

Сварочное производство

Доцент кафедры «Порошковая металлургия,
сварка и технология материалов» МТФ БНТУ

В. А. Сидоров

Теоретические основы сварки

- **Сварка** — это процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми (свариваемыми) частями при их местном нагреве (сварка плавлением), пластическом деформировании или совместном действии того и другого (сварка давлением).
- С помощью сварки между собой соединяют однородные и разнородные металлы, их сплавы, некоторые керамические материалы и пластмассы.
- Сварка является одним из наиболее широко распространенных технологических процессов в машиностроении, строительстве, ремонтном деле.

Сущность процесса сварки заключается в возникновении атомно-молекулярных связей между контактирующими поверхностями. Для этого необходимо поверхности сблизить на расстояние, соизмеримое с атомным радиусом. В реальных условиях сближению поверхностей препятствуют микронеровности, окисные и органические пленки, адсорбированные газы.

Для получения качественного соединения необходимо устранить причины, препятствующие сближению контактирующих поверхностей, и сообщить атомам твердого тела некоторую энергию для повышения энергии поверхностных атомов, которая называется энергией активации. Эта энергия может сообщаться в виде теплоты (*термическая активация*) и в виде упругопластической деформации (*механическая активации*).

В зависимости от метода активации образование связей между атомами соединяемых поверхностей происходит в твердой или жидкой фазах. В соответствии с этим все способы сварки можно разделить на две основные группы: ***сварка пластическим деформированием (давлением); сварка плавлением.***

Сварку давлением можно проводить без предварительного нагрева места соединения (холодная, взрывом, ультразвуковая, трением), когда вводится только механическая энергия или с предварительным нагревом (контактная, диффузионная, газопрессовая), когда наряду с механической вводится тепловая энергия от внешних или внутренних источников теплоты.

При *сварке плавлением* детали соединяют за счет местного расплавления металла свариваемых элементов без приложения давления. Расплавляется либо только основной металл (изделия) по кромкам, либо основной и дополнительный металл – электродный или присадочный.

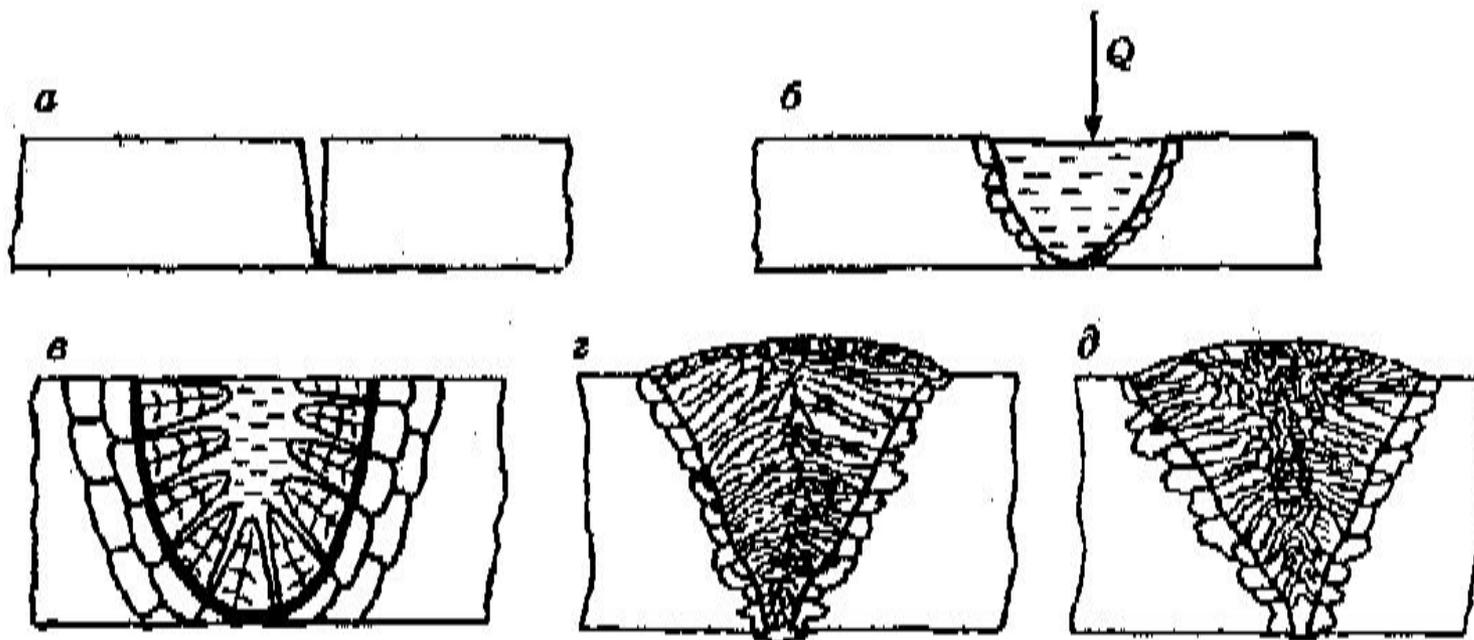


Рис. 18.1. Схема образования сварного соединения при сварке плавлением:

a — соединяемые детали; *б* — сварочная ванна; *в* — кристаллизация;
г, д — структура шва

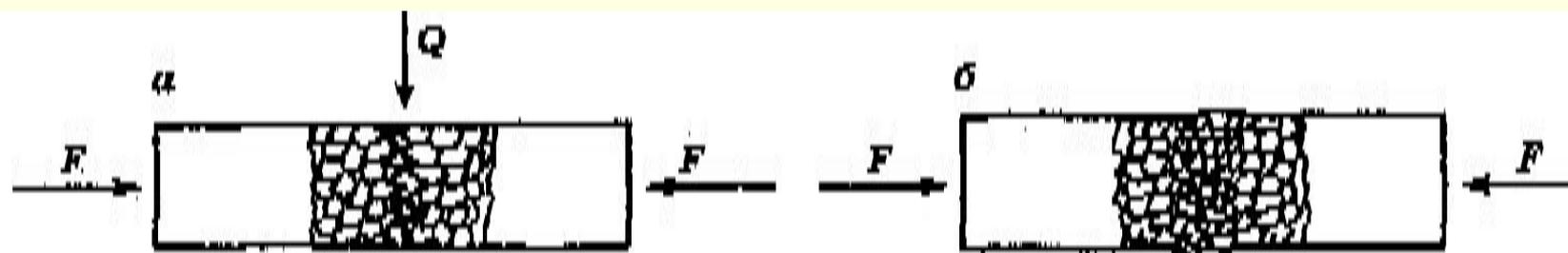


Рис. 18.2. Схема образования сварного соединения при сварке давлением:

- а — Деформация микрошероховатостей в зоне контакта;*
- б — рекристаллизация и образование прочного соединения*

Свариваемость – технологическое свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия.

Свариваемость материалов оценивают степенью соответствия заданных свойств сварного соединения одноименным свойствам основного металла. По этим признакам материалы разделяют:

- на хорошо,
- удовлетворительно
- ограниченно
- плохо сваривающиеся.

Многие разнородные материалы, особенно металлы с неметаллами, не вступают во взаимодействие друг с другом. Такие материалы относятся к числу практически несвариваемых.

При сварке однородных металлов и сплавов в месте соединения, как правило, образуется структура, идентичная или близкая структуре соединяемых заготовок. Этому случаю соответствует хорошая свариваемость материалов.

Если образуются хрупкие и твердые структурные составляющие в сварном соединении, то в условиях действия сварочных напряжений возможно возникновение трещин в шве или околошовной зоне. В последнем случае материалы относятся к категории плохо сваривающихся.

Критерии свариваемости

- окисляемость металла при сварке;
- сопротивляемость образованию горячих трещин;
- сопротивляемость образованию холодных трещин;
- чувствительность металла к тепловому воздействию сварки, характеризуемая его склонностью к росту зерна, структурными и фазовыми изменениями в шве и зоне термического влияния;
- чувствительность к образованию пор.

Классификация сталей по свариваемости

Группа свариваемости	Сталь	
	углеродистая	конструкционная легированная
Хорошая	Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, 08; сталь 10, 15, 20, 25, 12кп, 15кп, 16кп, 18кп, 20кп	15Г, 20Г, 15Х, 15ХЛ, 20Х, 15ХМ, 14ХГС, 10ХСНД, 10ХГСНД
Удовлетворительная	Ст5; сталь 30, 35	12ХН2, 12ХН3А, 14Х2МР, 10Г2МР; 20ХН3А, 20ХН, 20ХГСА, 25ХГСА, 30Х, 20ХМ
Ограниченная	Ст6; сталь 40, 45, 50	35Г, 40Г, 45Г, 40Г2, 35Х, 40Х, 45Х, 40ХП, 40ХМФА, 30ХГС, 30ХГСА, 30ХГСМ, 35ХМ, 20Х2Н4А, 4ХС, 12Х2Н4МА
Плохая	Сталь 65, 70, 75, 80, 85, У7, У8, У9, У10, У11, У12	50Г, 50Г2, 50Х, 50ХН, 45ХН3МФА, 6ХС, 7Х3, 9ХС, 8Х3, 5ХТН, 5ХНВ

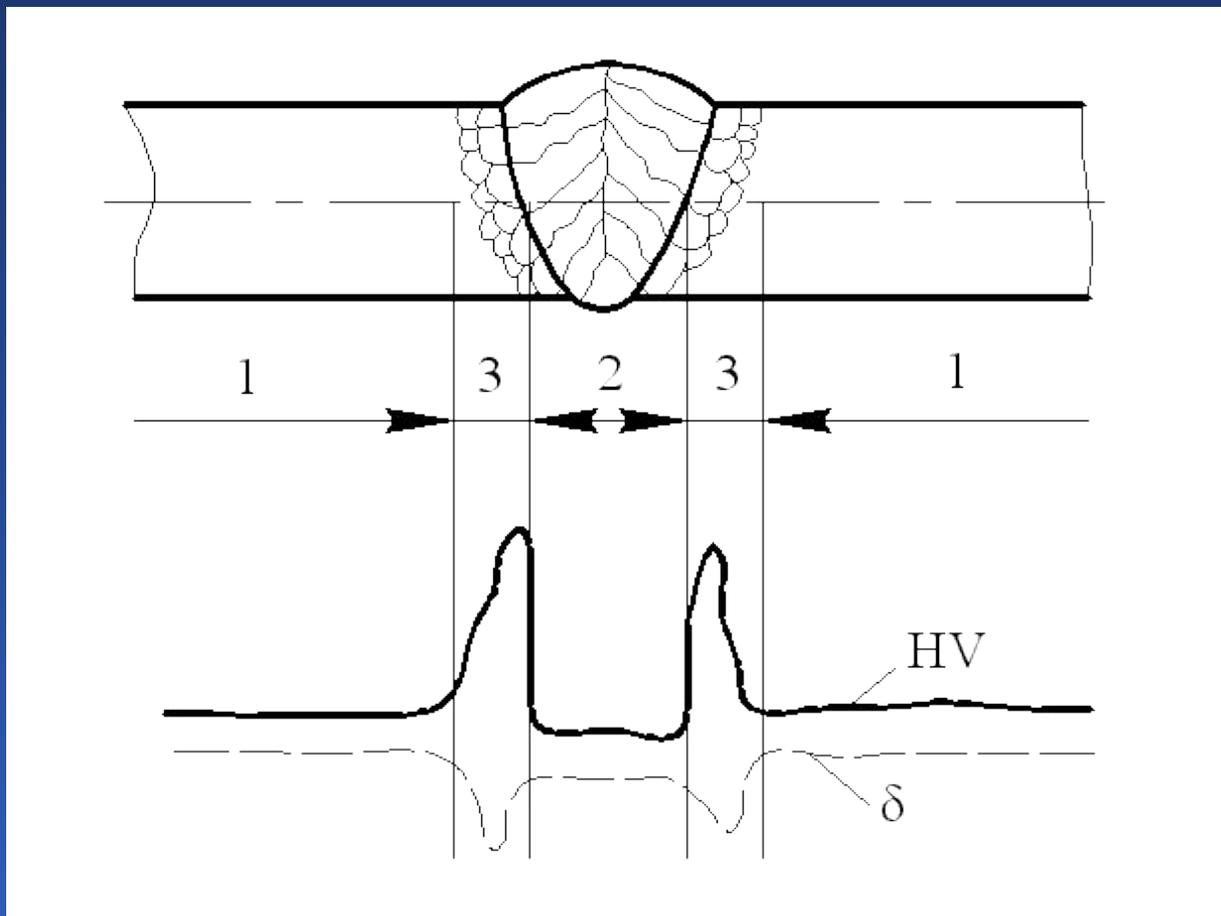
Группы технологической свариваемости сталей

- **I. Хорошая** - Сварные соединения высокого качества получают без применения особых приемов
- **II. Удовлетворительная-** Для получения высококачественных сварных соединений необходимы строгое соблюдение режимов сварки, специальные присадочные материалы, нормальные температурные условия, в некоторых случаях — подогрев, проковка швов, термообработка

Группы технологической свариваемости сталей (продолжение)

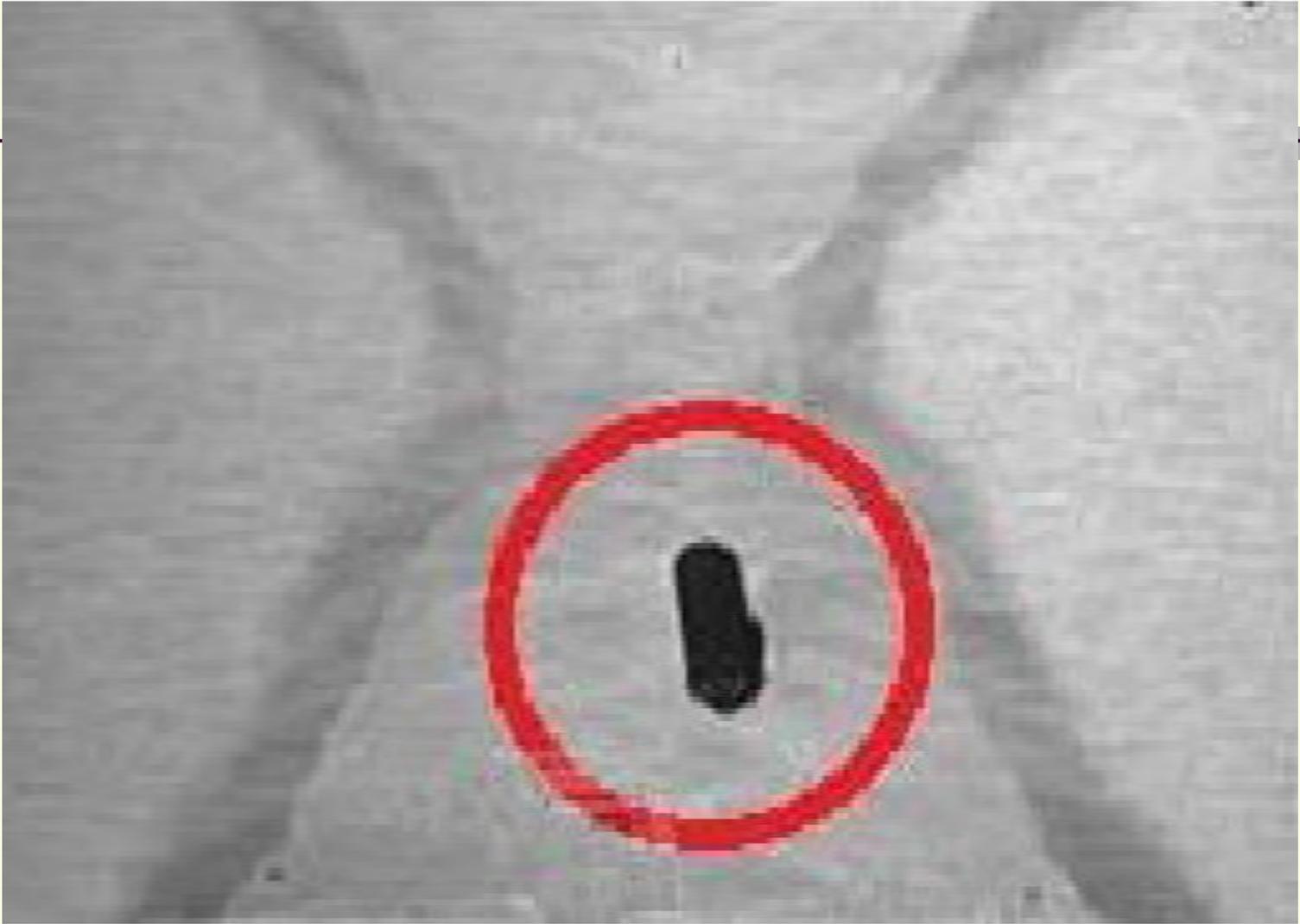
- **III. Ограниченная** - Для получения высококачественного сварного соединения необходимы дополнительные операции: подогрев, предварительная или последующая термообработка, проковка швов и др.
- **IV. Плохая** - Швы склонны к образованию трещин и при сварке необходим подогрев. Последующая термообработка обязательна. Качество сварных соединений пониженное. Стали этой, группы обычно не применяют для изготовления сварных конструкций

Неоднородность механических свойств различных зон сварного соединения легированной стали



1 – основной металл; 2 – шов; 3 – зона термического влияния





Сварка плавлением

- При сварке плавлением детали соединяют за счет местного расплавления металла свариваемых элементов без приложения давления. Расплавляется либо только основной металл (изделия) по кромкам, либо основной и дополнительный металл – электродный или присадочный.
- Источником теплоты при дуговой сварке плавлением является *сварочная электрическая дуга*.
- *Сварочная дуга* представляет собой мощный длительный электрический разряд между проводниками в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Она образуется между электродом и основным металлом (изделием) или между двумя электродами, имеющими разность потенциалов.

Типы сварных соединений.

Сварные соединения подразделяются на несколько типов, определяемых взаимным расположением свариваемых деталей.

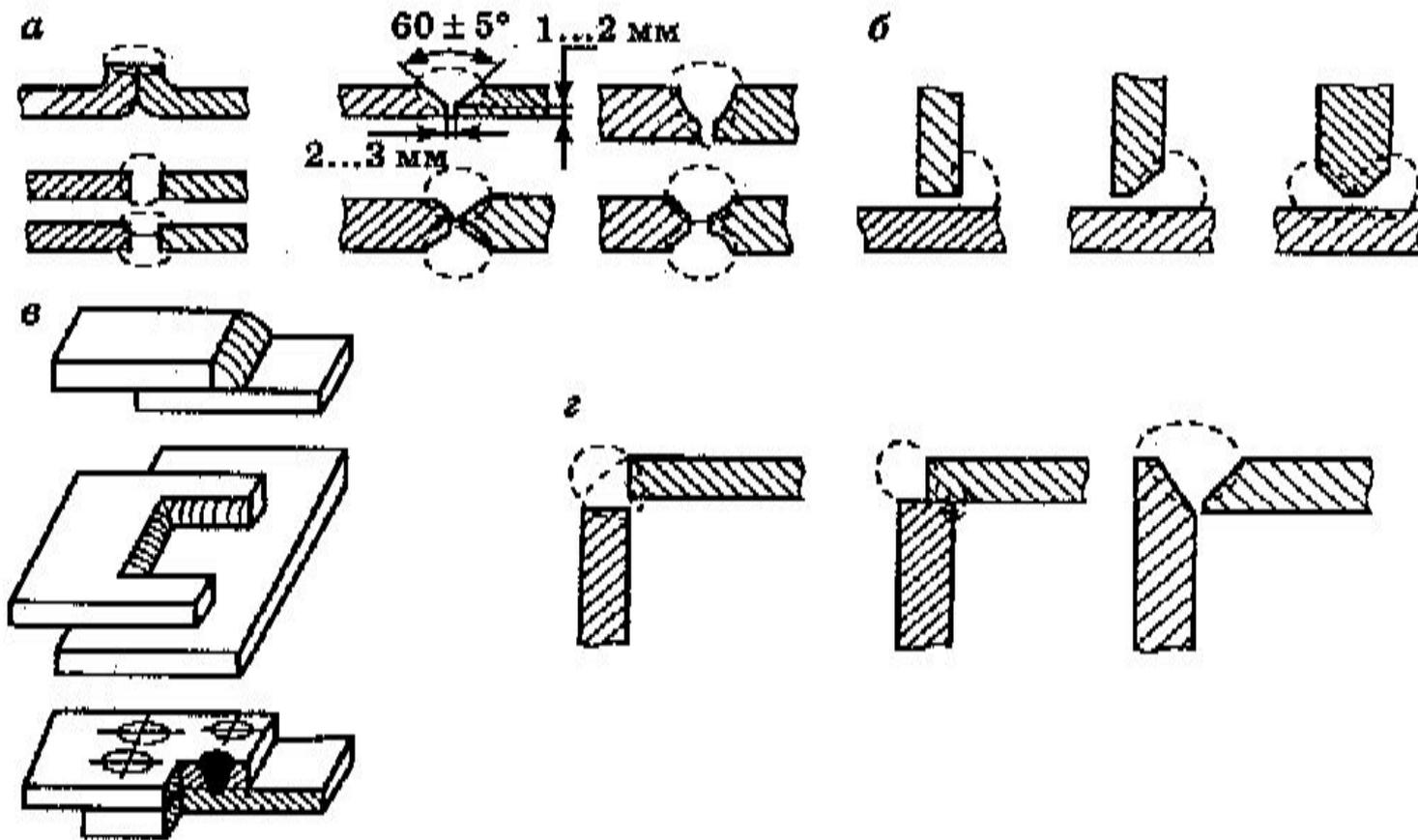


Рис. 19.1. Типы сварных соединений:
а — стыковое; б — тавровое; в — нахлесточное; г — угловое

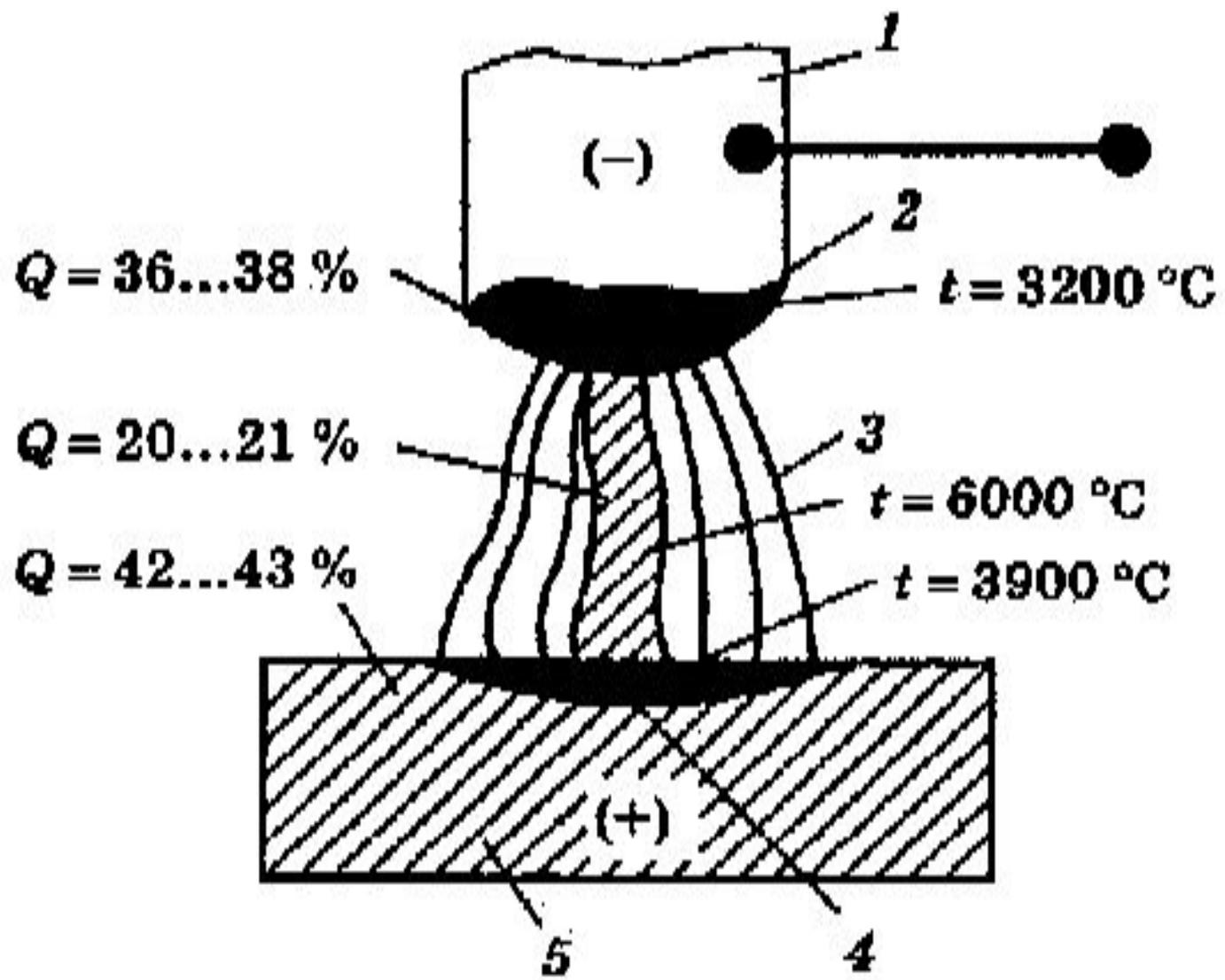


Рис. 19.3. Схема сварочной дуги

Этапы возбуждения дуги

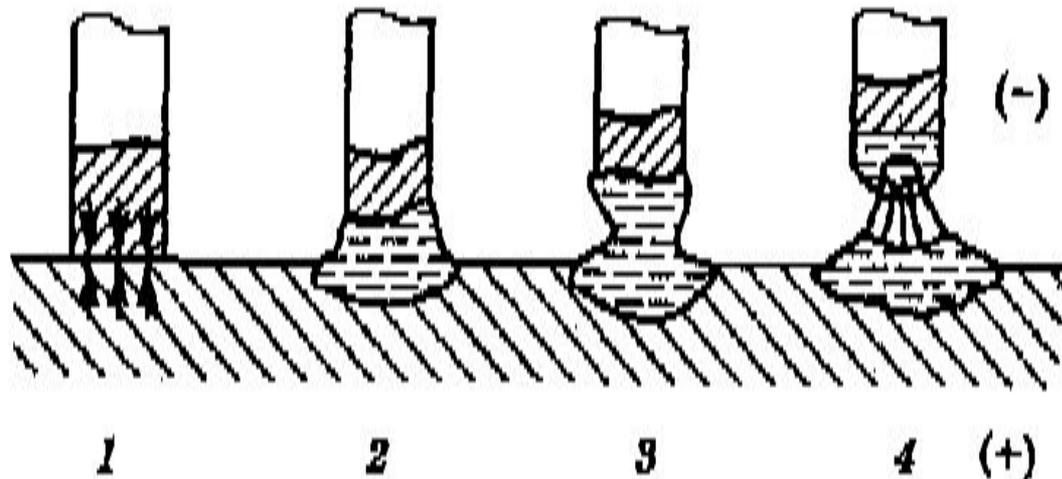
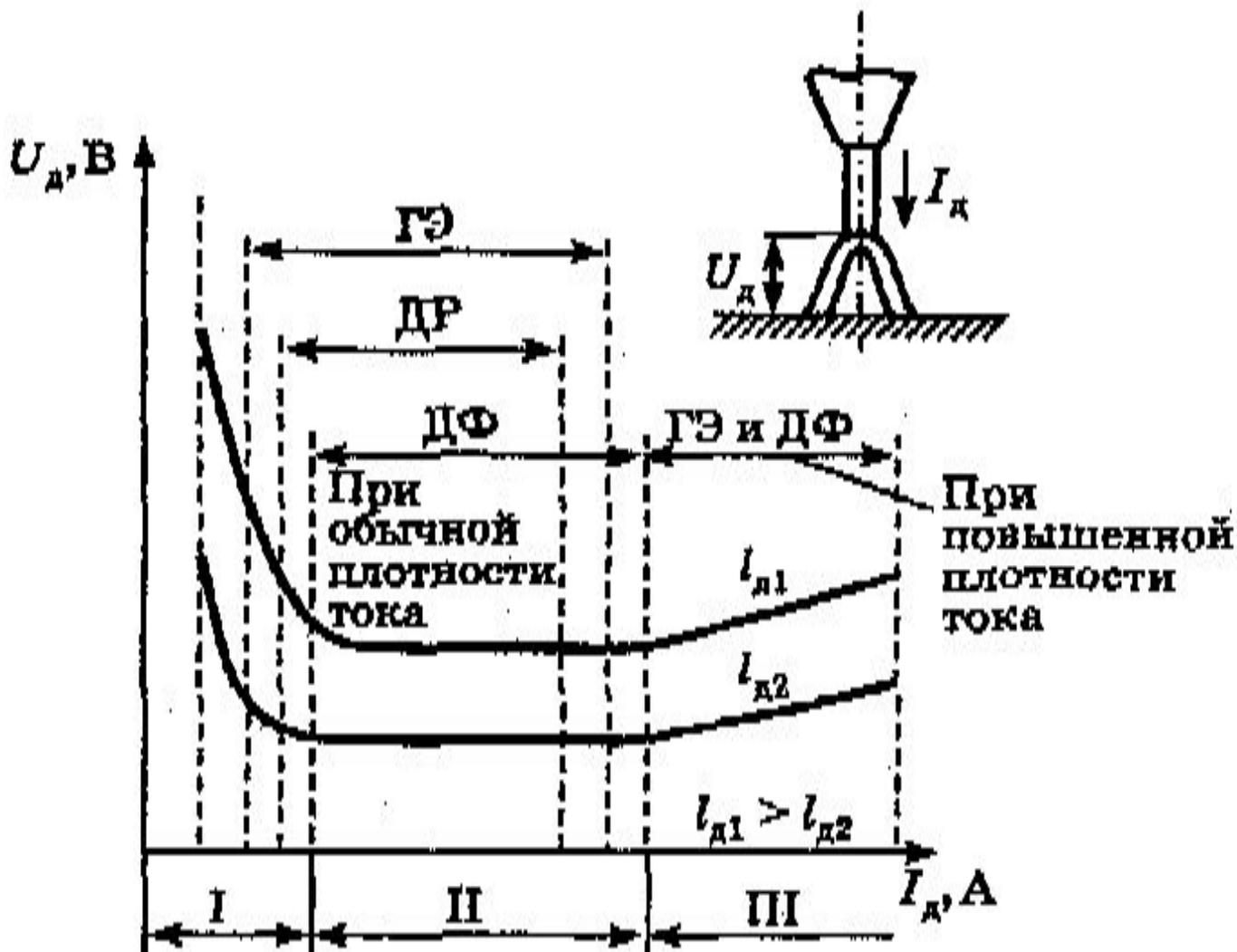


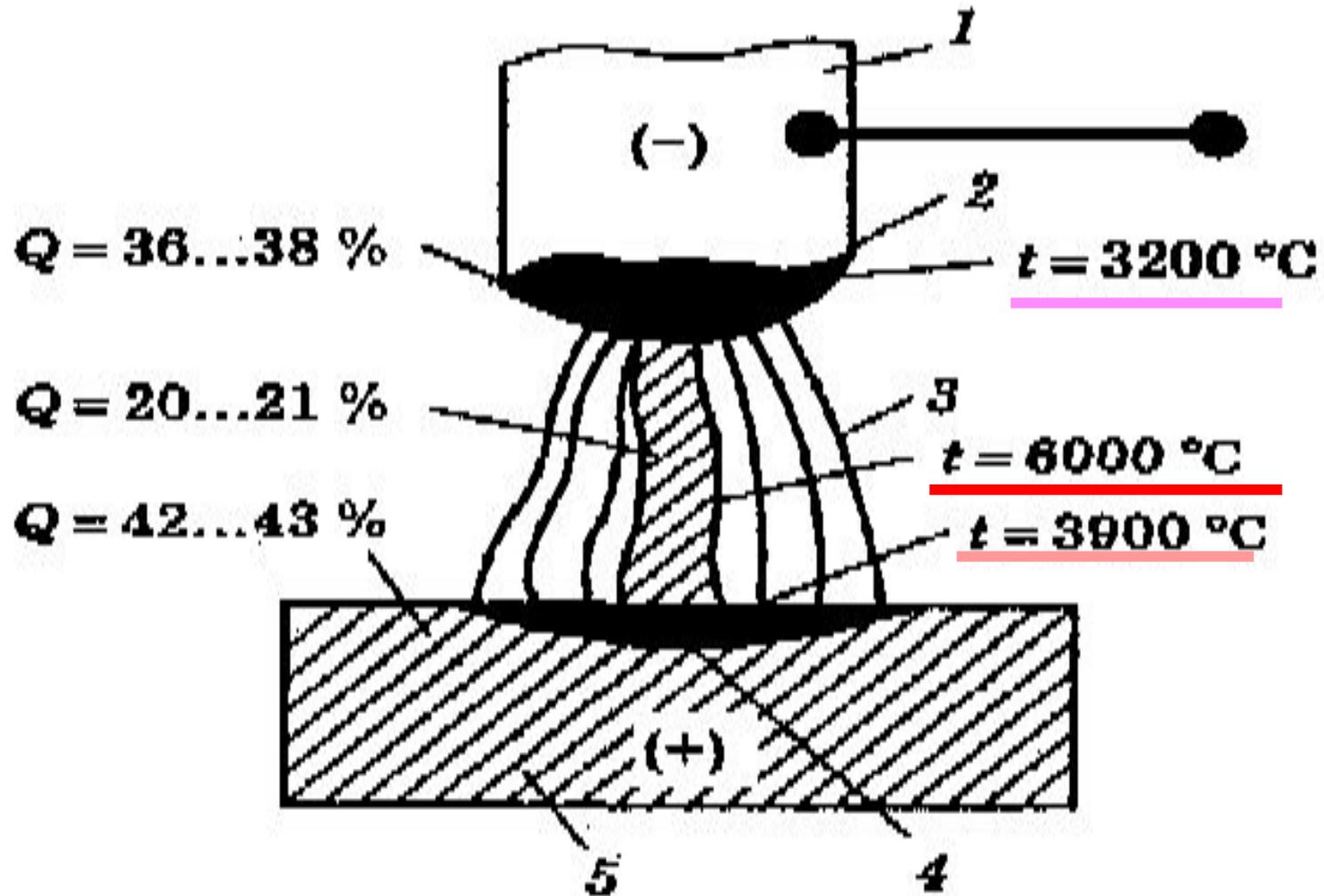
Рис. 19.4. Схема возбуждения дуги:

1 — короткое замыкание электрода на изделие; *2* — разогрев торца электрода и изделия в месте контакта и образование жидкой прослойки металла; *3* — отвод электрода на расстояние 3...5 мм с образованием шейки жидкого металла; *4* — разрыв шейки и возникновение дуги

Электрические свойства дуги описываются *статической вольт-амперной характеристикой*, которая представляет собой зависимость между напряжением дуги и сварочным током в состоянии устойчивого горения дуги



Тепловые свойства дуги



Источники тока для питания сварочной дуги характеризуются *внешней вольт-амперной характеристикой*.

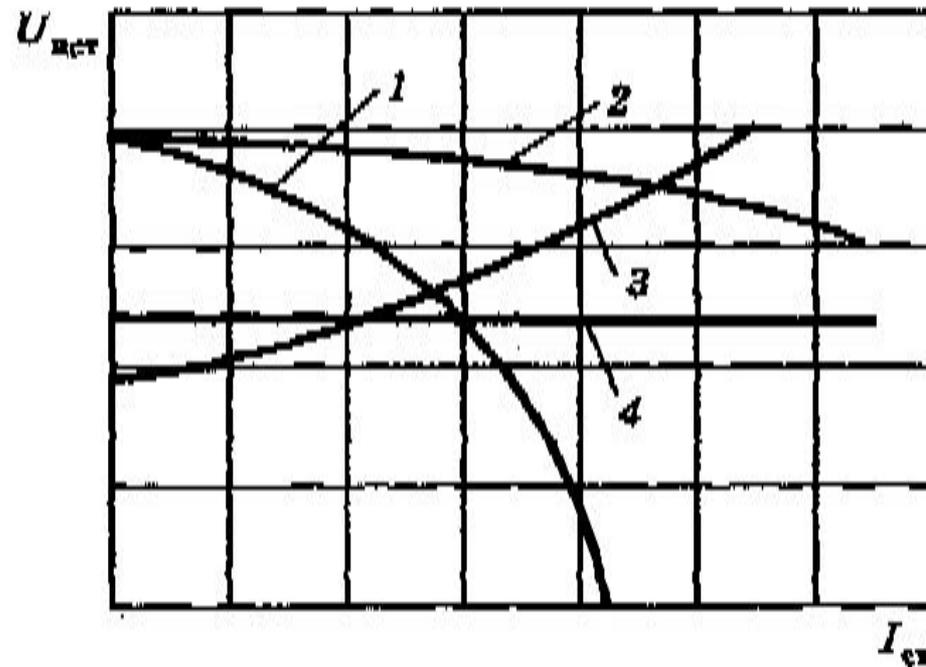


Рис. 19.6. Внешние вольт-амперные характеристики источников питания дуги:

1 — падающая; **2** — пологопадающая; **3** — возрастающая; **4** — жесткая

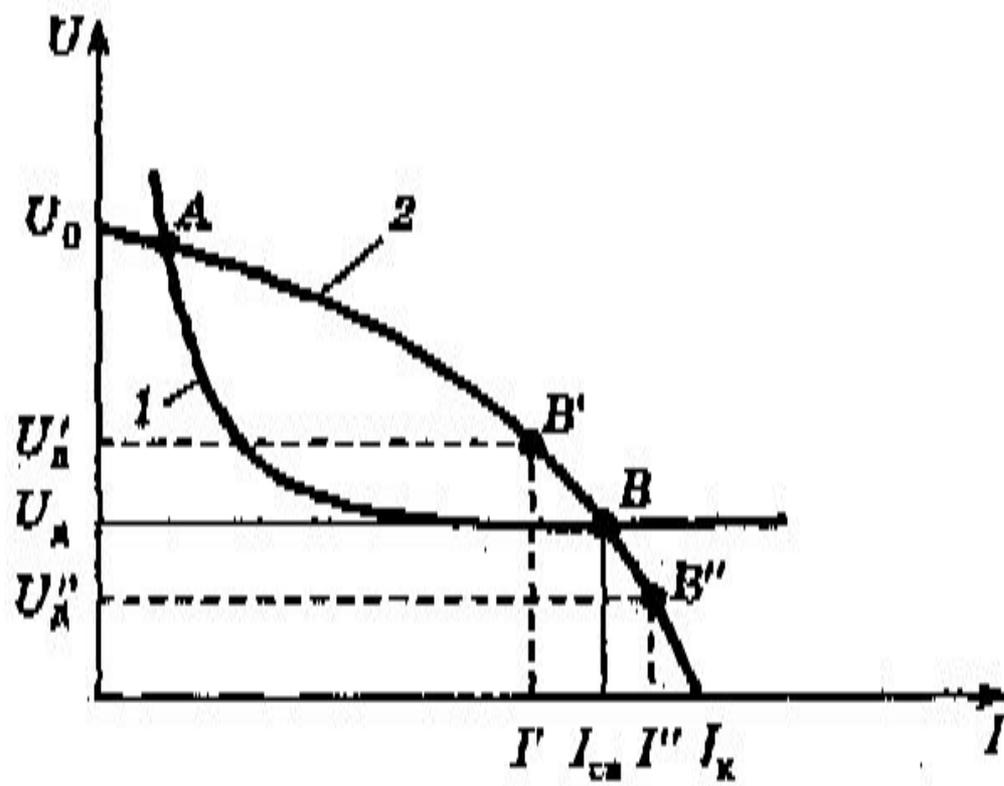


Рис. 19.7. Взаимосвязь характеристик дуги и источника тока

Источники питания электрической дуги характеризуются рядом параметров при работе на установившихся режимах: холостом ходу, рабочей нагрузке и коротком замыкании.

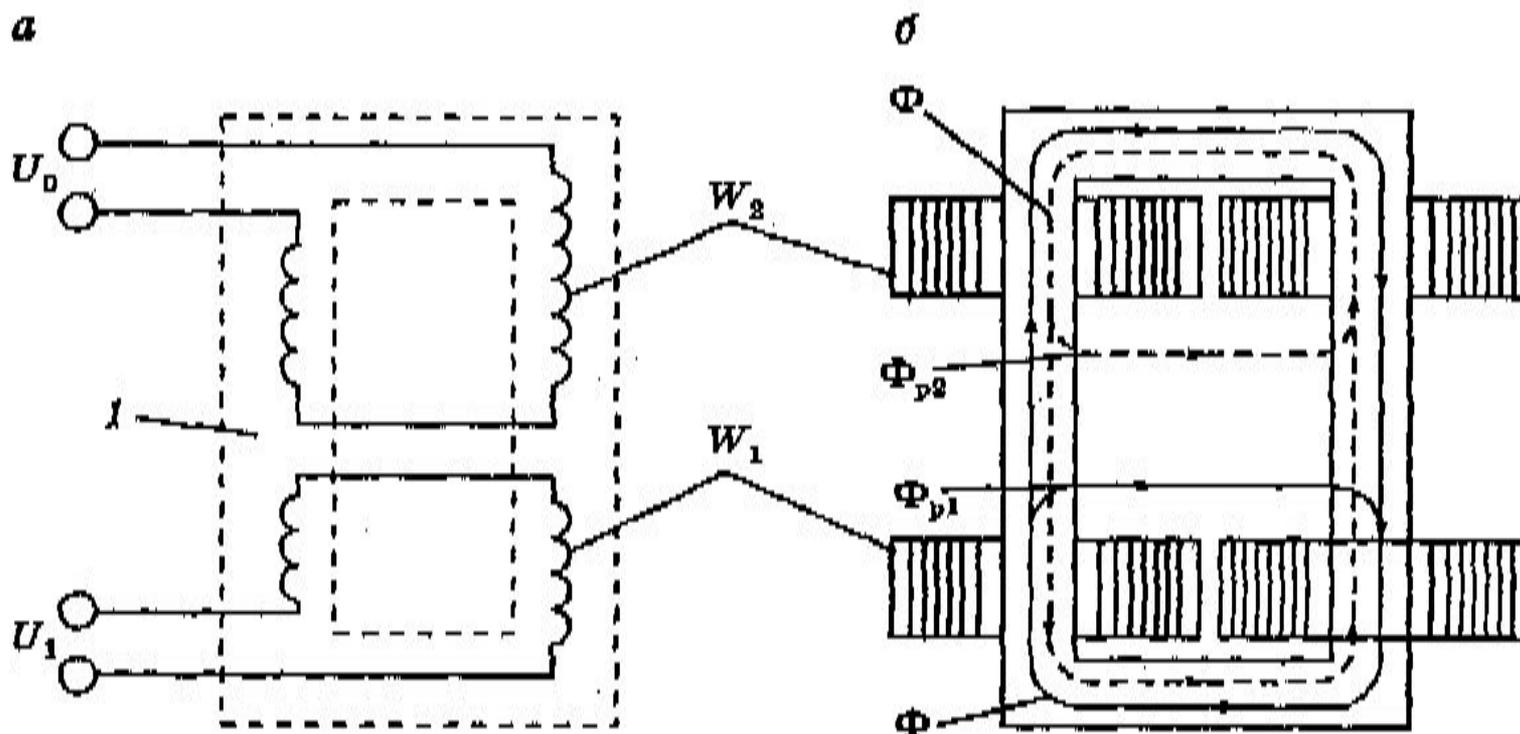
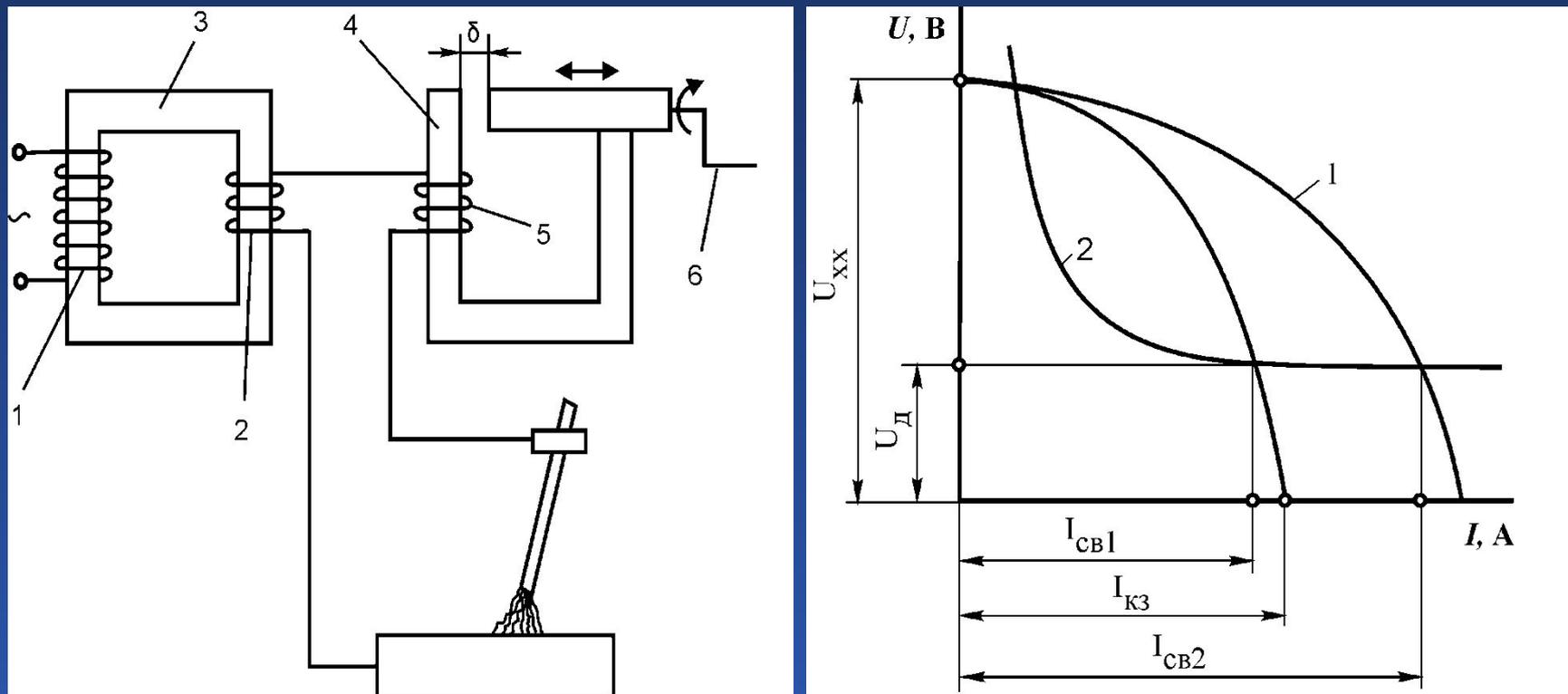


Рис. 19.8. Трансформатор с увеличенным магнитным рассеянием:
а — электромагнитная схема; **б** — распределение магнитных потоков

Трансформатор с отдельной дроссельной катушкой



а

б

а – схема сварочного трансформатора с отдельной дроссельной катушкой;
б – внешние характеристики трансформатора (1) и сварочной дуги (2)

Сварочные выпрямители применяются для ручной дуговой сварки покрытыми электродами, механизированной дуговой сварки под флюсом и в защитных газах.

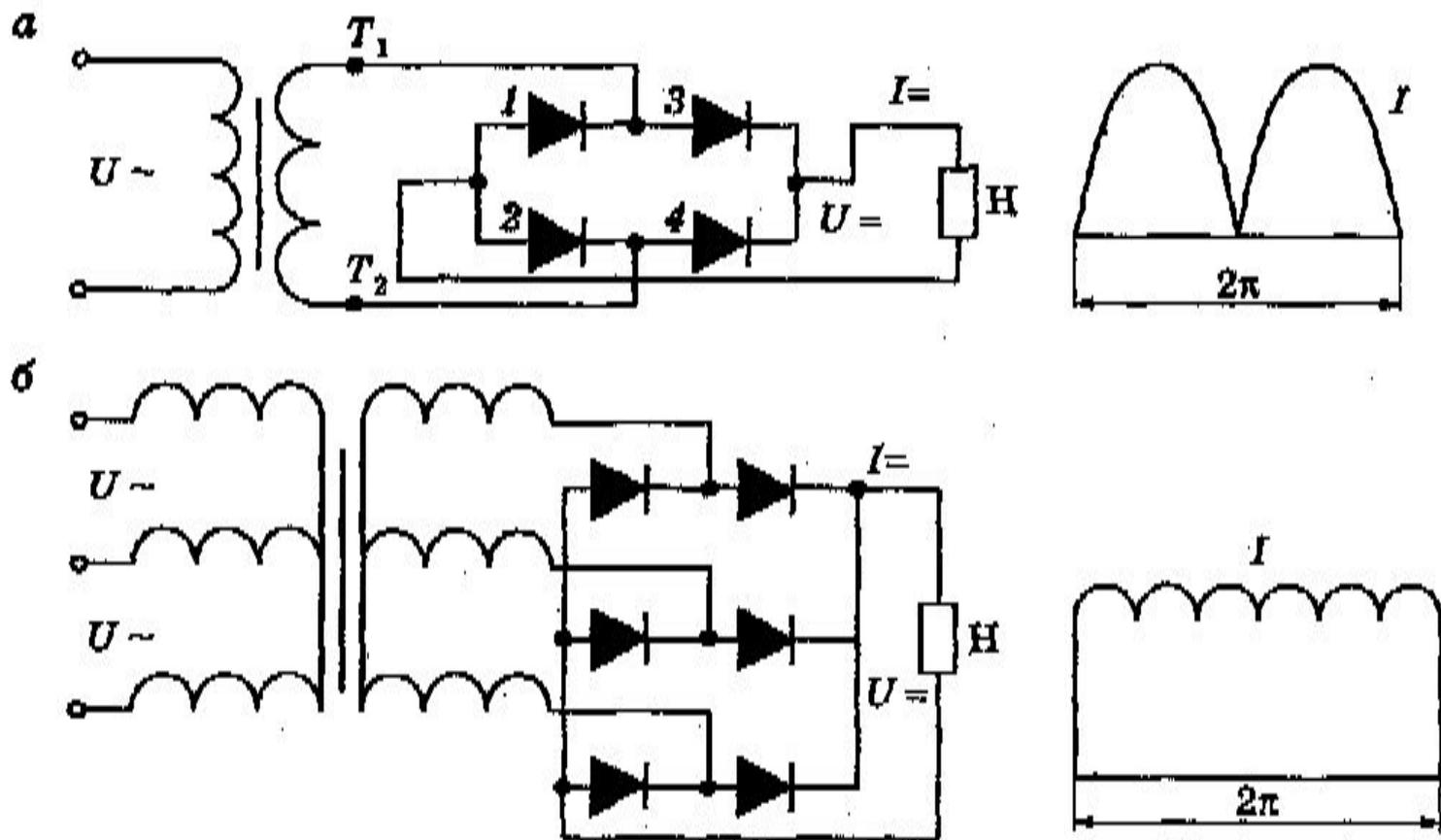


Рис. 19.10. Схема выпрямительных установок:
а — однофазная мостовая схема; б — трехфазная мостовая схема

Сварочные генераторы применяются для ручной дуговой сварки покрытым электродом, сварки под флюсом и сварки в защитных газах.

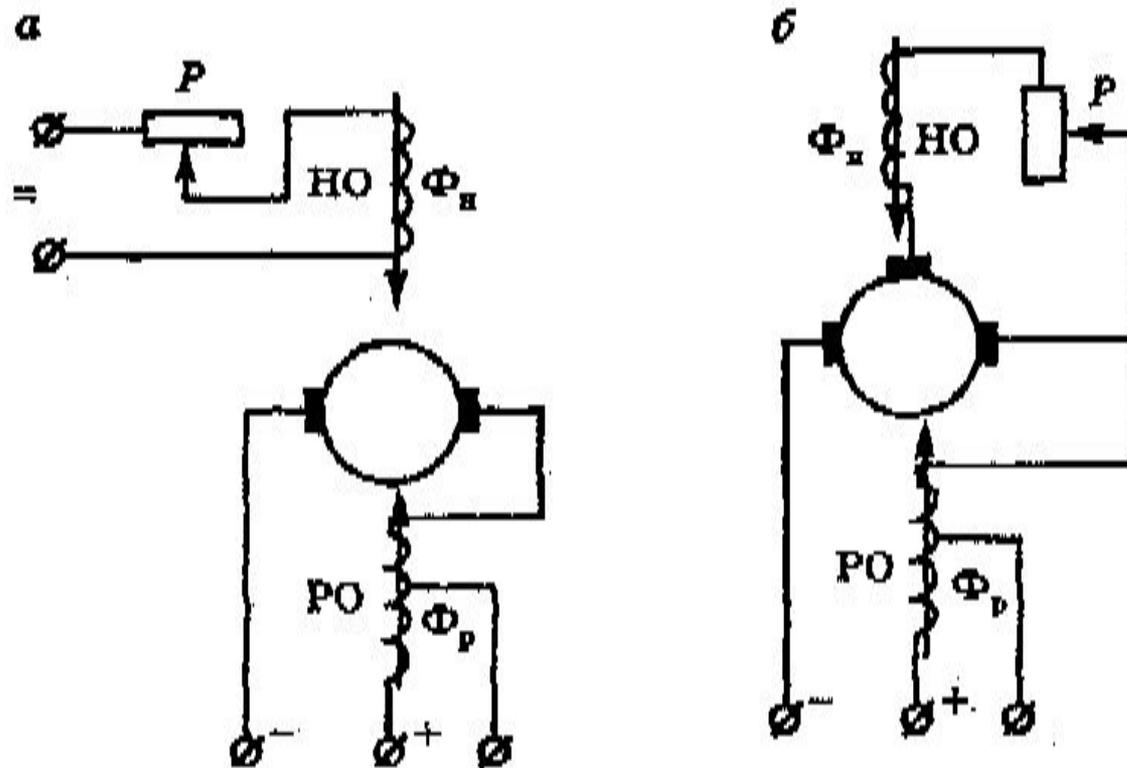


Рис. 19.11. Принципиальные электрические схемы сварочных генераторов:

a — с независимым возбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой; **б** — с параллельной намагничивающей и последовательной раз-

магничивающей обмотками

Источники питания дуги постоянным током (выпрямители и генераторы) обладают следующими преимуществами перед источниками переменного тока:

- более устойчивое горение дуги из-за отсутствия затуханий, связанных с изменением полярности переменного тока;
- высокое качество сварки благодаря высокой стабильности дуги постоянного тока;
- возможность применения всех выпускаемых промышленностью марок электродов, в то время как для сварки переменным током электроды некоторых марок непригодны;
- меньшая чувствительность к колебаниям напряжения в сети;
- сварочные агрегаты удобны для использования в местах, где отсутствует электроэнергия.

Инверторные источники питания сварочной дуги. В общем случае он представляет собой устройство, служащее для превращения постоянного тока в переменный.

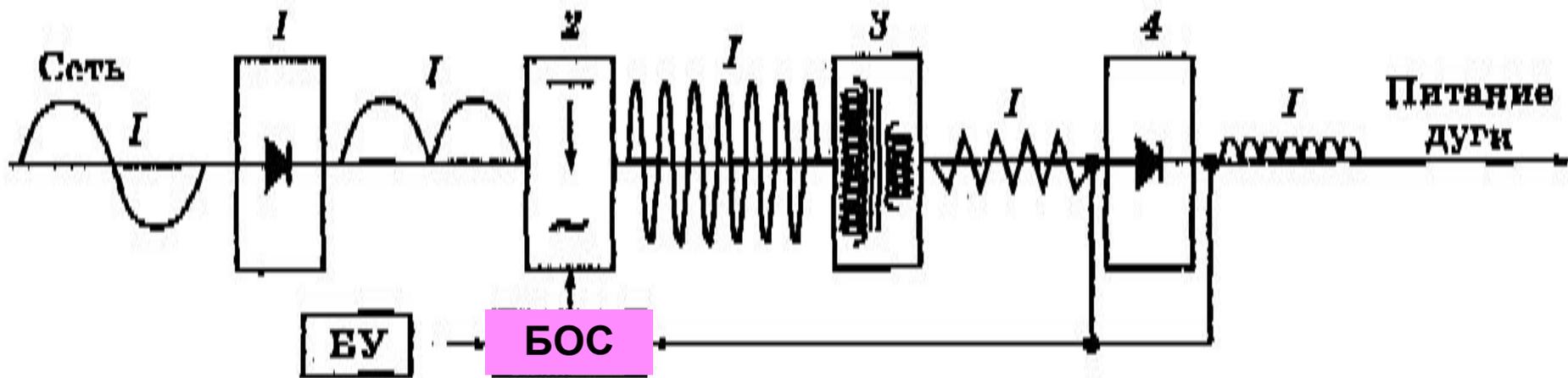


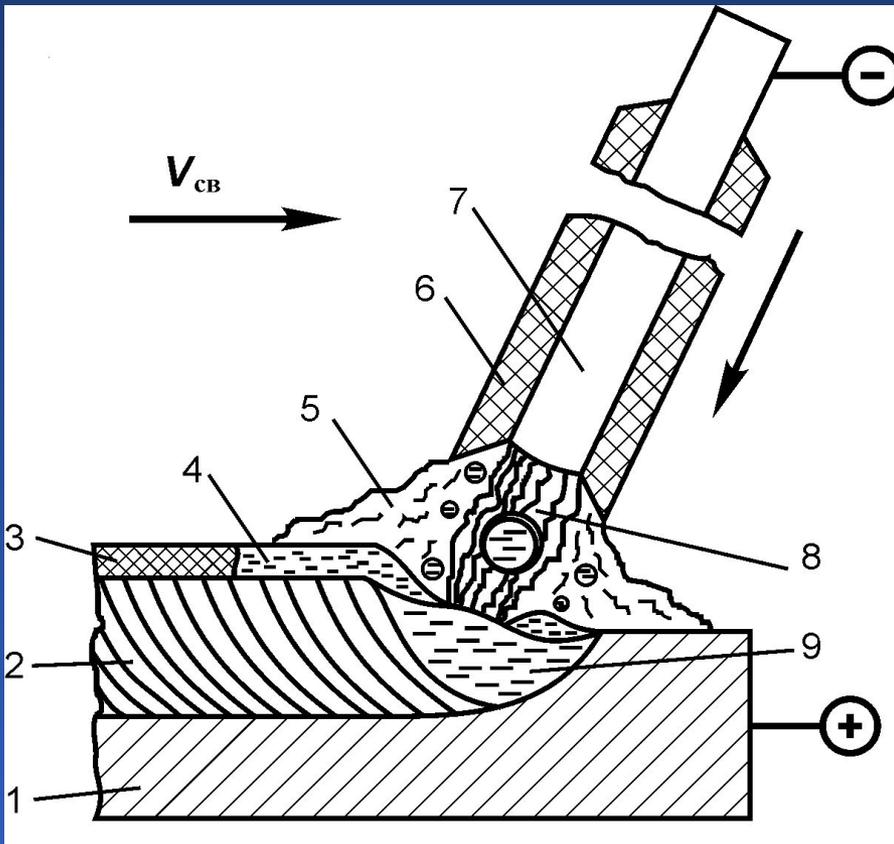
Рис. 19.12. Структурная схема инверторного источника питания постоянного тока:

БУ — блок управления; БОС — блок обратной связи; I — графики изменения тока во времени

Инверторные источники питания обеспечивают:

- легкое возбуждение дуги за счет временного повышения силы сварочного тока в момент ее зажигания (в некоторых источниках активизирована также функция, предупреждающая залипание электрода путем мгновенного резкого снижения тока короткого замыкания);
 - устойчивость горения и стабильность параметров дуги, в том числе при колебании напряжения питающей сети;
 - плавное регулирование силы сварочного тока с возможностью дистанционного управления.
- Все это способствует значительному улучшению хода сварочного процесса, повышению качества сварных швов и снижению расхода электроэнергии.

Схема дуговой электросварки металлическим покрытым электродом



- 1 – свариваемый металл;
- 2 – сварной шов (наплавленный металл);
- 3 – твердая шлаковая корка;
- 4 – жидкая шлаковая ванна;
- 5 – газовая защитная атмосфера;
- 6 – покрытие электрода;
- 7 – металлический стержень из сварочной проволоки;
- 8 – электрическая дуга;
- 9 – металлическая ванна

Сварка под флюсом.

Сущность процесса дуговой сварки под флюсом заключается в применении непокрытой электродной проволоки и флюса для защиты дуги и сварочной ванны от воздуха

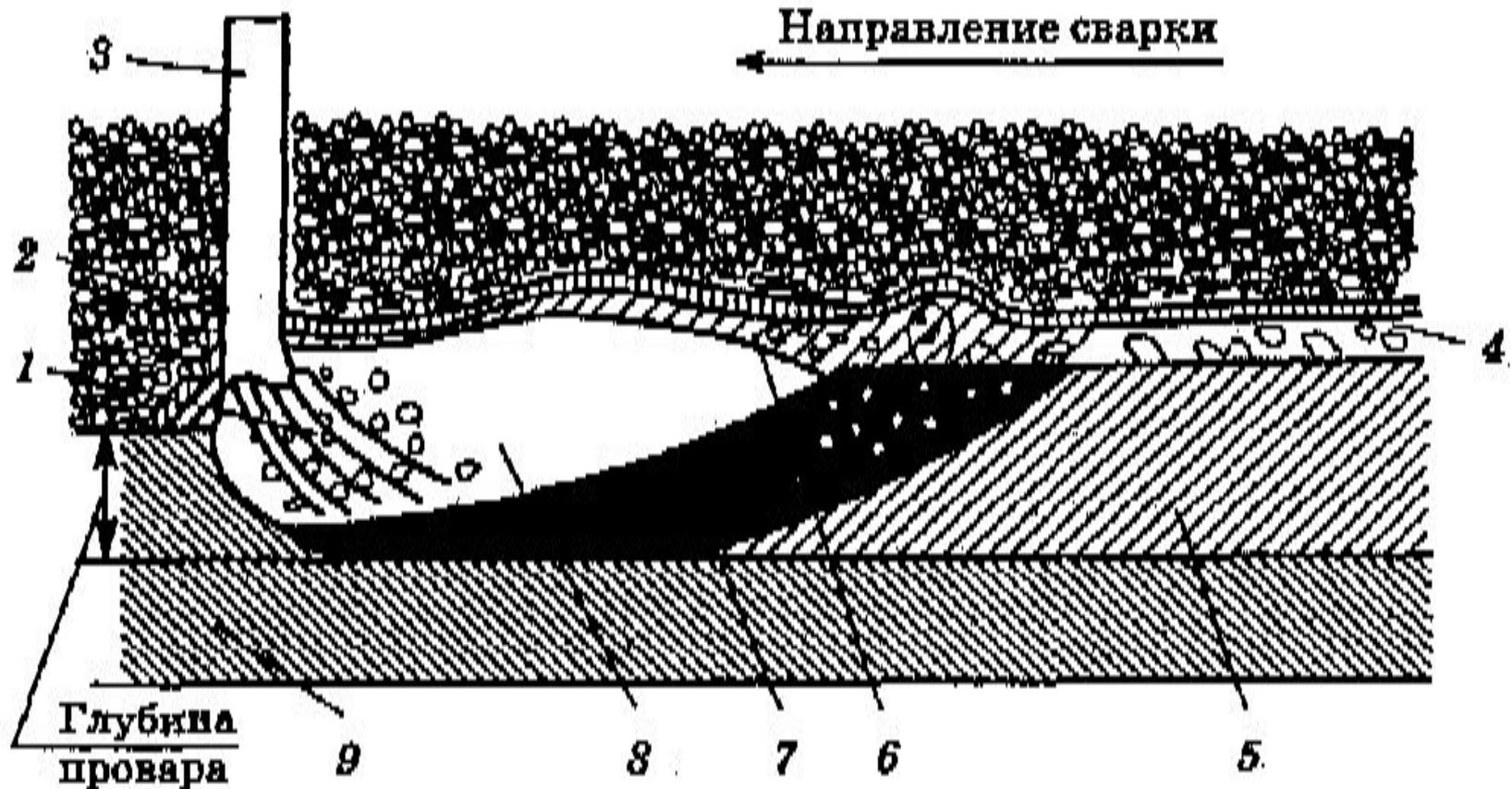
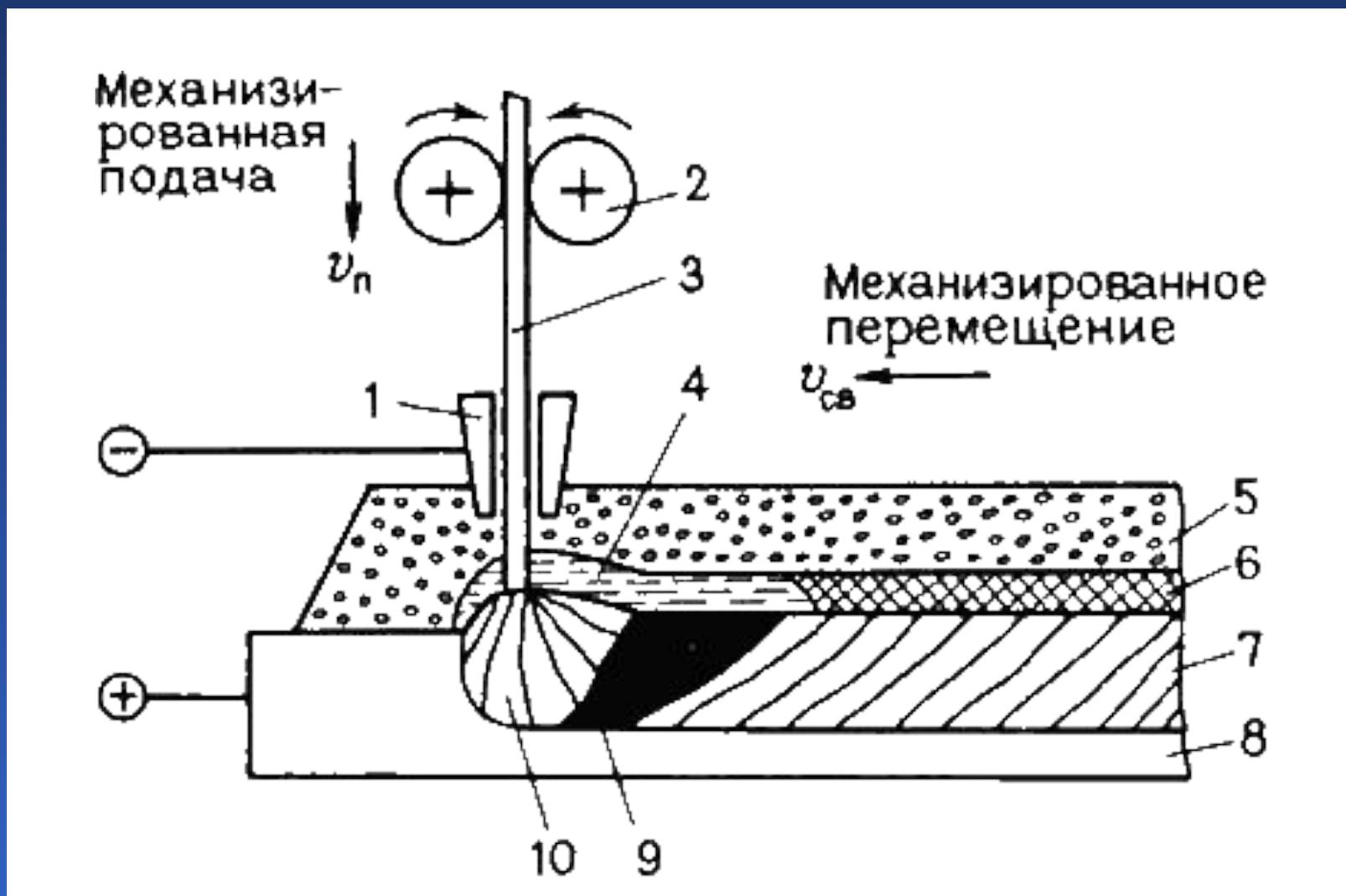


Рис. 19.17. Схема процесса сварки под флюсом

Схема автоматической дуговой сварки под флюсом



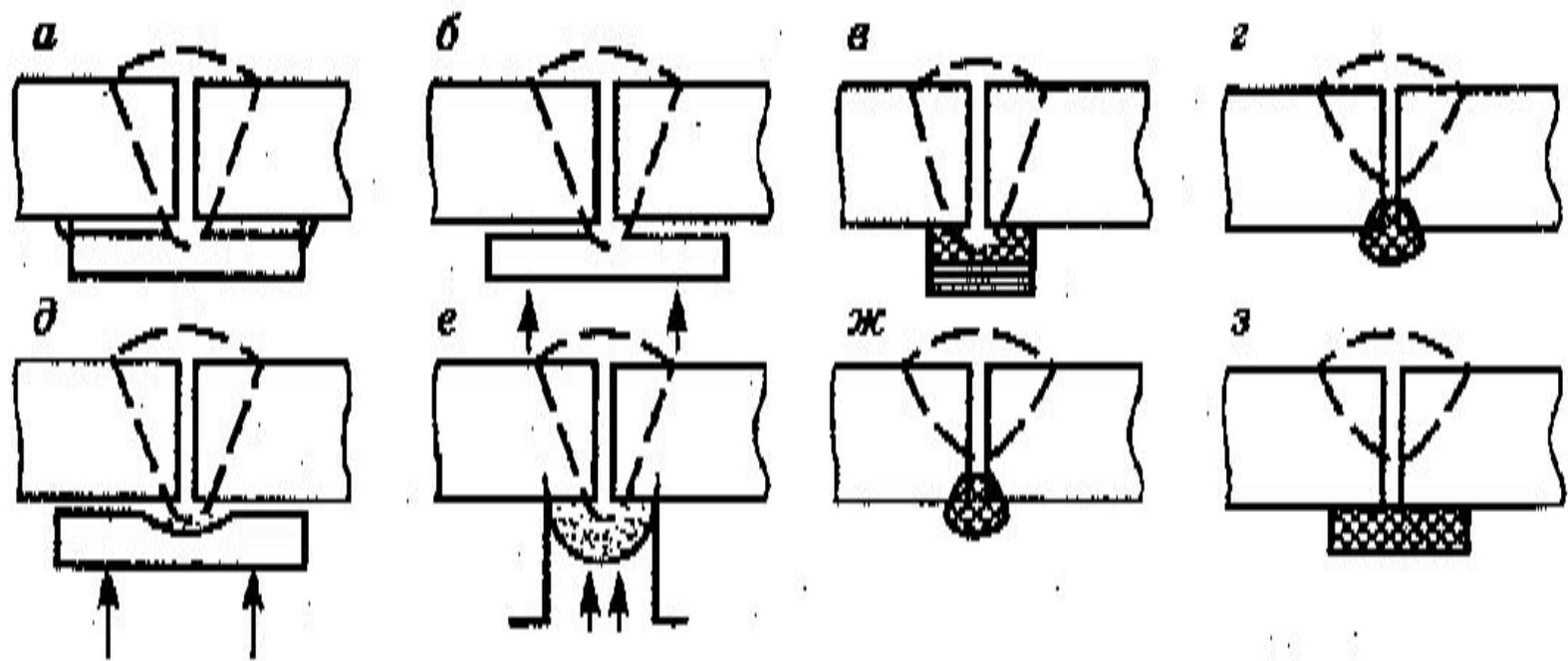


Рис. 19.18. Устройства для удержания расплавленного металла:

а — остающаяся стальная подкладка; **б** — временная медная подкладка;
в — гибкая лента; **г** — ручная подварка; **д** — медно-флюсовая подкладка;
е — флюсовая подушка; **ж** — заделка зазора огнестойким материалом; **з** —
асбестовая подкладка

Преимущества перед ручной дуговой сваркой:

- Производительность сварки под флюсом повышается в 5...12 раз
- высокое и стабильное качество металла сварного шва и сварного соединения;
- небольшой расход электродного металла и электроэнергии;
- облегчение труда сварщиков.

Автоматическая сварка под флюсом является одним из основных способов сварки плавлением. Этим способом успешно свариваются низкоуглеродистые, низколегированные, легированные и высоколегированные стали, а также титан, медь, алюминий и их сплавы.

Сварка в защитных газах

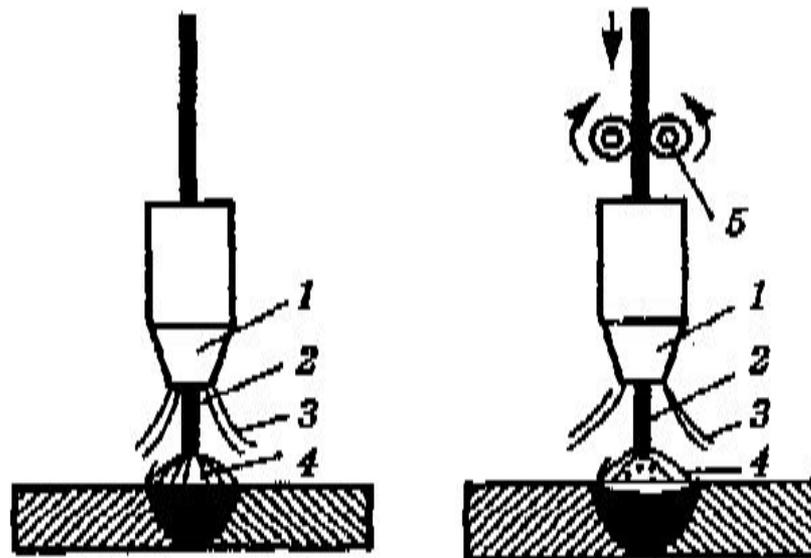
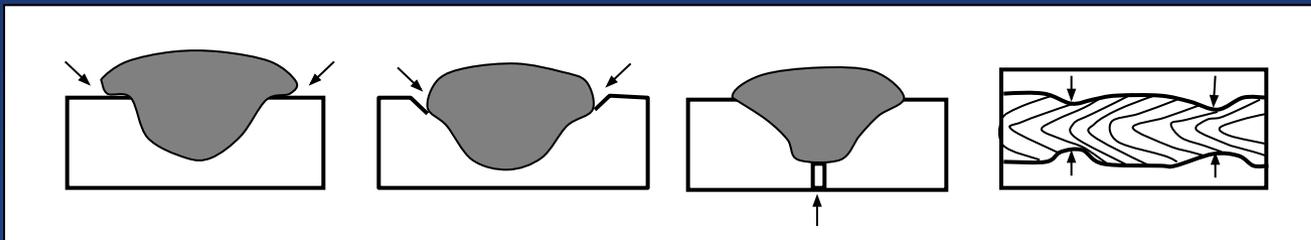


Рис. 19.19. Схемы дуговой сварки в защитных газах:
а — неплавящимся электродом; *б* — плавящимся электродом (*1* — сварочная горелка; *2* — электрод; *3* — защитный газ; *4* — электрическая дуга; *5* — подающие ролики)

Особенности сварки в защитных газах

- высокая степень концентрации дуги, обеспечивающая минимальную зону структурных превращений и относительно небольшие деформации изделий;
- высокая производительность;
- высокоэффективная защита расплавленного металла;
- возможность наблюдения за дугой и сварочной ванной;
- возможность сварки металлов различной толщины в диапазоне от десятых долей миллиметра до десятков миллиметров;
- широкая возможность механизации и автоматизации;
- отсутствие флюсов и покрытий электрода, а следовательно, и необходимости очистки сварных швов;
- возможность сварки в различных пространственных положениях

Схема наружных и внутренних дефектов сварных соединений

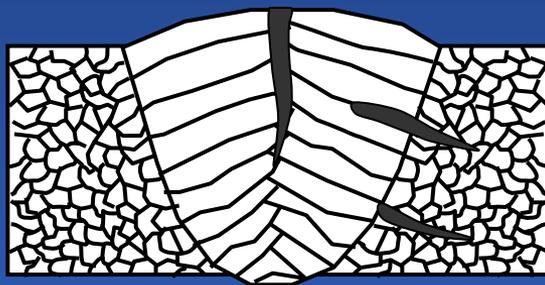


Наплыв

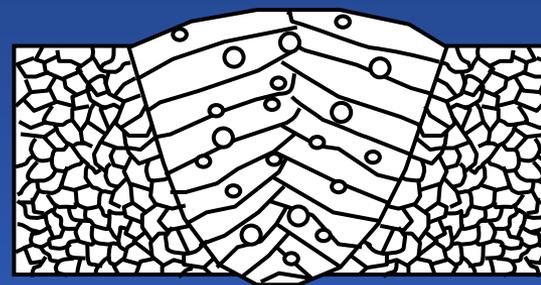
Подрез

Непровар

Утяжки



Трещины



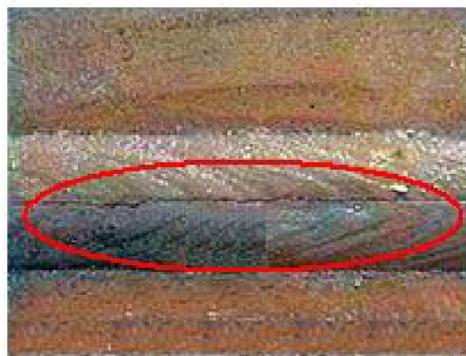
Поры

Продольные трещины:

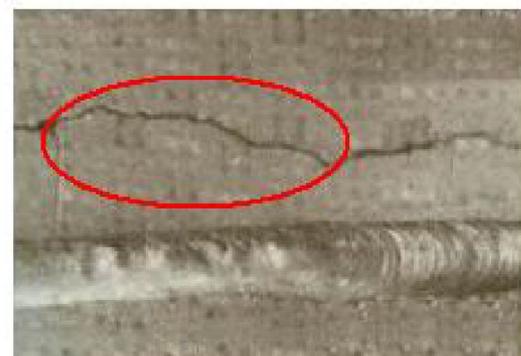
а, б – в сварном шве; в - в основном металле



а)

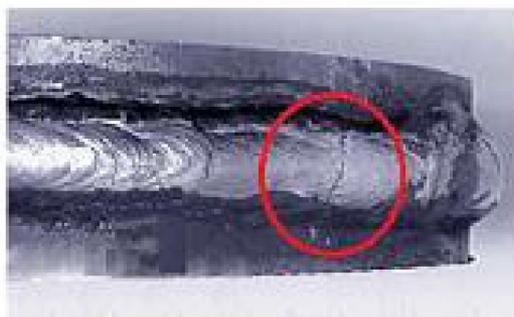


б)



в)

Поперечная трещина в сварном шве (а) и кратерные трещины (б, в).



а)



б)

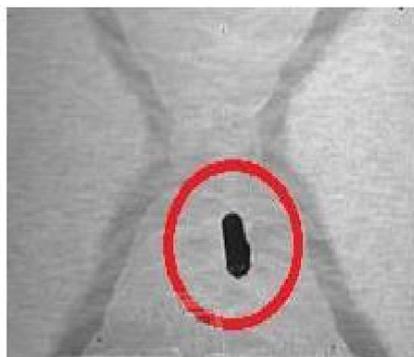


в)

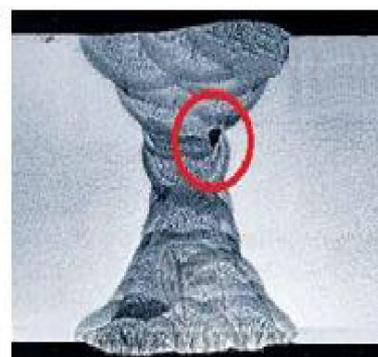
Твердое включение (а), шлаковые включения (б, в)
и вольфрамовые включения (г) в металле шва.



а)



б)



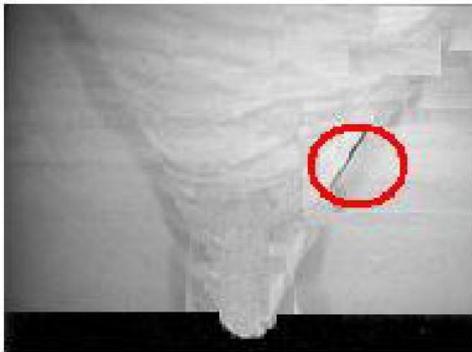
в)



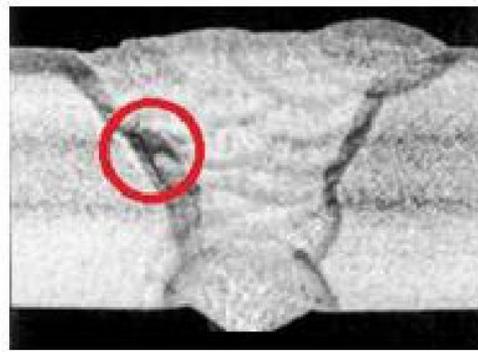
г)

Несплавления и непровары в сварных швах:

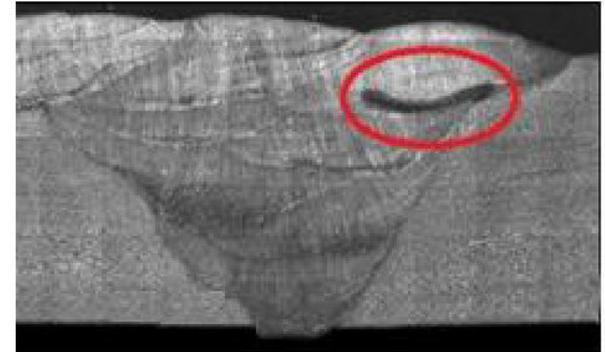
а - несплавление по расплавляемой поверхности; б, в - несплавление между валиками; г – непровар в корне одностороннего шва; д - непровар в корне двустороннего шва; е - непровар в угловом шве



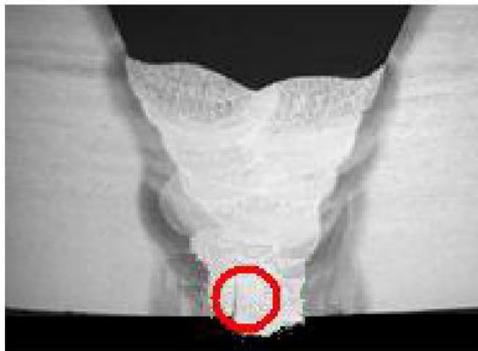
а)



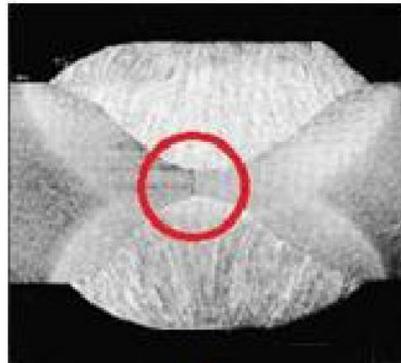
б)



в)



г)

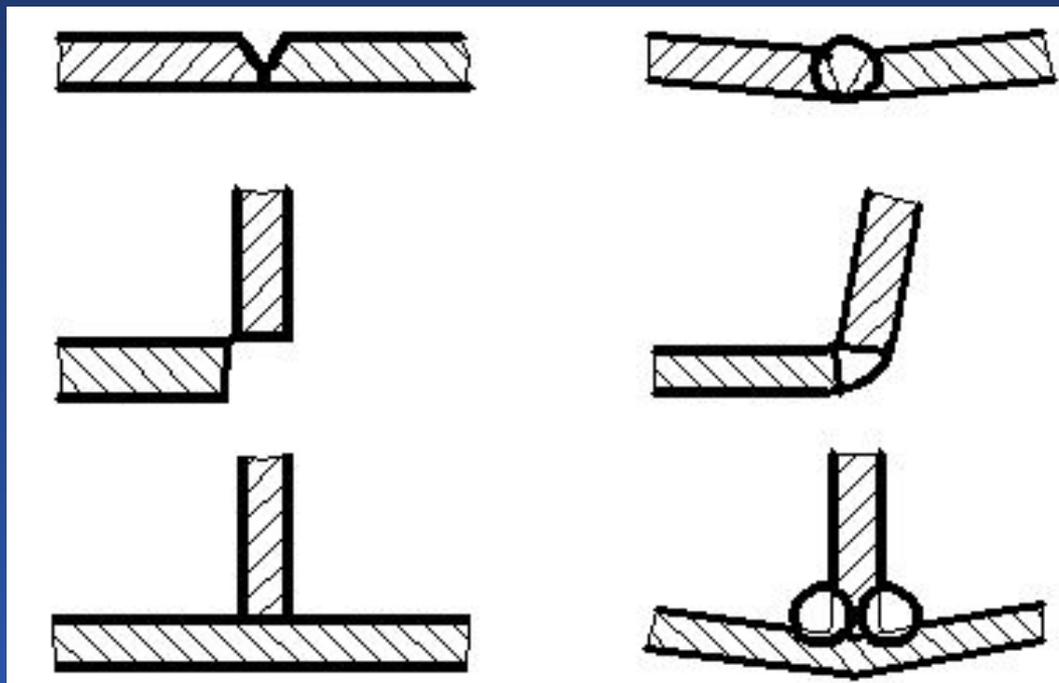


д)



е)

Деформация сварных изделий от поперечной усадки наплавленного металла

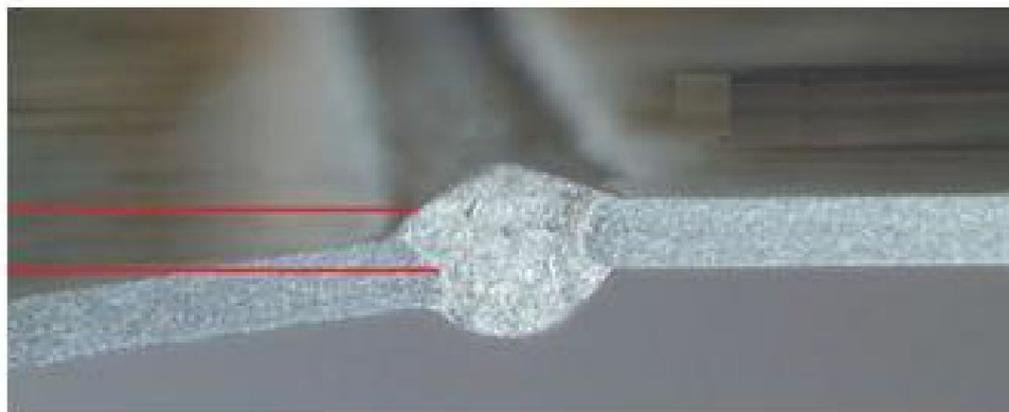


а

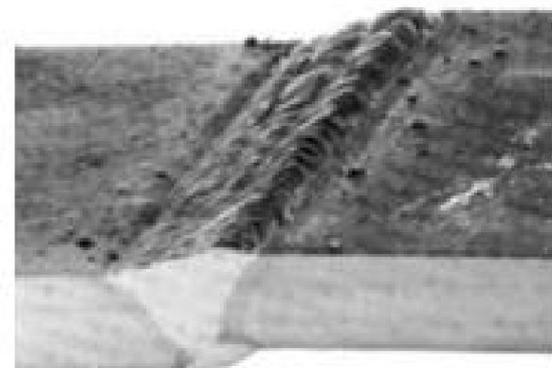
б

а – до сварки; *б* – после сварки

Дефекты геометрии сварного соединения: а – угловое смещение; б - линейное смещение



а)



б)

Электрошлаковая сварка

- При электрошлаковой сварке источником теплоты для расплавления основного и электродного металла является расплавленный флюс, нагреваемый до высокой температуры (2000 °С) за счет прохождения электрического тока.
- Электрошлаковую сварку широко применяют в тяжелом машиностроении при изготовлении крупногабаритных конструкций (валов, корпусных деталей и других ковано-сварных и лито-сварных конструкций) с толщиной свариваемых заготовок от 50 до 2000 мм.

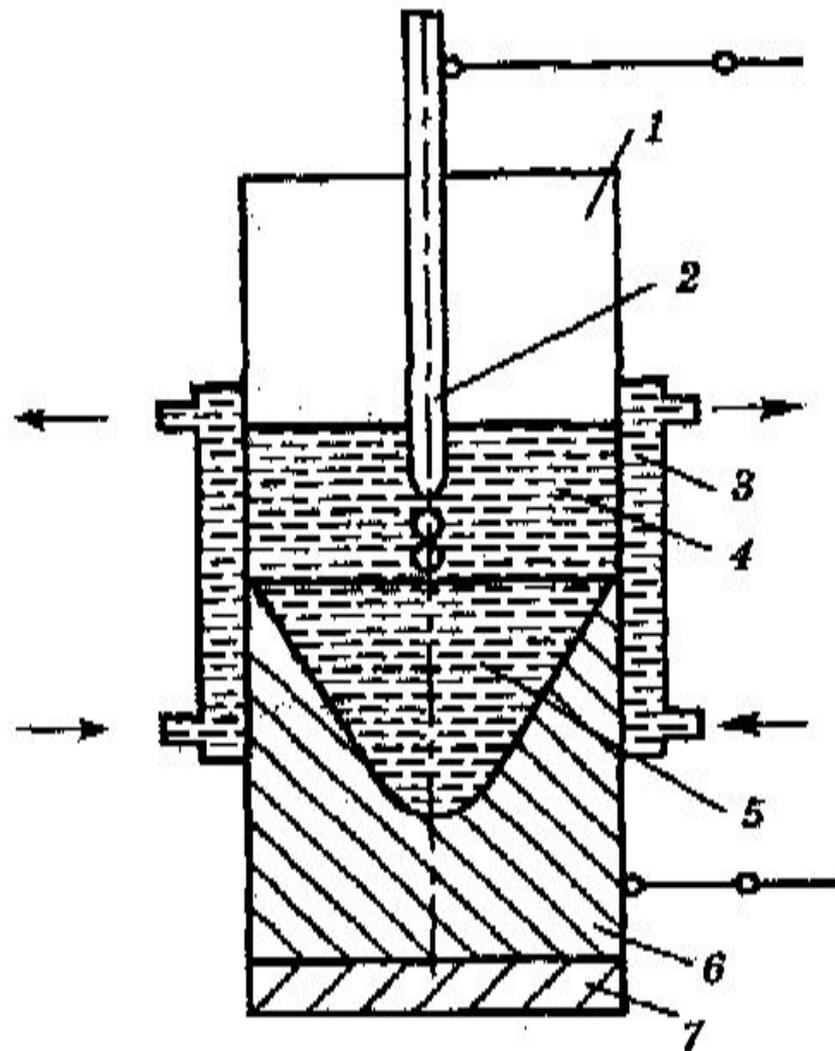
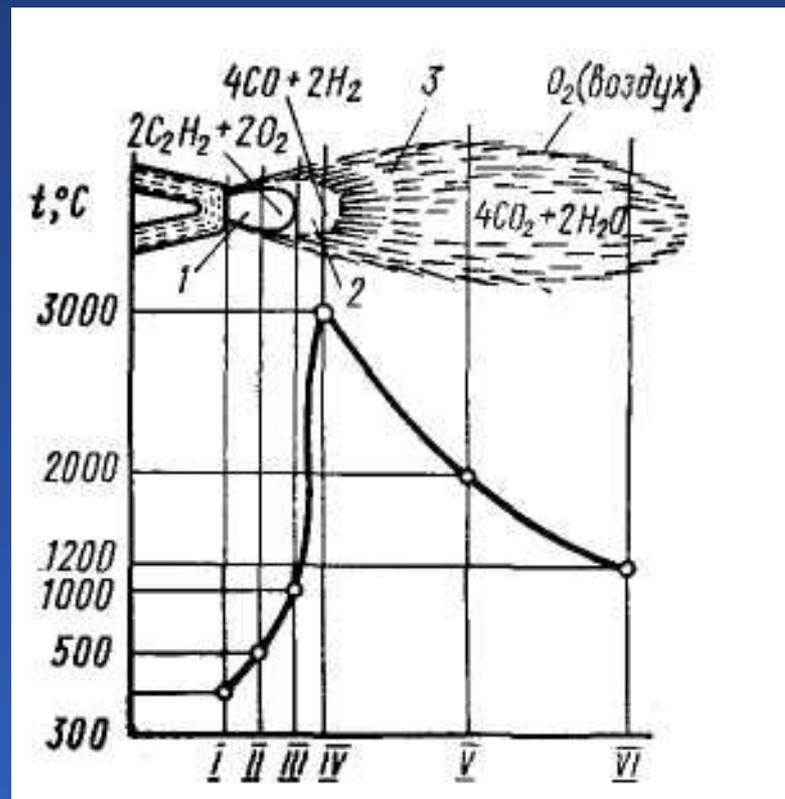
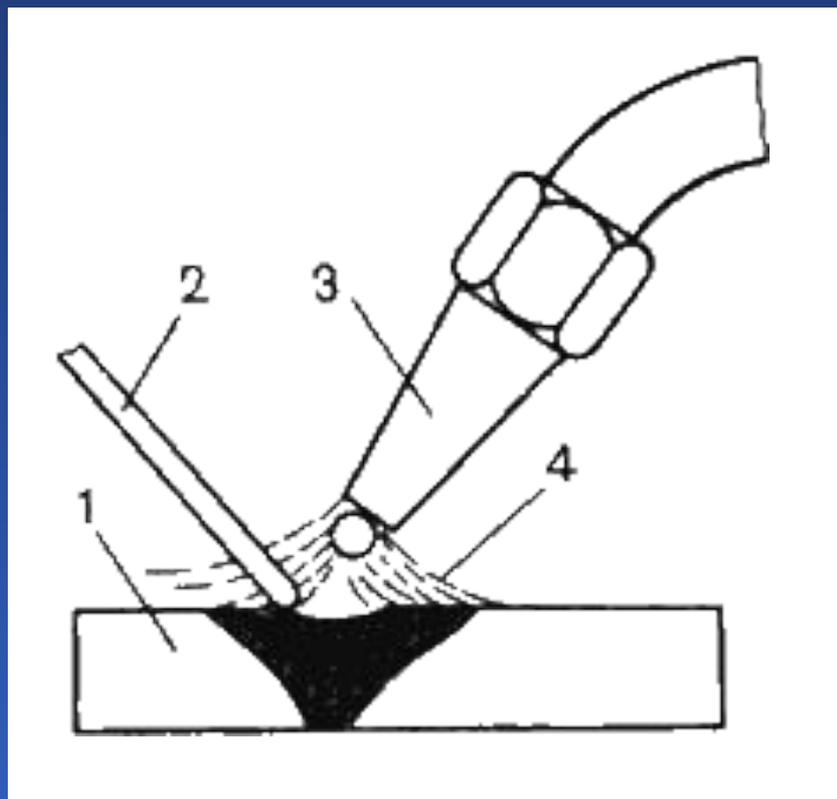


Рис. 19.20. Схема процесса электрошлаковой сварки

Газовая сварка

- При газовой сварке нагрев кромок соединяемых частей производится пламенем, образующимся при сжигании газов в смеси с технически чистым кислородом на выходе из сварочной горелки.
- Основным горючим газом является ацетилен, также применяются природный газ, пропан-бутановая смесь, МАФ (метилацетилен-алленовая фракция), водород и другие горючие газы.

Схема газовой сварки и строения нормального ацетилено-кислородного пламени и график распределения температуры по его длине



Технологические особенности газовой сварки

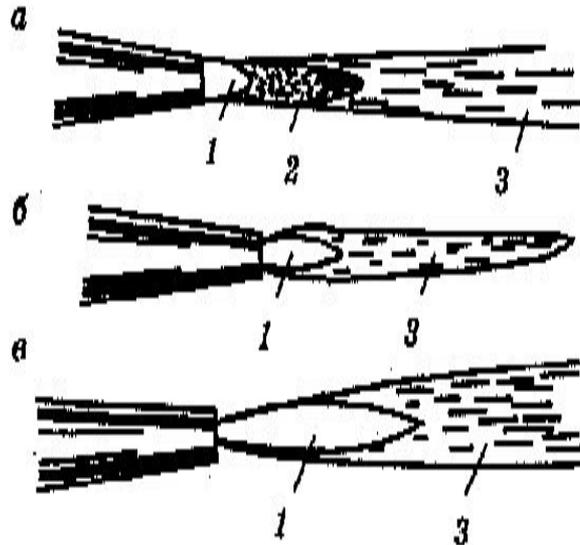


Рис. 19.22. Виды ацетилено-кислородного пламени:
а — нормальное; б — окислительное; в — науглероживающее

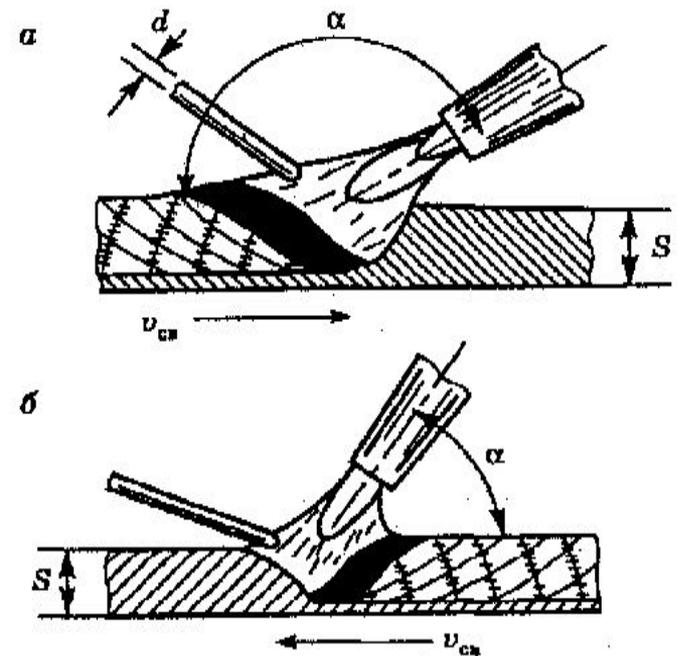


Рис. 19.23. Способы газовой сварки:
а — правый; б — левый

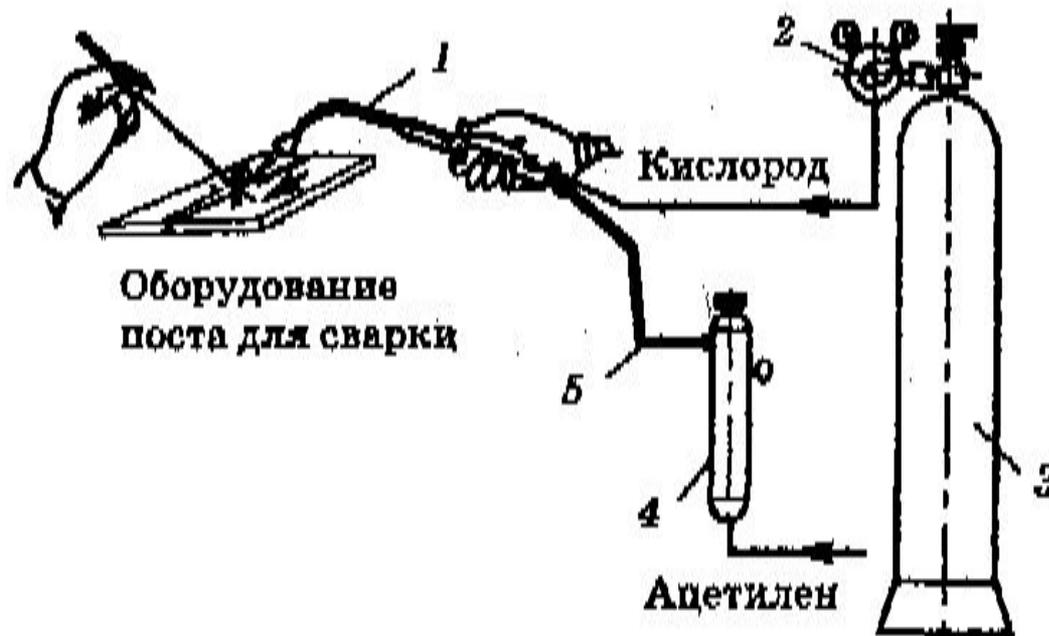


Рис. 19.24. Оборудование поста для газовой сварки:
 1 — сварочная горелка; 2 — кислородный редуктор; 3 — баллон с кислородом; 4 — предохранительный затвор; 5 — рукава

Оборудование

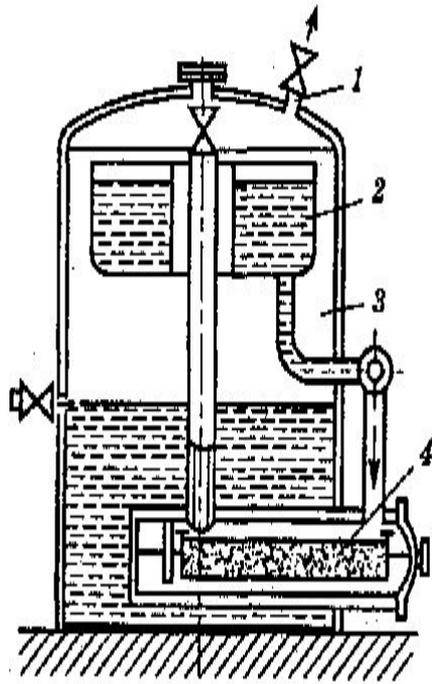


Рис. 19.25. Схема ацетиленового генератора комбинированного типа:
1 — отбор газа; 2 — бак с водой; 3 — газосборник; 4 — зарядник

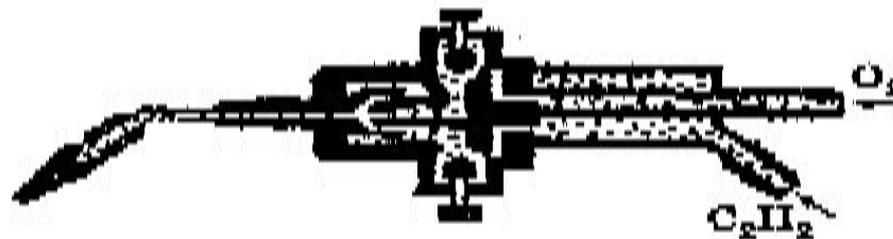


Рис. 19.27. Инжекторная горелка для газовой сварки

При лазерной сварке нагрев и плавление металла осуществляются мощным световым лучом, получаемым от специальных твердых или газовых излучателей.

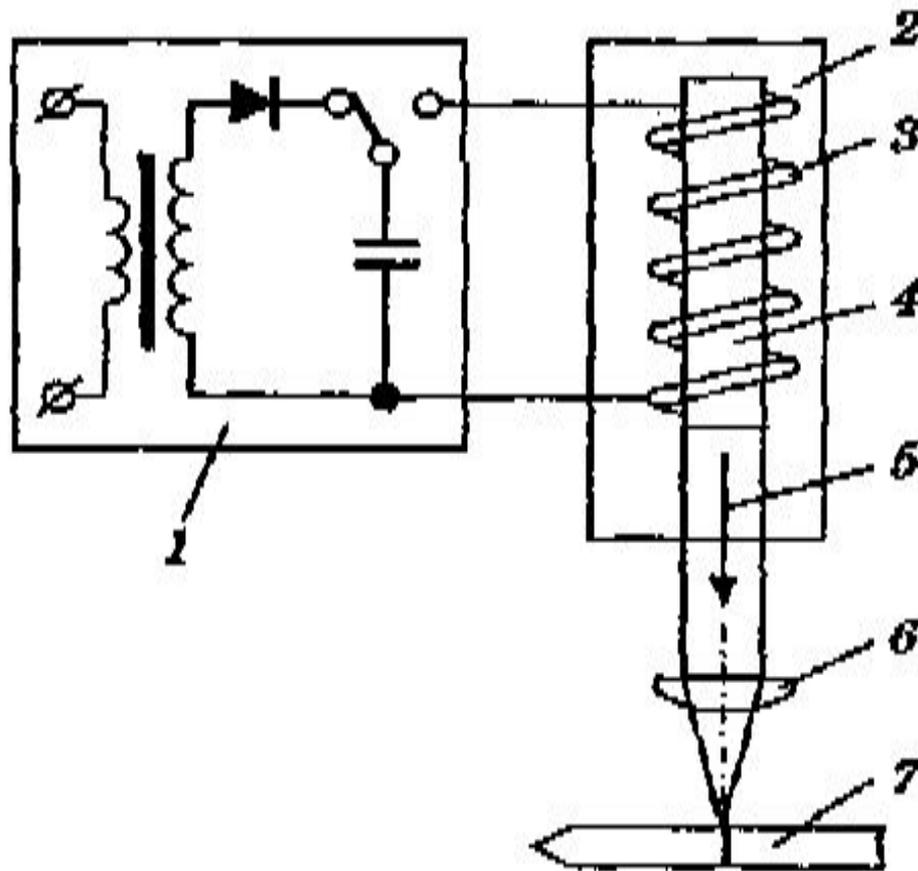


Рис. 19.31. Схема установки для лазерной сварки

Плазменная сварка

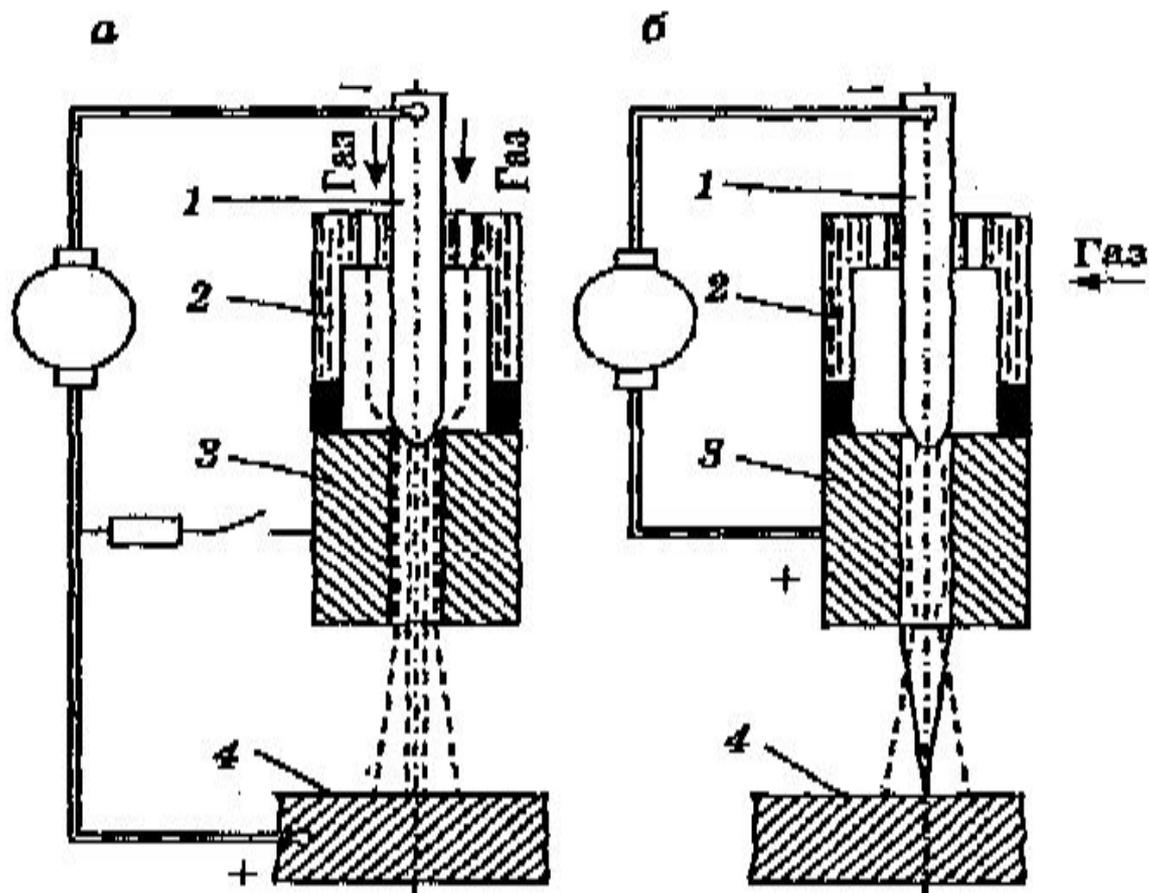


Рис. 19.32. Схемы устройства плазмотронов:
а — с дугой прямого действия; б — с дугой косвенного действия

Термическая резка

Получили распространение несколько способов термической резки металлов:

- газокислородная;
- кислородно-флюсовая;
- дуговая резка металлическим электродом;
- кислородно-дуговая;
- воздушно-дуговая;
- плазменно-дуговая.

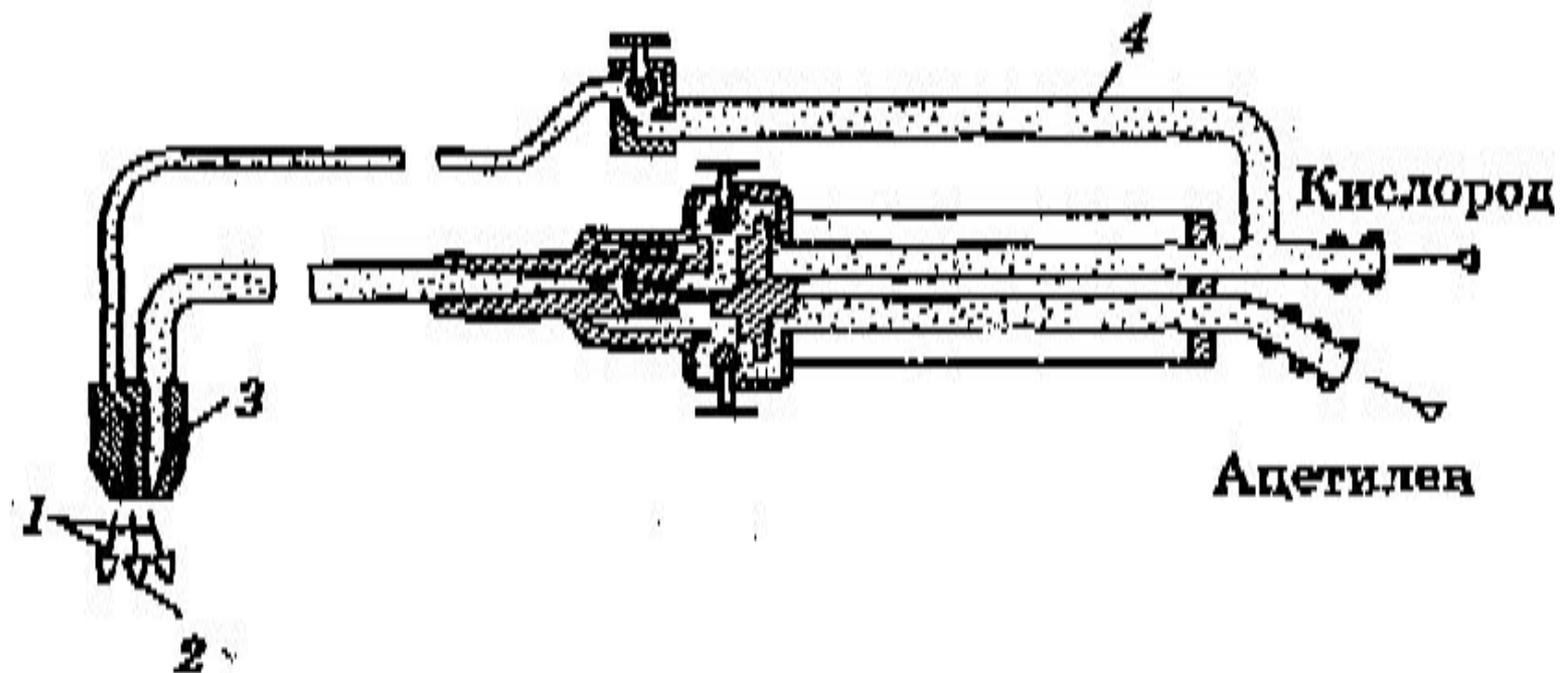


Рис. 19.28. Схема газокислородного резака

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ

Контактная электрическая сварка является основным видом сварки давлением. Все способы контактной сварки основаны на нагреве и пластической деформации заготовок в месте их соединения.

Нагрев осуществляется теплотой, которая выделяется при прохождении электрического тока через находящиеся в контакте соединяемые части.

Точечная сварка — способ *контактной сварки*, при котором детали свариваются по отдельным ограниченным участкам касания.

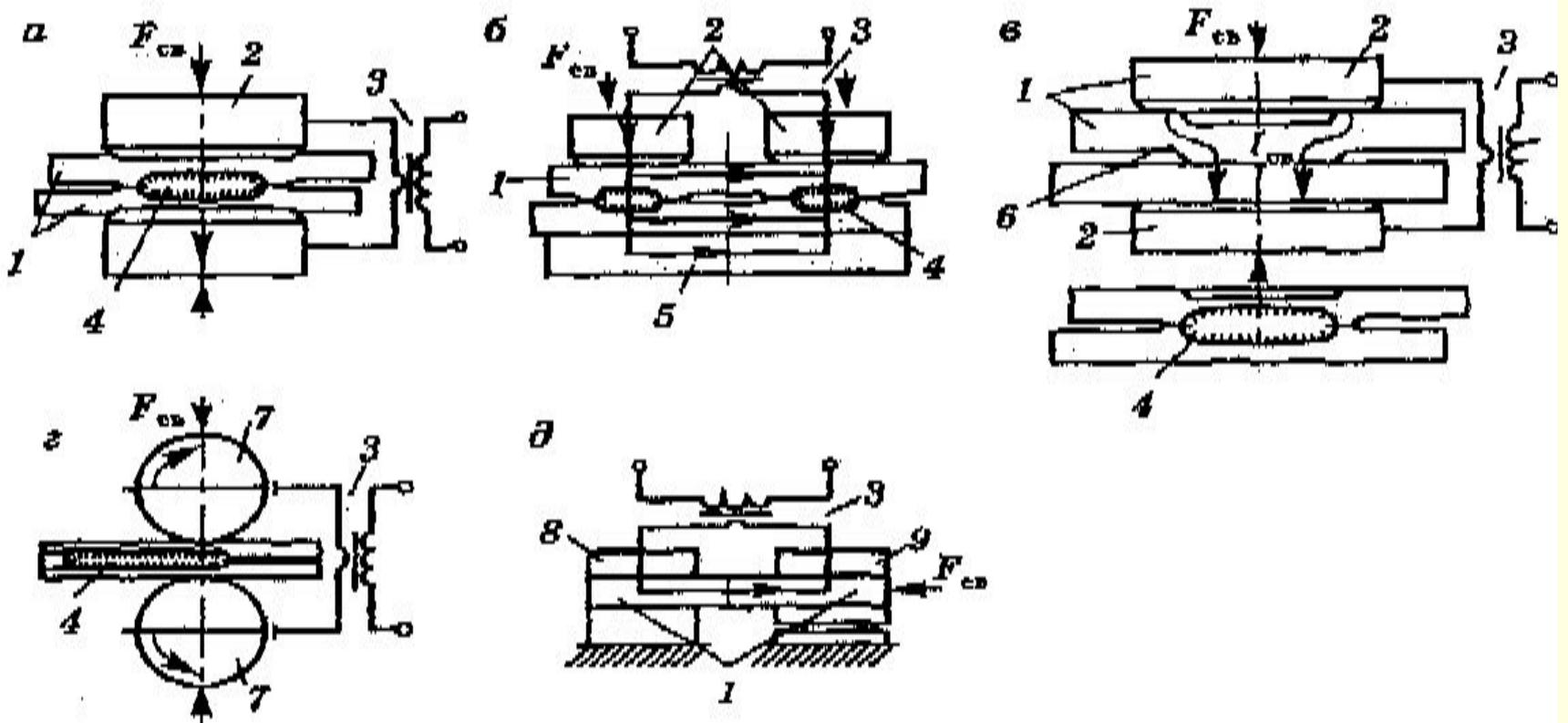
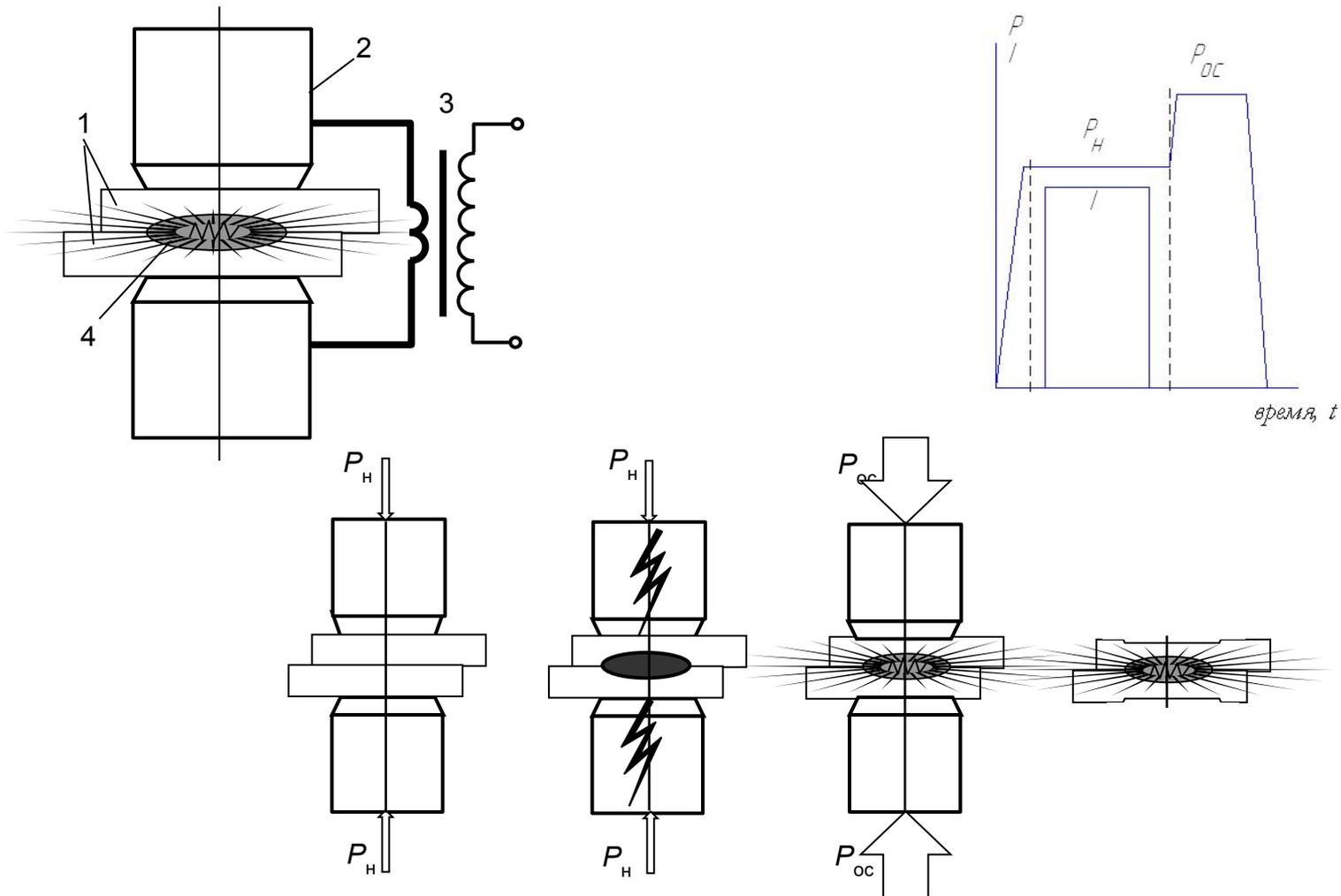
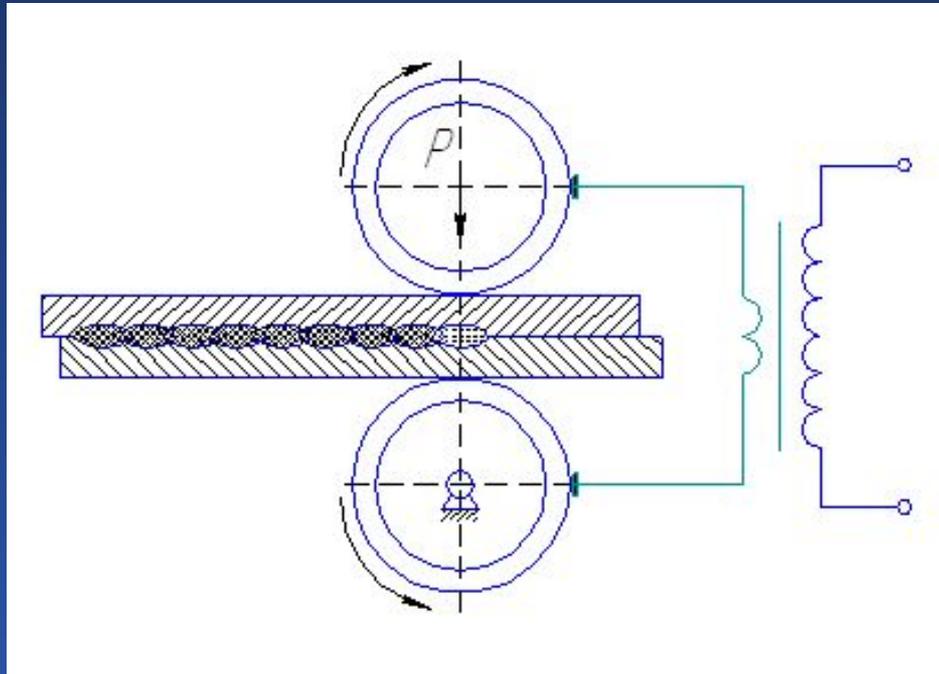


Рис. 20.1. Основные способы контактной сварки:
а, б — точечная; *в* — рельефная; *г* — шовная; *д* — стыковая

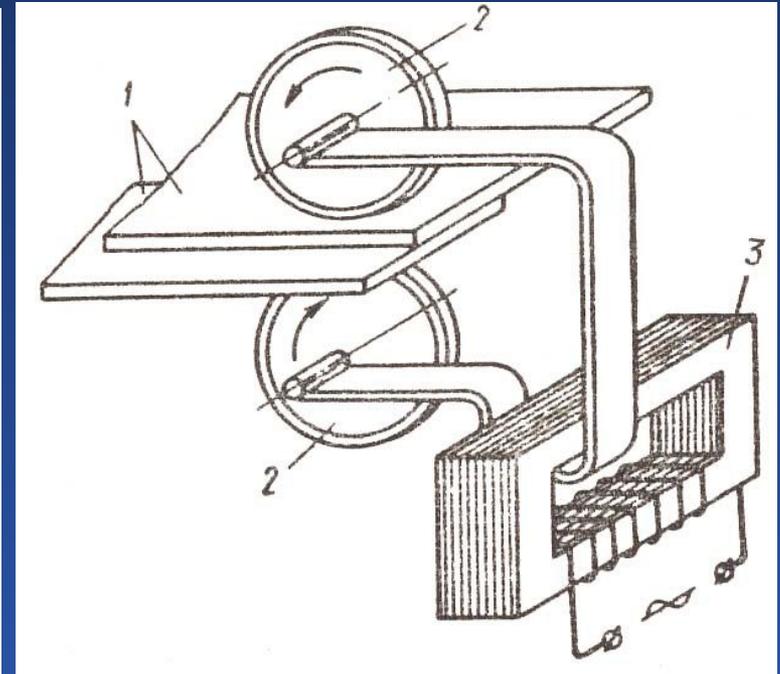
Схема, стадии и циклограмма точечной контактной сварки



Шовная контактная сварка



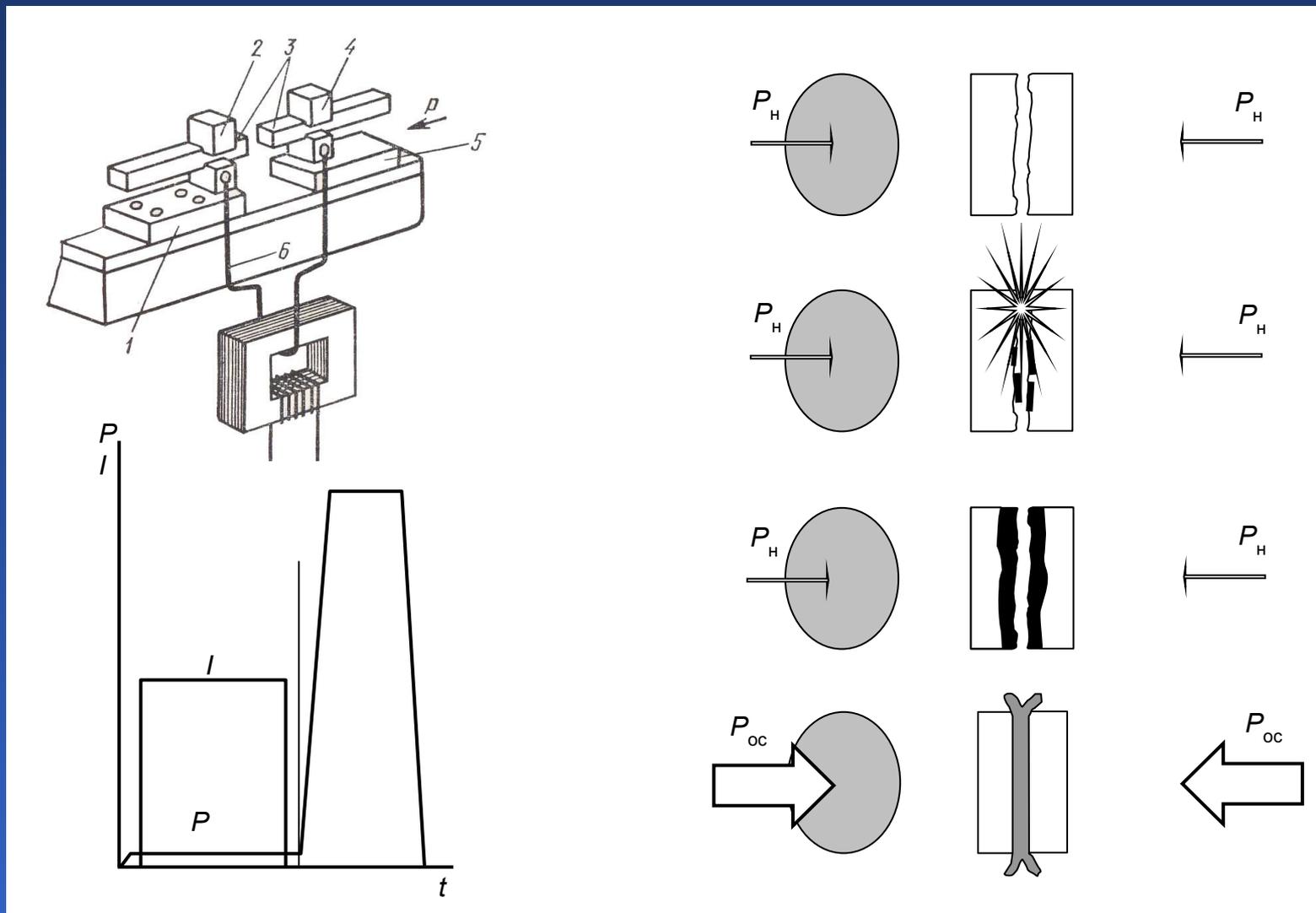
а



б

а – схема формирования сварного шва; б – схема процесса

Схема, стадии и циклограмма стыковой контактной сварки оплавлением

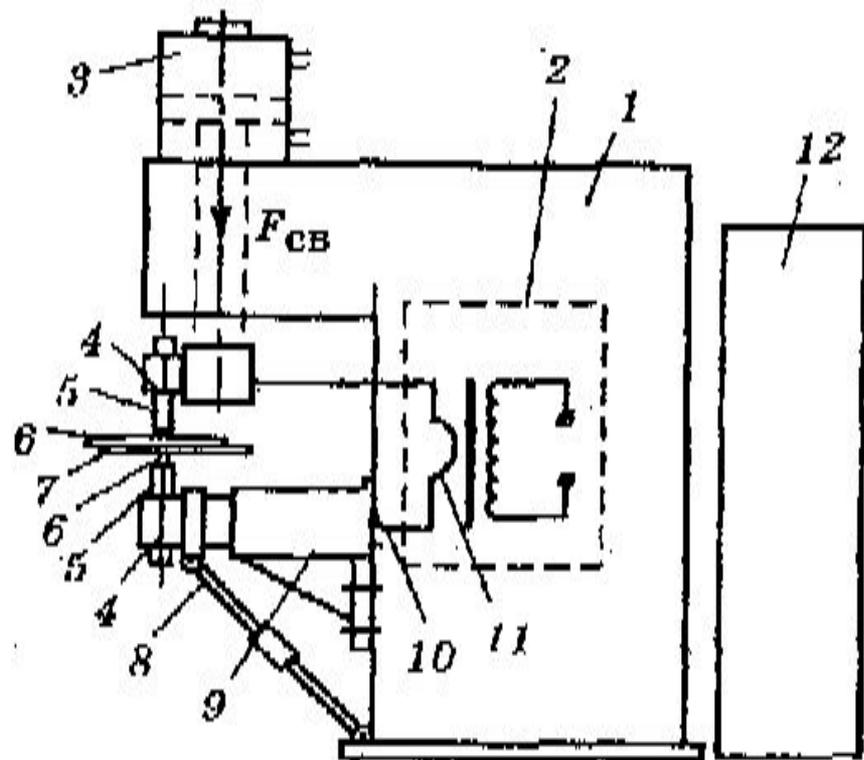


Оборудование для контактной сварки

Современное сварочное оборудование можно классифицировать:

- по способу преобразования энергии — машины переменного тока и импульсные;
- способу сварки — стыковые, точечные, рельефные и шовные;
- характеру установки — стационарные, передвижные и подвесные;
- характеру действия — автоматические, полуавтоматические

а



б

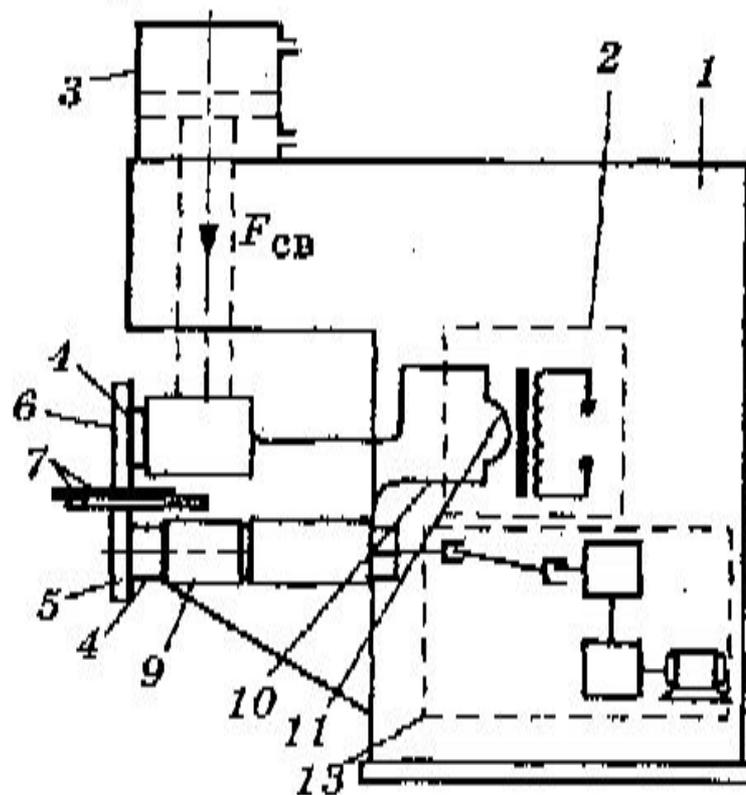


Рис. 20.8. Схемы машин для точечной (а) и шовной (б) сварки:
 1 — корпус; 2 — сварочный трансформатор; 3 — привод сжатия; 4 — консоли;
 5 — электродержатели; 6 — электроды; 7 — детали; 8 — подкос; 9 — кронштейн (держатель); 10 — гибкие шины; 11 — вторичный виток трансформатора; 12 — шкаф управления; 13 — привод вращения электродов (роликов)

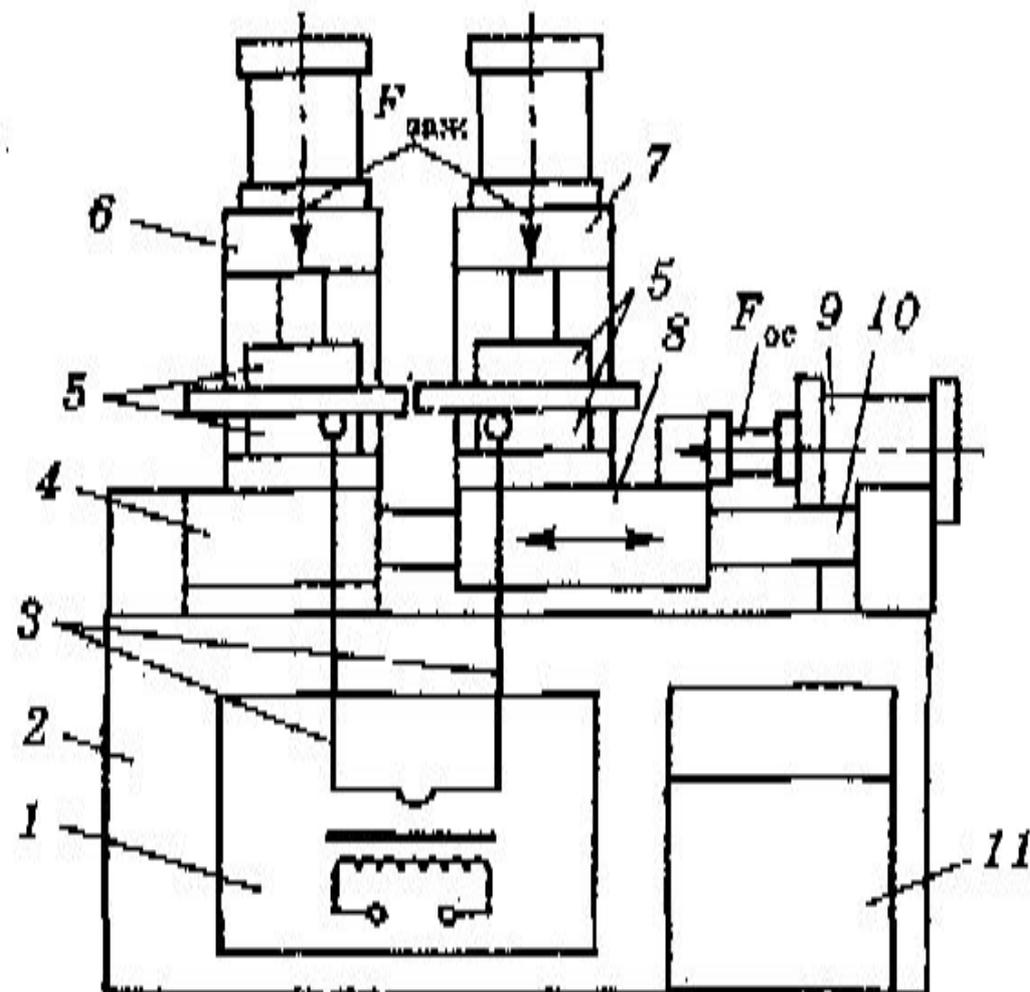


Рис. 20.9. Конструктивная схема машины для стыковой сварки

Сварка трением является одной из разновидностей сварки давлением. Сварное соединение образуется в твердой фазе без расплавления металла свариваемых деталей.

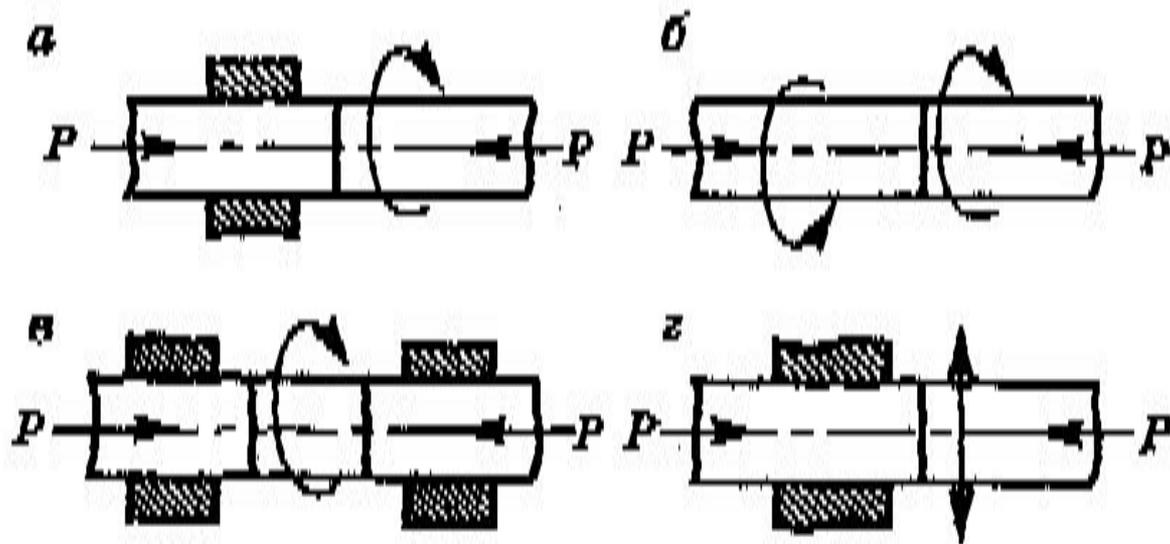


Рис. 20.10. Принципиальная схема процесса сварки трением:
а — сварка с вращением одной детали; **б** — сварка с вращением двух деталей; **в** — одновременная сварка трех деталей; **г** — сварка вибротрением

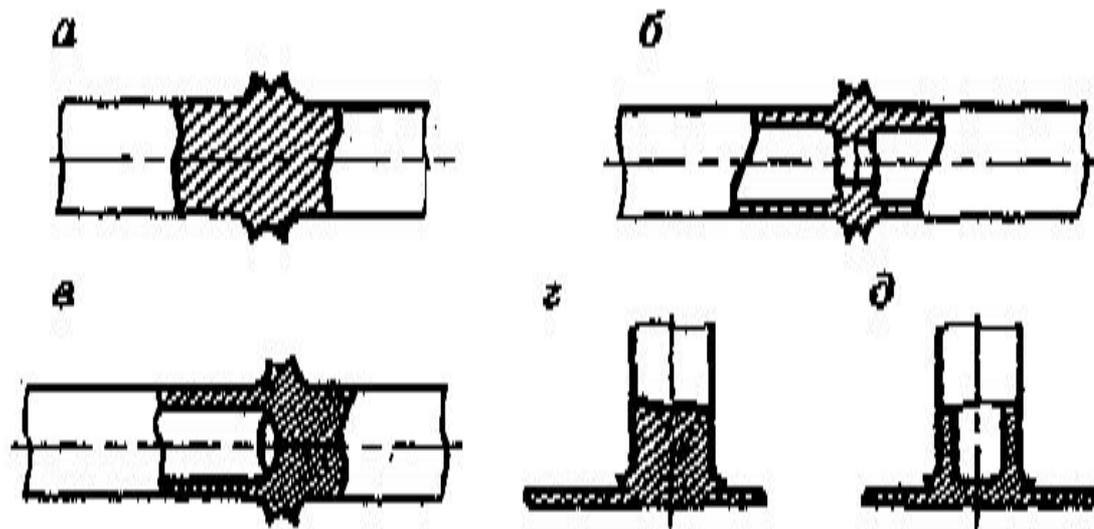


Рис. 20.11. Типы соединений, выполняемых с помощью сварки трением:

***а* — стержня встык; *б* — трубы встык; *в* — трубы со стержнем встык; *г, д* — Т-образные соединения стержня и трубы с плоской поверхностью контр-детали**

Диффузионная сварка — разновидность сварки давлением — происходит за счет взаимной диффузии атомов контактирующих поверхностей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации.

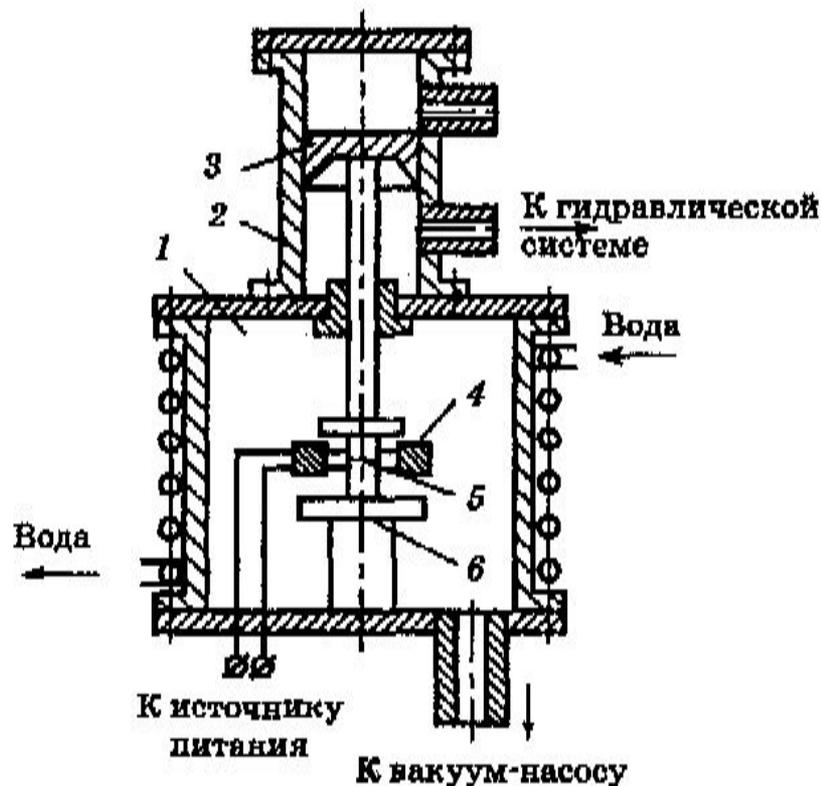


Рис. 20.12. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме:

1 — вакуумная камера; 2 — цилиндр гидропривода; 3 — поршень; 4 — индуктор; 5 — свариваемые детали; 6 — стол для крепления деталей

Ультразвуковая сварка. Неразъемное соединение металлов образуется при совместном воздействии на детали механических колебаний высокой частоты и относительно небольших сдвливающих усилий.

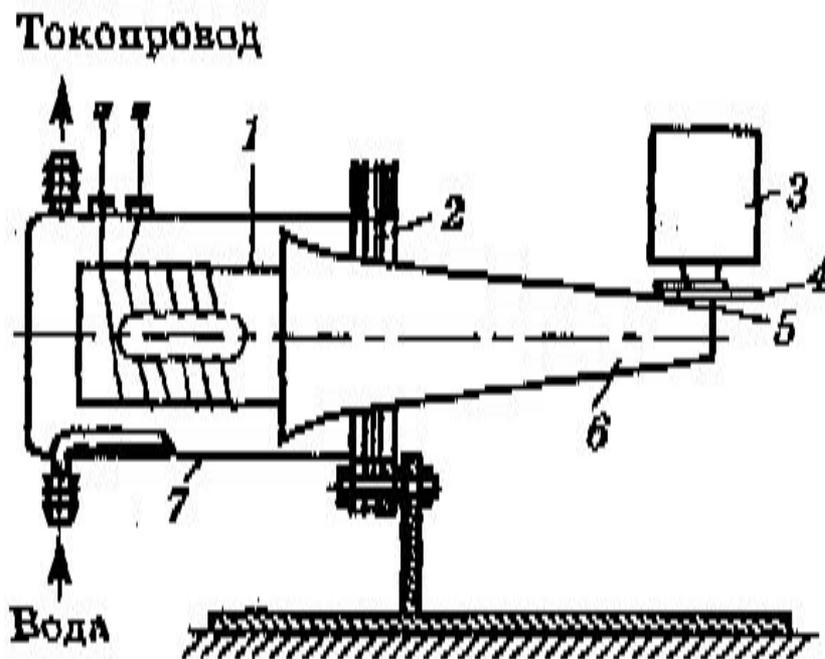


Рис. 20.14. Схема установки для точечной сварки ультразвуком

Сварка взрывом — это процесс соединения материалов, находящихся в твердом состоянии, за счет пластической деформации соударяющихся под углом поверхностей заготовок при воздействии импульса давления, создаваемого взрывом.

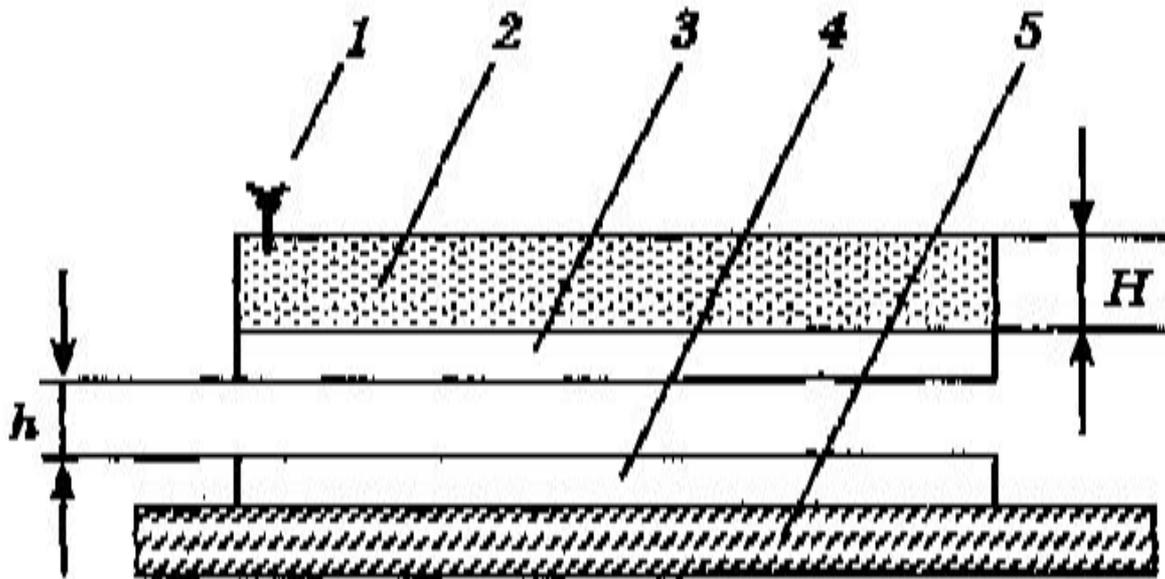


Рис. 20.15. Схема сварки взрывом с параллельным расположением пластин

Сварка труб взрывом осуществляется по схеме внутреннего и наружного плакирования

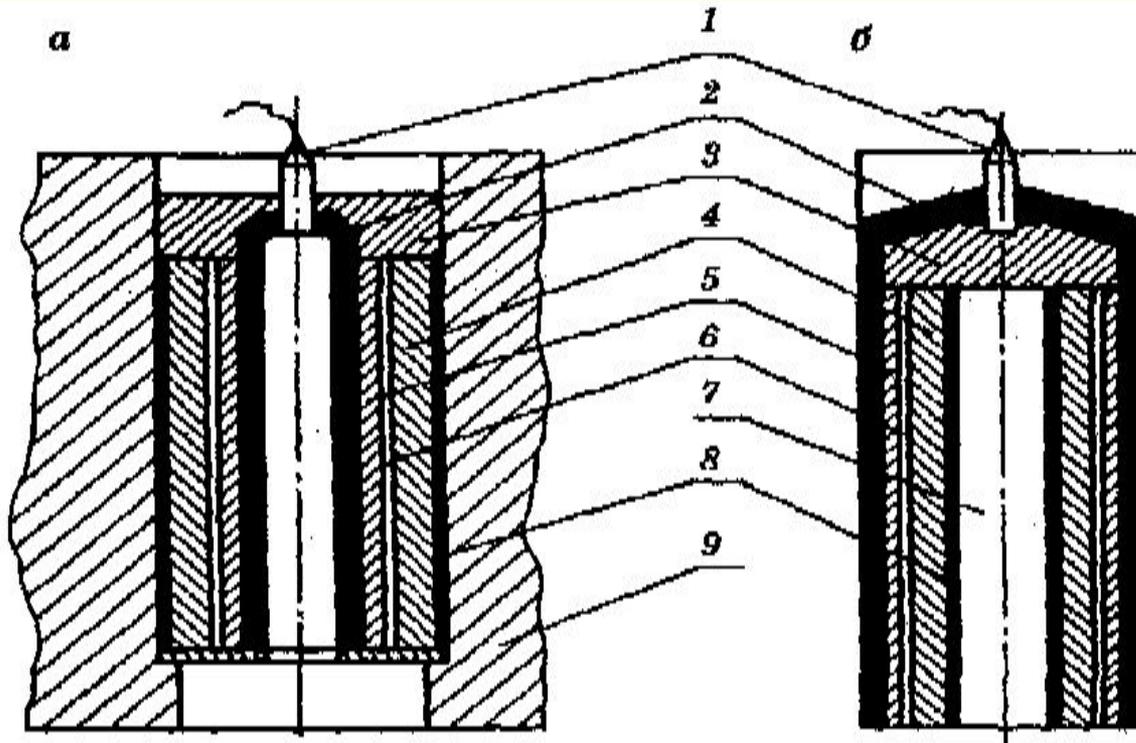
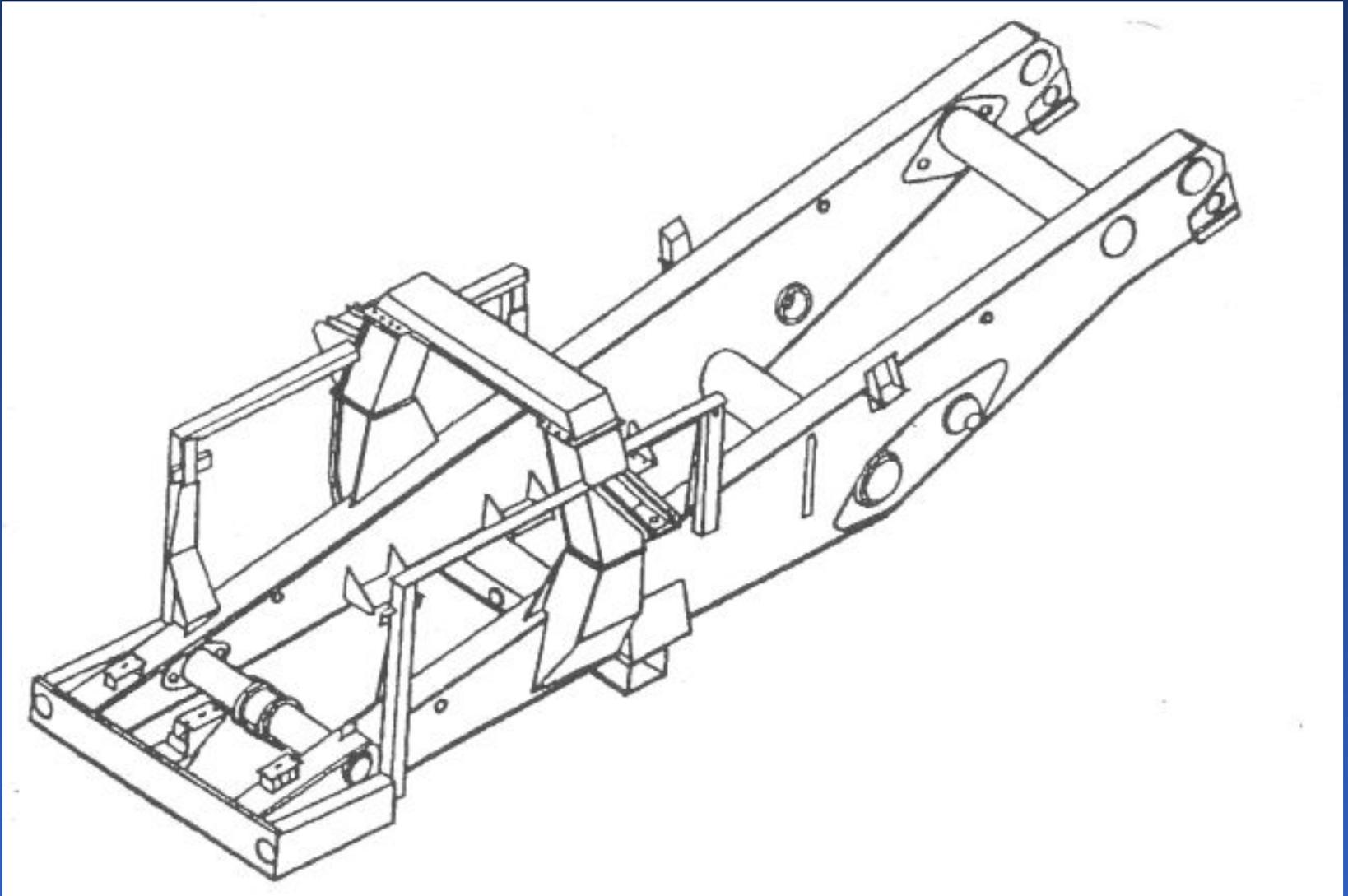


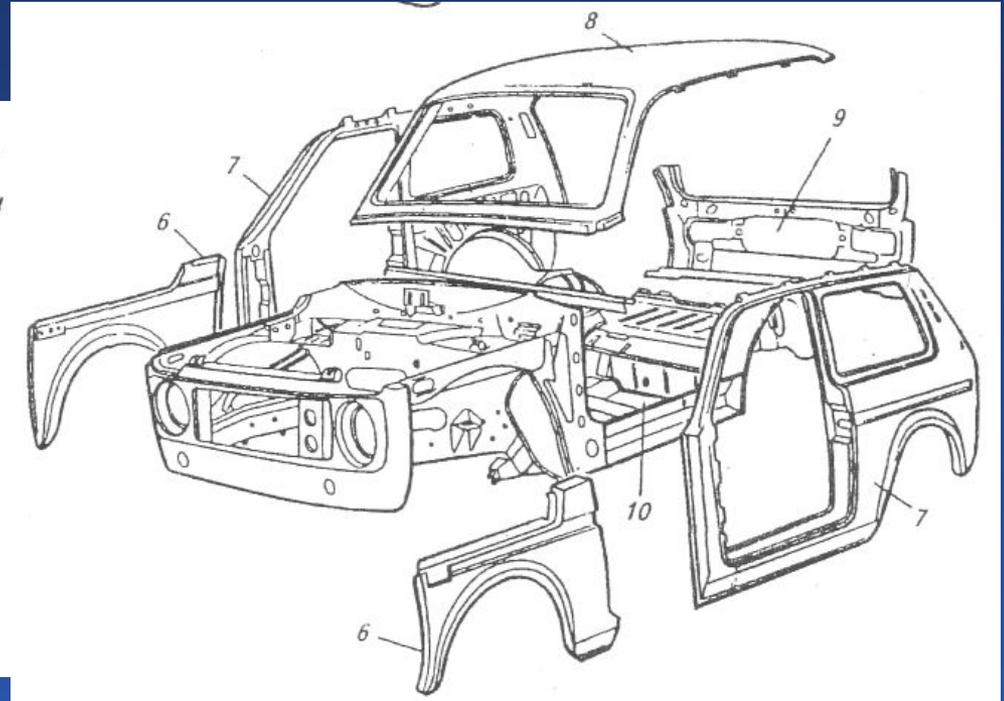
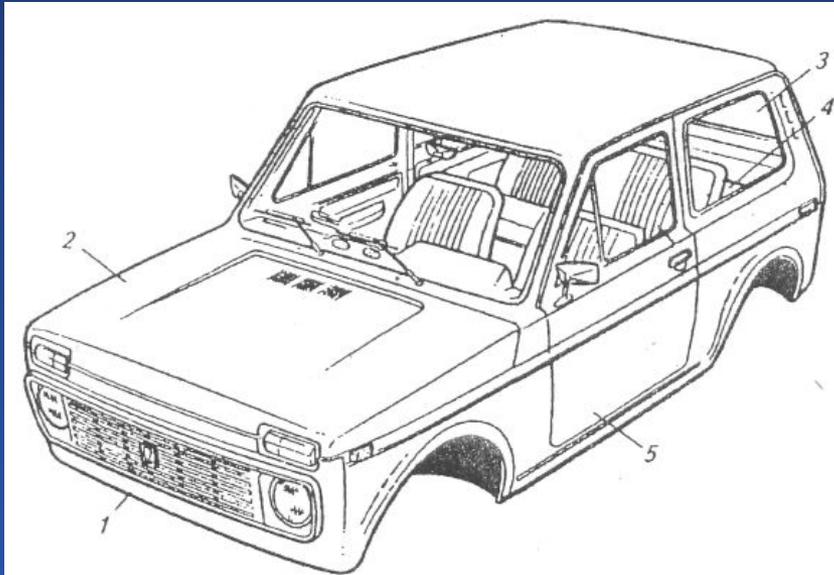
Рис. 20.16. Схема внутреннего (а) и наружного (б) плакирования трубы взрывом:

- 1 — электродетонатор; 2 — взрывающее вещество; 3 — защитный элемент;
4 — плакируемая труба; 5 — плакирующая труба; 6 — сварочный зазор;
7 — оправка; 8 — защитный слой; 9 — матрица

Цельносварная рама автомобиля-самосвала БелАЗ



Кузов автомобиля ВАЗ-2121



1 – корпус; 2 – капот двигателя; 3 – задняя дверь;
4 – багажное отделение; 5 – передняя дверь; 6 – переднее крыло;
7 – боковина; 8 – крыша; 9 – задняя часть корпуса; 10 – основание

Пайка

Пайка – процесс получения неразъемного соединения заготовок без их расплавления путем смачивания поверхностей жидким припоем с последующей его кристаллизацией. Расплавленный припой затекает в специально создаваемые зазоры между деталями и диффундирует в металл этих деталей. Протекает процесс взаимного растворения металла деталей и припоя, в результате чего образуется сплав, более прочный, чем припой.

Качество паяных соединений (прочность, герметичность, надежность и др.) зависит от правильного выбора основного металла, припоя, флюса, способа нагрева, типа соединения.

Процесс пайки включает: подготовку сопрягаемых поверхностей деталей под пайку, сборку, нанесение флюса и припоя, нагрев места спая, промывку и зачистку шва.

Паяные соединения контролируют по параметрам режимов пайки, внешним осмотром, проверкой на прочность или герметичность, методами дефекто- и рентгеноскопии.

