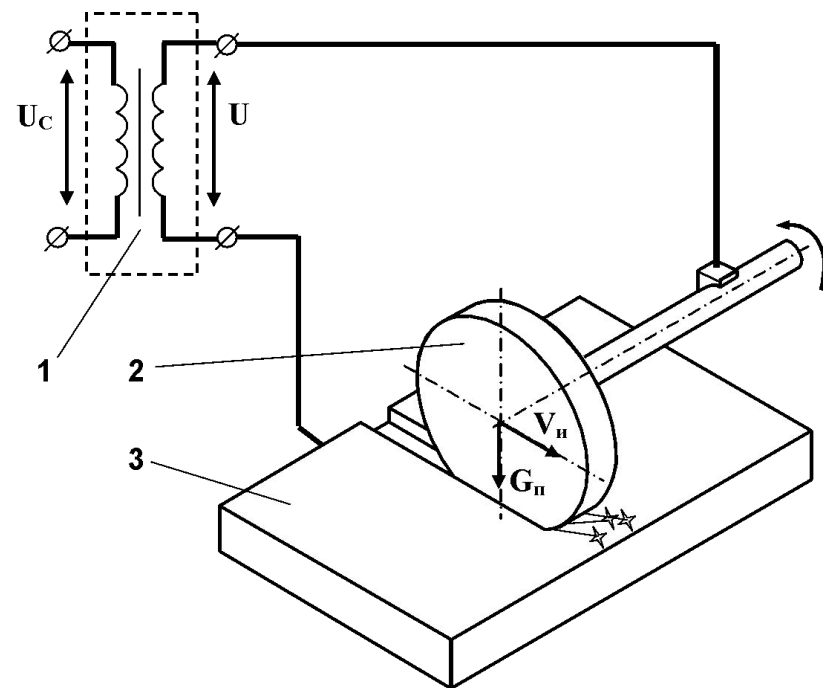


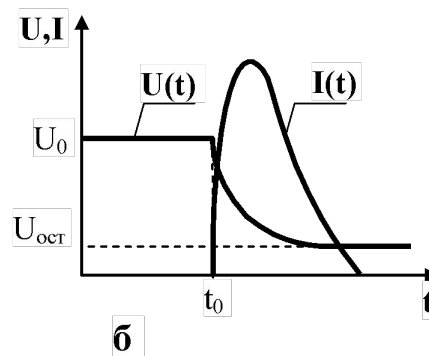
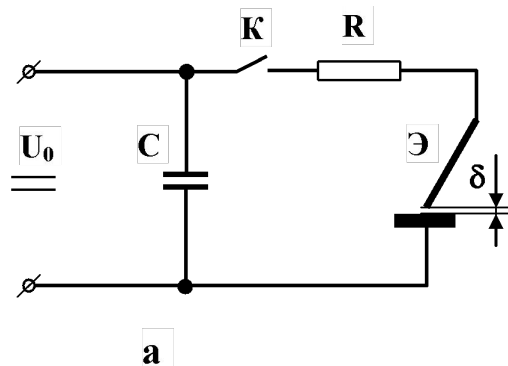
Схема электроконтактной обработки

Мощность электрического воздействия:

$$P = UI \cos \varphi ,$$

где  $U$  и  $I$  – действующие значения напряжения и тока.

### Электроискровое легирование (ЭИЛ)



Принципиальная схема RC-генератора (а) и характера изменения напряжения и тока при искровом разряде (б)

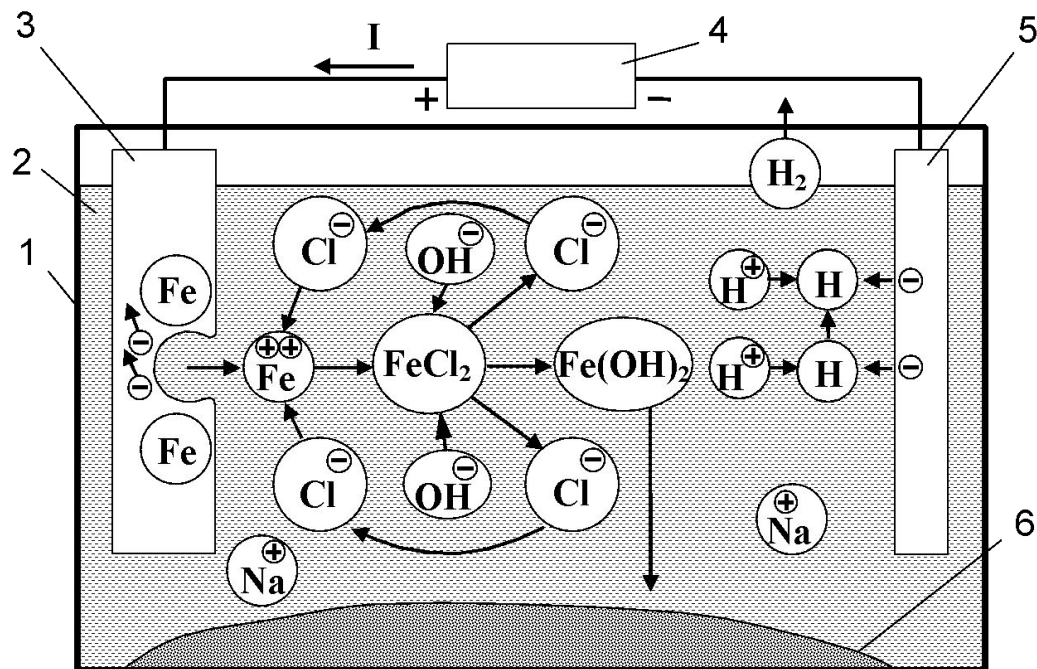


Схема анодной электрохимической обработки

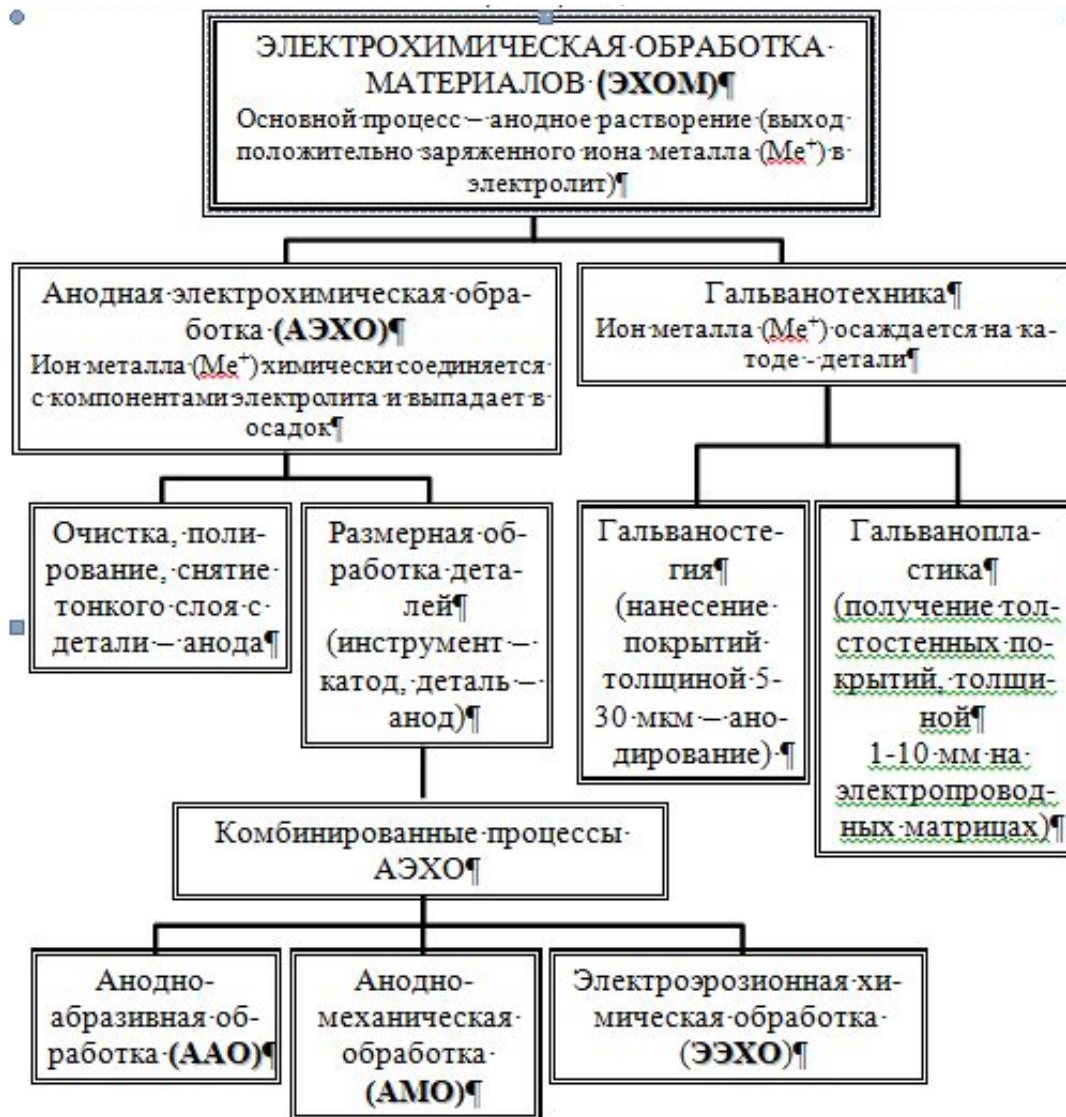


Рис. 5.1. Разновидности процессов электрохимической обработки материалов (ЭХОМ)

Электрохимическая обработка (ЭХО) заключается в копировании формы инструмента-катода 1 в аноде-заготовке 2

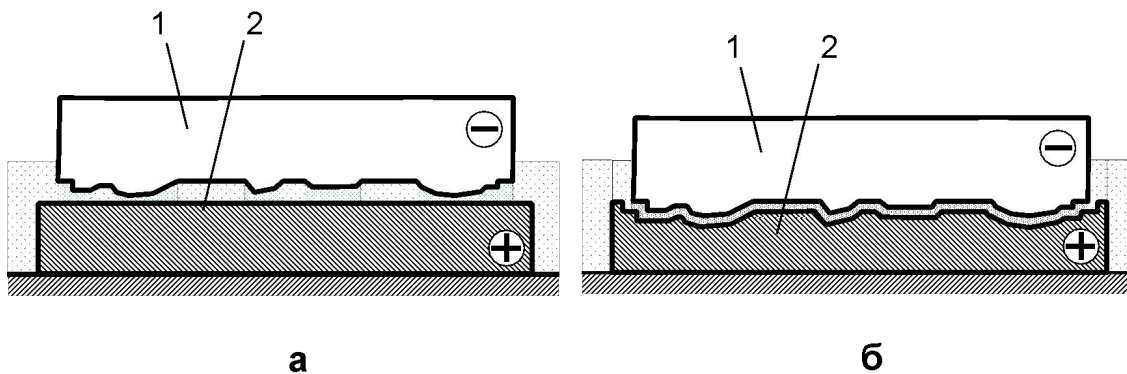


Схема размерной электрохимической обработки

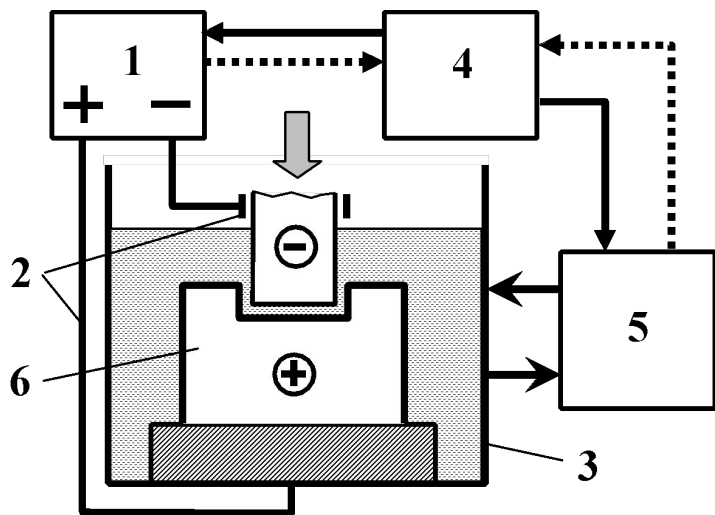
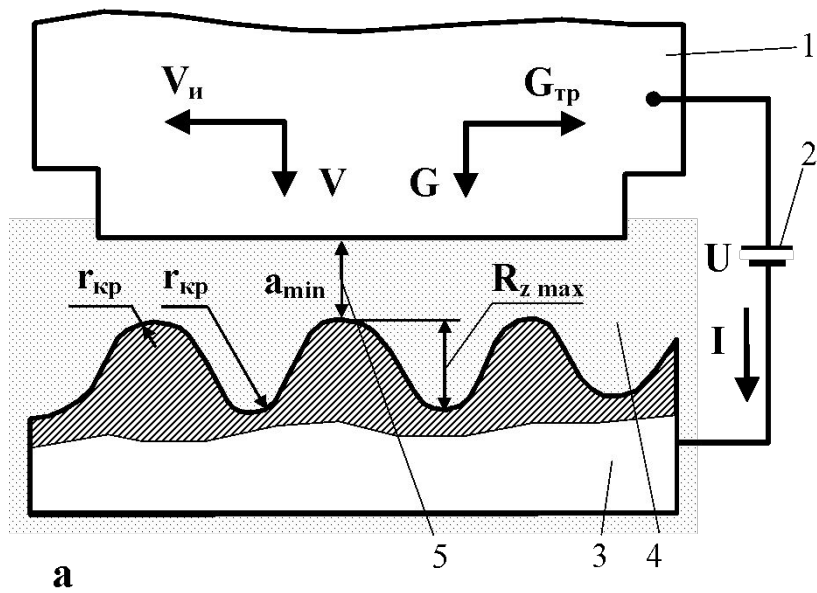


Схема установки ЭХО



а

б

Схема анодно-абразивной обработки: 1 – электрод-инструмент; 2 – источник постоянного тока; 3 – электрод-заготовка; 4 – раствор электролита; 5 – межэлектродный промежуток

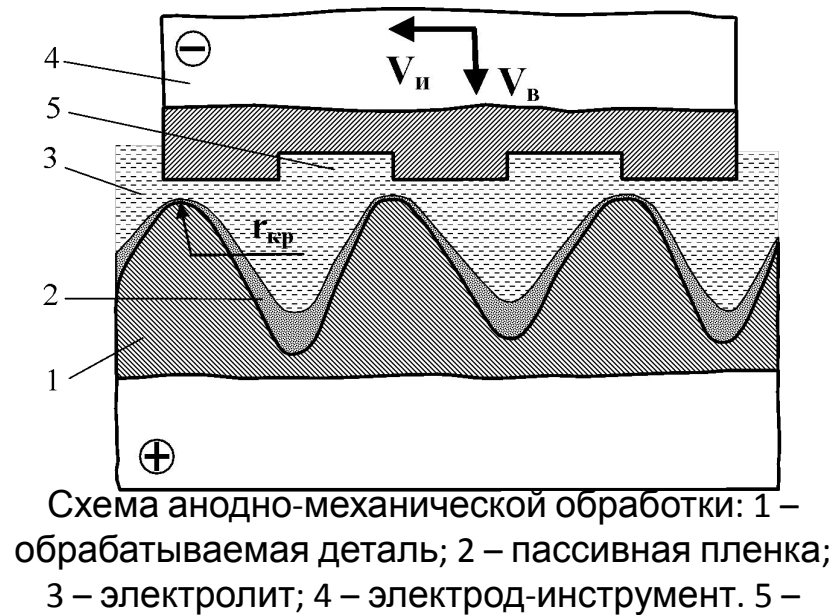


Схема анодно-механической обработки: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – пассивная пленка; 3 – электролит; 4 – электрод-инструмент. 5 – канавка

Схема электроэрозионно-химической обработки: 1 – катод – электрод-инструмент; 2 – отверстие для подачи электролита; 3 – межэлектродный промежуток; 4 – электрод – анод-заготовка; 5 – канал разряда

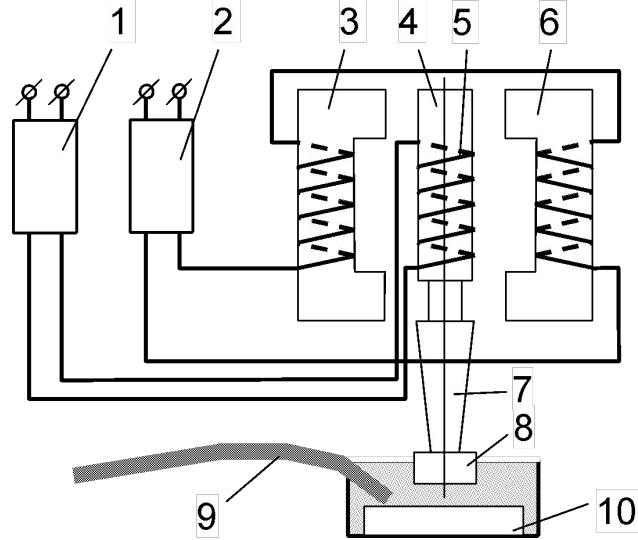


Схема магнитоэстрикционного преобразователя с подмагничиванием

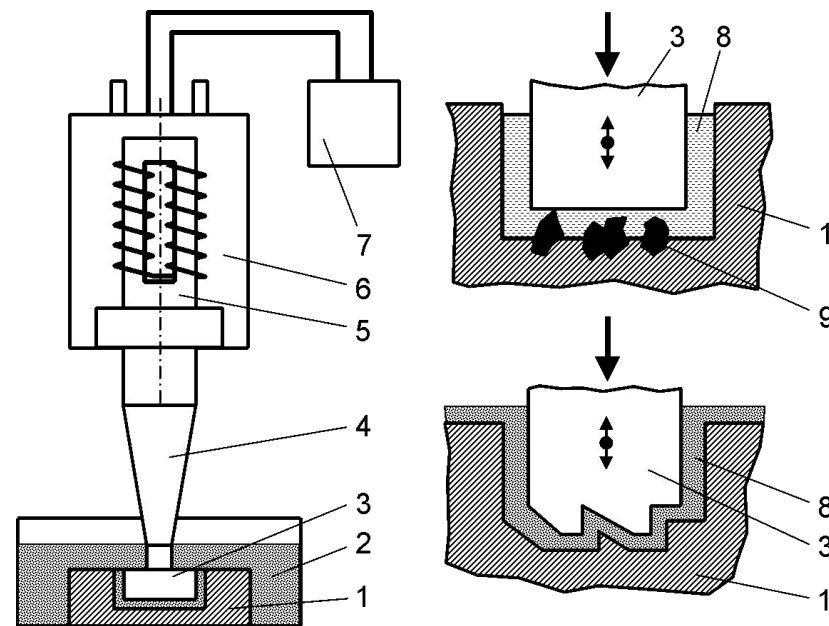
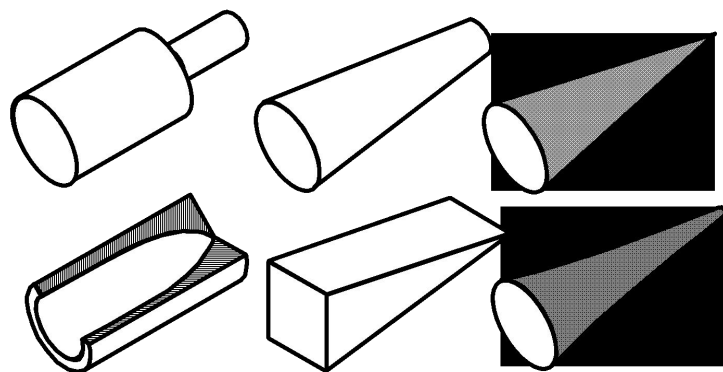
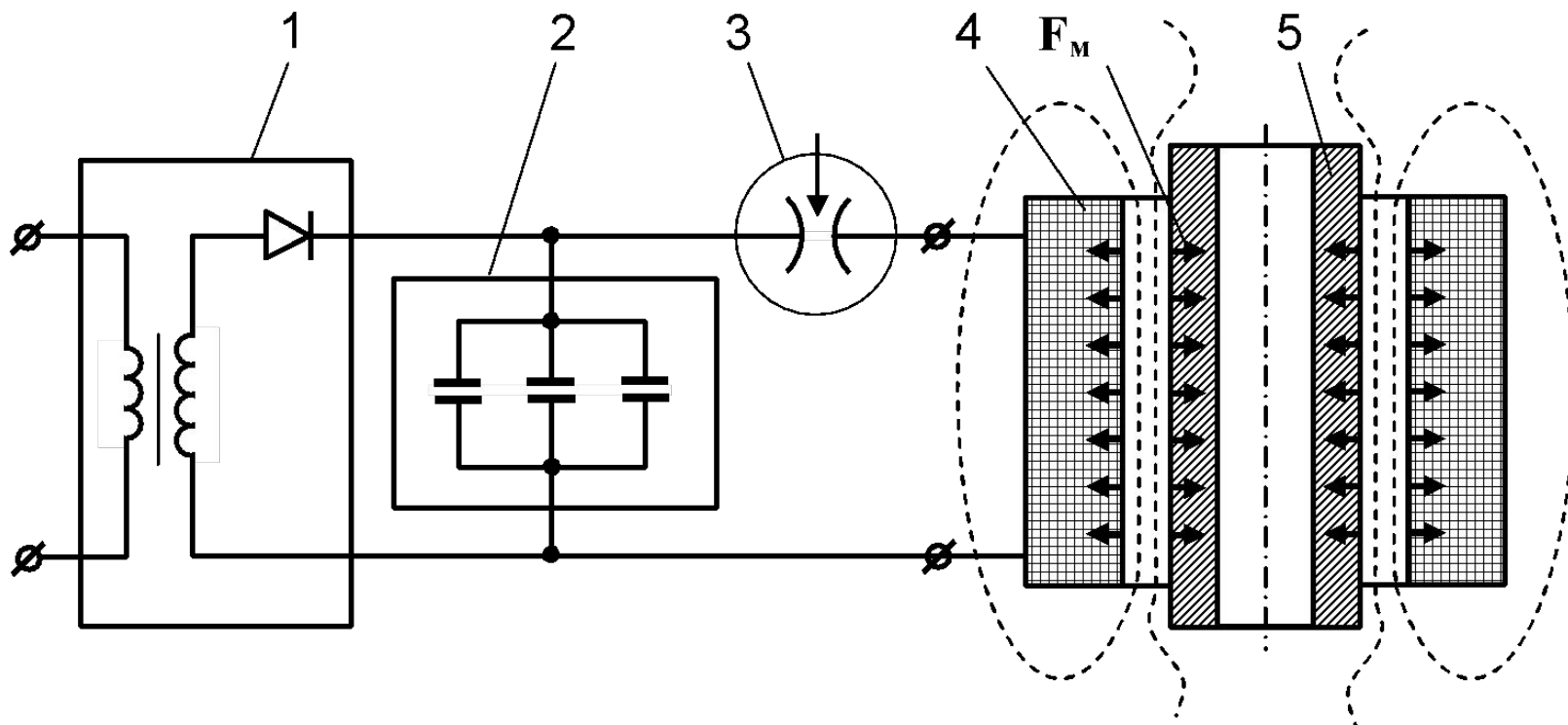


Схема ультразвуковой размерной обработки (шлифование): 1 – обрабатываемая деталь; 2 – ванна; 3 – инструмент; 4 – акустический трансформатор скорости; 5 – магнитоэстрикционный преобразователь; 6 – корпус с охлаждением; 7 – ультразвуковой генератор; 8 – зазор; 9 – частичка абразива

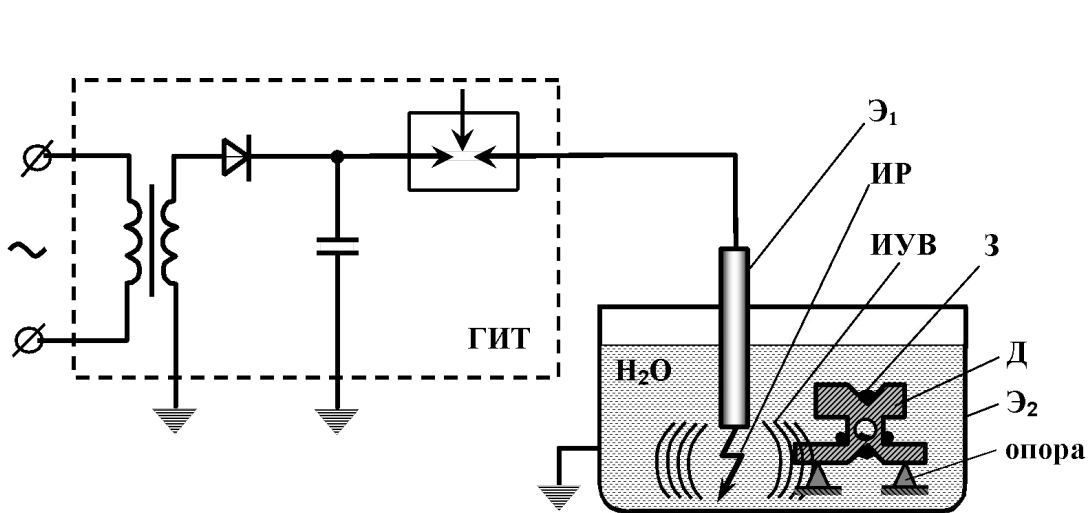


Формы акустических трансформаторов скорости

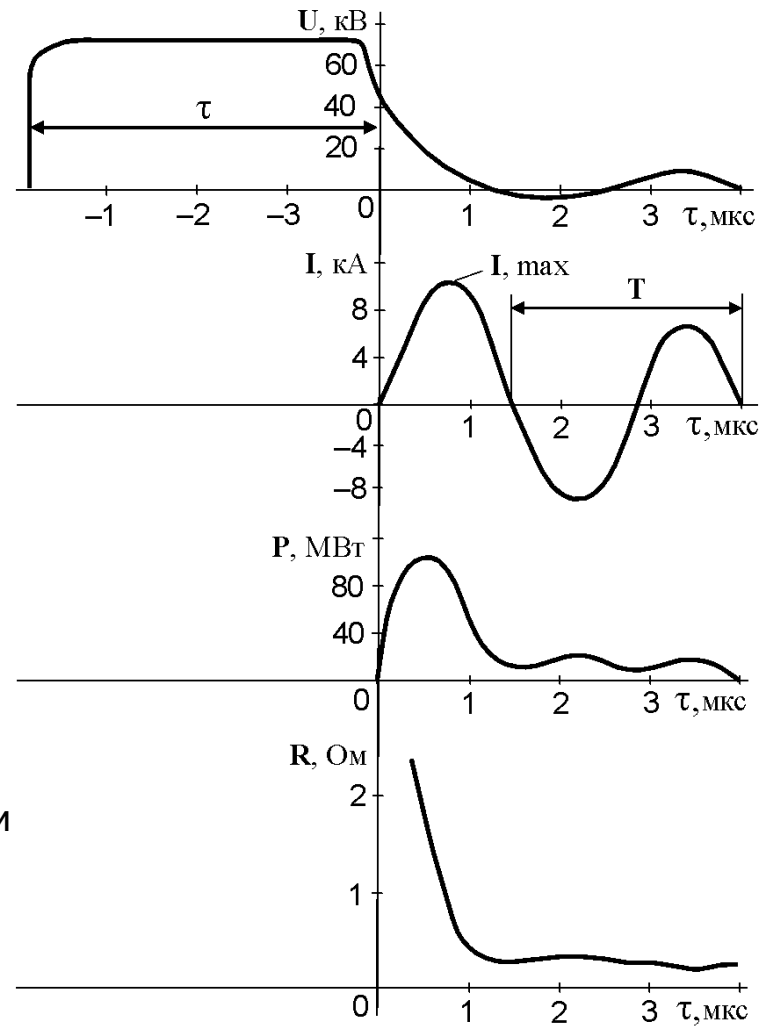


Принципиальная схема процесса магнитно-импульсной обработки металлов

Энергия, запасаемая в батарее конденсаторов  $W = 0,5 \cdot C \cdot U^2$ .



Принципиальная схема электрогидравлической обработки



Изменения тока, мощности и сопротивления канала разряда во времени



## Библиографический список

**Основная:** Ленивкин В.А., Стрижаков Е.Л. Электротехнологические процессы и оборудование: Учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2007

**Дополнительная:** 1. Бирюков Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. М.: Машиностроение, 1981. –128 с.

2. Бортничук Н.И., Крутянский М.М. Плазменно-дуговые плавильные печи. М.; Энергоиздат, 1981.

3. Донской А.В., Клубинский В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1979.

4. Волхонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. М.: Машиностроение. 1985.

5. Плазменная технология /Д.Г. Быховский, А.Я. Медведев, В.Н. Богданов и др. Л.: Лениздат, 1980. –150 с.

6. Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник, 2-е изд. М.: Машиностроение, 1982. –400 с.

7. Григорьяц А.Г., Шиганов И.Н. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. М.: Высшая школа, 1990. –159 с.

8. Федоров Б.Ф. Лазеры - основы устройства и применение. М.: Машиностроение, 1988.

9. Холопов Ю.В. Оборудование для ультразвуковой сварки. Л.: Энергоатомиздат, 1985. –168 с.

10. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. Л.: Машиностроение. 1987. –192 с.

11. Размерная электрическая обработка металлов / Под ред. А.В. Глазкова. М.: Высшая школа, 1978. –336 с.

12. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учеб. пособие в 2-х томах /Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. и др. т.1 и П. М.:Высшая школа, 1983. –336 с.

13. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. М.:Машиностроение, 1974. –768 с.

14. Электрические промышленные печи. Ч.II. Дуговые печи и установки специального нагрева / Под ред. А.Д. Свенанского. М.: Энергоиздат, 1981.

15. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. М.: Металлургия, 1981.

16. Дудин А.А. Магнито-импульсная сварка металлов. М.: Металлургия, 1979. –127 с.