Аграрная

ГЕНЕТИКА
С ОСНОВАМИ
СЕЛЕКЦИИ
КОРМОВЫХ
КУЛЬТУР

Учебник

В книге кратко изложены основные положения теории контактной сварки, рассмотрены главные ее технологические процессы, оборудование и аппаратура для их выполнения.

Книга является учебником для студентов высших учебных заведений, специализирующихся по сварке. Книга может быть использована инженерно-техническими работниками научно-исследовательских институтов и заводов.

1992
10
1980
1995
2001

Редактор д-р техн. наук **Д. С. Балковец**

Рецензенты: кафедра «Оборудование и технология сварочного производства» Ростовского-на-Дону института сельскохозяйственного машиностроения; д-р техн. наук проф. ***А. А. Алов***

Редакция литературы по горячей обработке металлов
Зав. редакцией инж. *С. Я. ГОЛОВИН*

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящей книге, ограниченной рамками программы курса «Технология и оборудование контактной электросварки», освещены только основные вопросы теории и практики контактной сварки. За последние годы этот важный раздел сварочной техники получил очень большое развитие благодаря работам Всесоюзного научно-исследовательского института электросварочного оборудования (ВНИИЭСО), Института Электросварки им. Е. О. Патона, Центрального научно-исследовательского института технологии и машиностроения (ЦНИИТМАШа) и других научно-исследовательских институтов, лабораторий МВТУ им. Баумана, Киевского политехнического института (КПИ), Ленинградского политехнического института (ЛПИ) и др., а также заводов, выпускающих сварочное оборудование или использующих контактную сварку в своем производстве, как «Электрик», Горьковский автомобильный завод (ГАЗ), автозавод им. Лихачева (ЗИЛ), Подольский машиностроительный завод им. Орджоникидзе, «Красный котельщик», Калининский вагоностроительный завод и многие другие. Много сделано за это время в области контактной сварки и за рубежом.

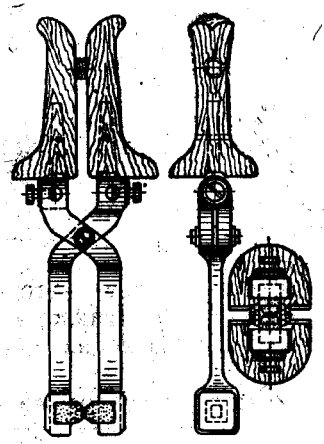
Работы, краткий перечень которых приведен в списке литературы, были использованы автором. Они рекомендуются также как дополнительный материал при проработке соответствующих разделов курса.

Современная теория и практика контактной сварки основывается на ряде общетехнических дисциплин, прежде всего электротехнике и металловедении, изучение которых должно предшествовать систематическому прохождению курса контактной сварки.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Контактная сварка — технологический процесс получения неразъемного соединения металлических деталей при их местном нагреве протекающим в этих деталях электрическим током, сопровождаемым сдавливанием зоны соединения. Таким образом, контактная сварка — один из видов сварки давлением.



Фиг. 1. Клещи Н. Н. Бенардоса для точечной сварки.

С физической точки зрения соединение при контактной сварке, как и при любом другом виде сварки, образуется за счет действия сил междуатомного сцепления. Нагрев и пластическая деформация создают при контактной сварке благоприятные условия для развития этих сил между свариваемыми поверхностями. В большинстве случаев нагрев осуществляется теплом, выделяемым током, как на активном сопротивлении свариваемых деталей, так и на контактном сопротивлении между ними. Отсюда происходит и название процесса — контактная сварка.

Контактная сварка осуществляется без расплавления металла (сварка в пластическом состоянии); значительно чаще, она заканчивается после местного расплавления металла в зоне соединения.

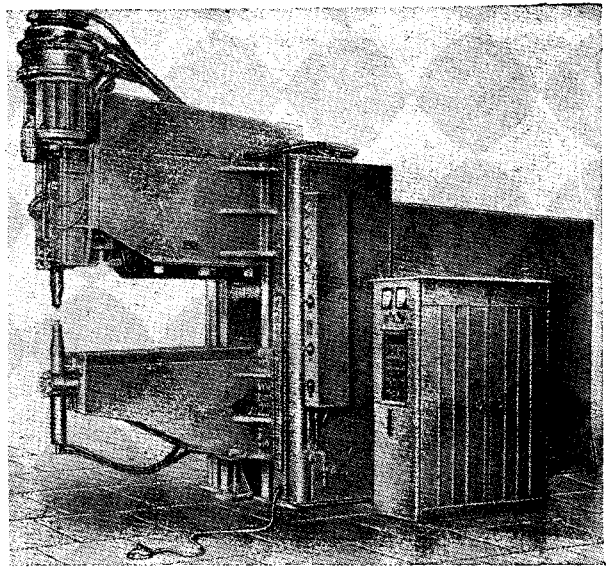
Контактная сварка начала применяться в 80-х годах прошлого века. В 1887 г. русский изобретатель Н. Н. Бенардос запатентовал точечную сварку между угольными электродами с помощью простейших клещей (фиг. 1), являющихся прообразом современных подвесных точечных машин. Им же предложена роликовая сварка. Почти одновременно Томсон (США) изобрел стыковую сварку сопротивлением. Несколько позднее была разработана применяемая в настоящее время точечная сварка медными электродами. Стыковую сварку стали широко применять после изобретения в 1903 г. сварки оплавлением.

Контактная сварка характеризуется большой скоростью нагрева. Для этого часто требуются сварочные машины большой электрической мощности (в отдельных случаях более 1000 *ква*). Некоторые современные машины обладают также значительной механической мощностью. Например, машина для стыковой сварки ленты из нержавеющей стали шириной до 1500 *мм* и толщиной до 4 *мм* развивает в каждом зажиме усилие до 500 *т* и сжимает торцы нагретых листов к концу сварки силой до 150 *т*. Создание современных машин для контактной сварки и широкое ее применение в СССР стало возможным только после коренной реконструкции энергетического хозяйства и создания мощной базы электромашиностроения на основе успешной индустриализации страны.

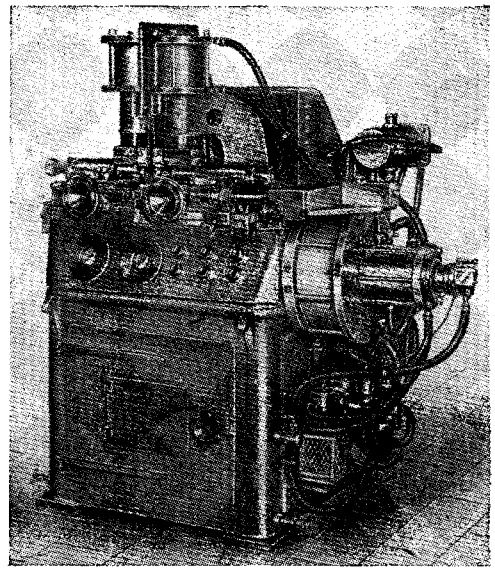
Машина для контактной сварки обычно состоит из трех основных частей: сварочного трансформатора, понижающего напряжение сети до нескольких вольт, достаточных для создания в сварочной цепи машины с очень малым сопротивлением большого тока (иногда более 100 000 *а*) с элементами, подводящими ток от трансформатора к свариваемым деталям; механической части, предназначенной для закрепления, сжатия и перемещения свариваемых деталей, и аппаратуры управления, сложной в современных автоматических машинах. Первые простейшие машины для контактной сварки были выпущены в СССР заводом «Электрик» в 1928 г. К началу Отечественной войны уже выпускались машины всех основных типов мощностью до 600 *ква*. Их производство продолжалось и в годы войны.

Разработка более совершенных машин особенно ускорилась после войны. Электропромышленностью (заводом «Электрик», ВНИИЭСО) освоен выпуск автоматических одно- и многоточечных машин и, в частности, специальных машин для сварки легких сплавов (фиг. 2) мощностью до 1000 *ква*, сварочных прессов мощностью до 600 *ква*, автоматических стыковых машин с электрическим и гидравлическим приводом (фиг. 3), роликовых машин с игнитронными прерывателями (фиг. 4). Вагоностроительные и автомобильные заводы (ЗИЛ, ГАЗ) создали ряд специализированных многоточечных машин (фиг. 5); институтом электросварки им. Е. О. Патона разработаны специальные установки для сварки встык труб большого диаметра на монтаже нефте- и газопроводов (фиг. 6); ЦНИИТМАШем разработаны мощные машины для сварки встык тонкой полосы (фиг. 7), выпущены трубосварочные станы; создан ряд машин для сварки арматуры железобетона, для сварки мелких деталей в приборостроении, вакуумной технике и многое другое. Организован институт электросварочного оборудования (ВНИИЭСО).

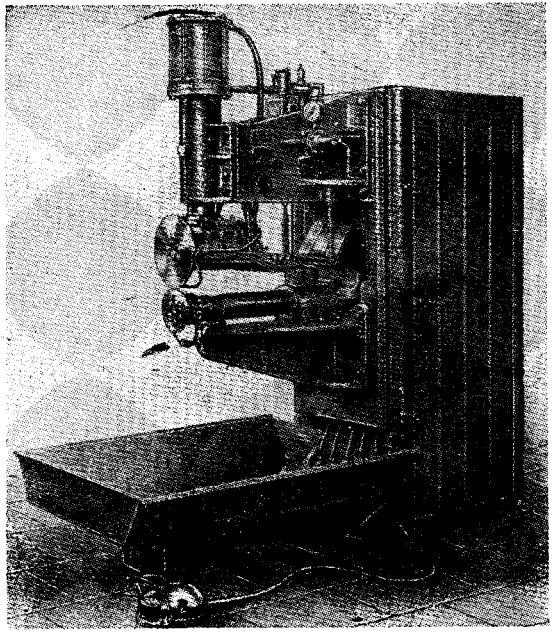
Оборудование совершенствовалось одновременно с технологией контактной сварки. За последнее время при точечной сварке широко применяются импульсные схемы питания, программное регу-



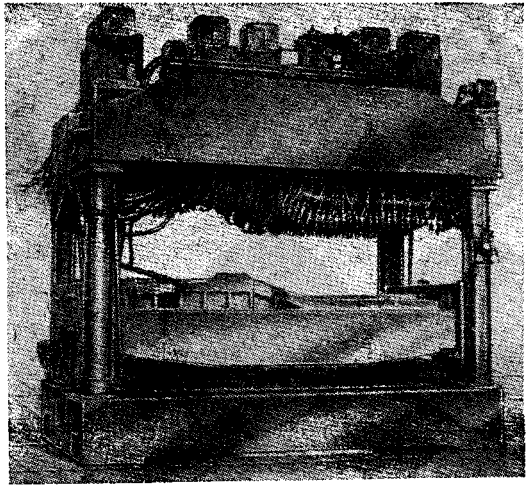
Фиг. 2. Точечная машина МТИП-1000 для сварки легких сплавов с питанием импульсом выпрямленного трехфазного тока (завод «Электрик» и ВНИИЭСО).



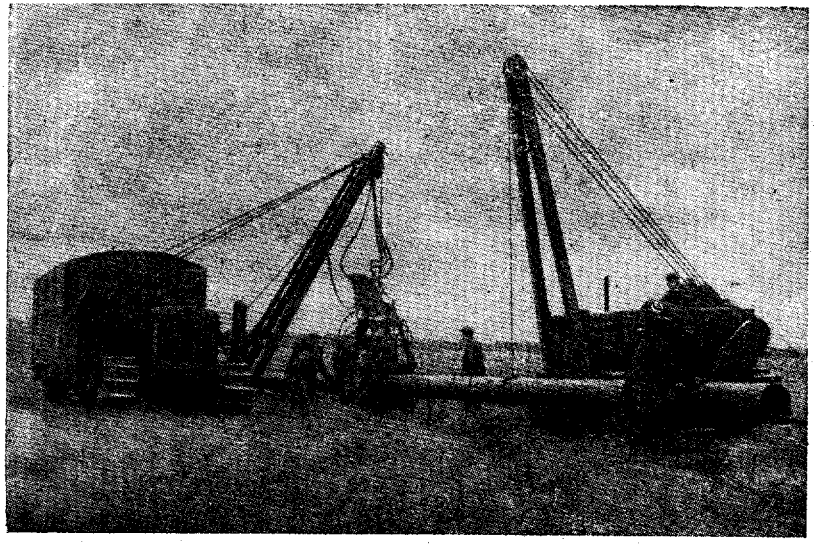
Фиг. 3. Автоматическая стыковая машина МСКН-150 для сварки деталей из цветных металлов (ВНИИЭСО).



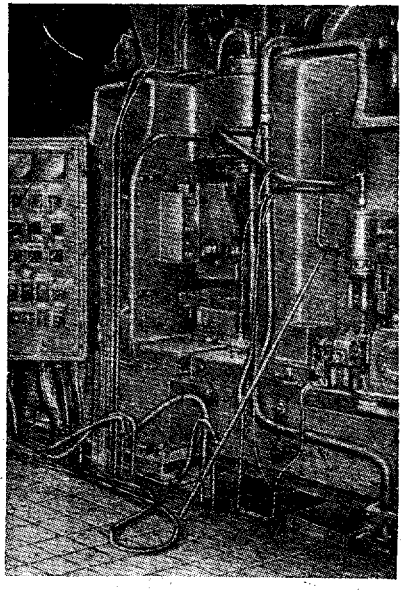
Фиг. 4. Современная машина для роликовой сварки типа МШП-150 (завод «Электрик»).



Фиг. 5. Многоточечная машина для сварки пола автомобиля «Волга» (ГАЗ).



Фиг. 6. Установка для стыковой сварки на монтаже магистральных трубопроводов (Институт электросварки им. Е. О. Патона).



Фиг. 7. Машина типа 1700 для сварки встык полосы шириной до 1550 *мм* (б. ЦКБММ ЦНИИТМАШа и ЭЗТМ).

лирование процесса; при стыковой — контурные трансформаторы, газовая защита; при роликовой — шаговое перемещение свариваемых деталей; при роликостыковой сварке труб — токи повышенной и радиочастоты и др.

Проблемы контактной сварки исследуются рядом институтов, вузовских и заводских лабораторий. Проведенные за последние годы работы по теории сварочного контакта и нагрева при контактной сварке, исследования процессов точечной и роликовой сварки легированных сталей, жаропрочных и легких сплавов, исследования по сварке оплавлением и сопротивлением различных материалов позволили уточнить природу протекающих при контактной сварке процессов и наметить условия более эффективного ее применения.

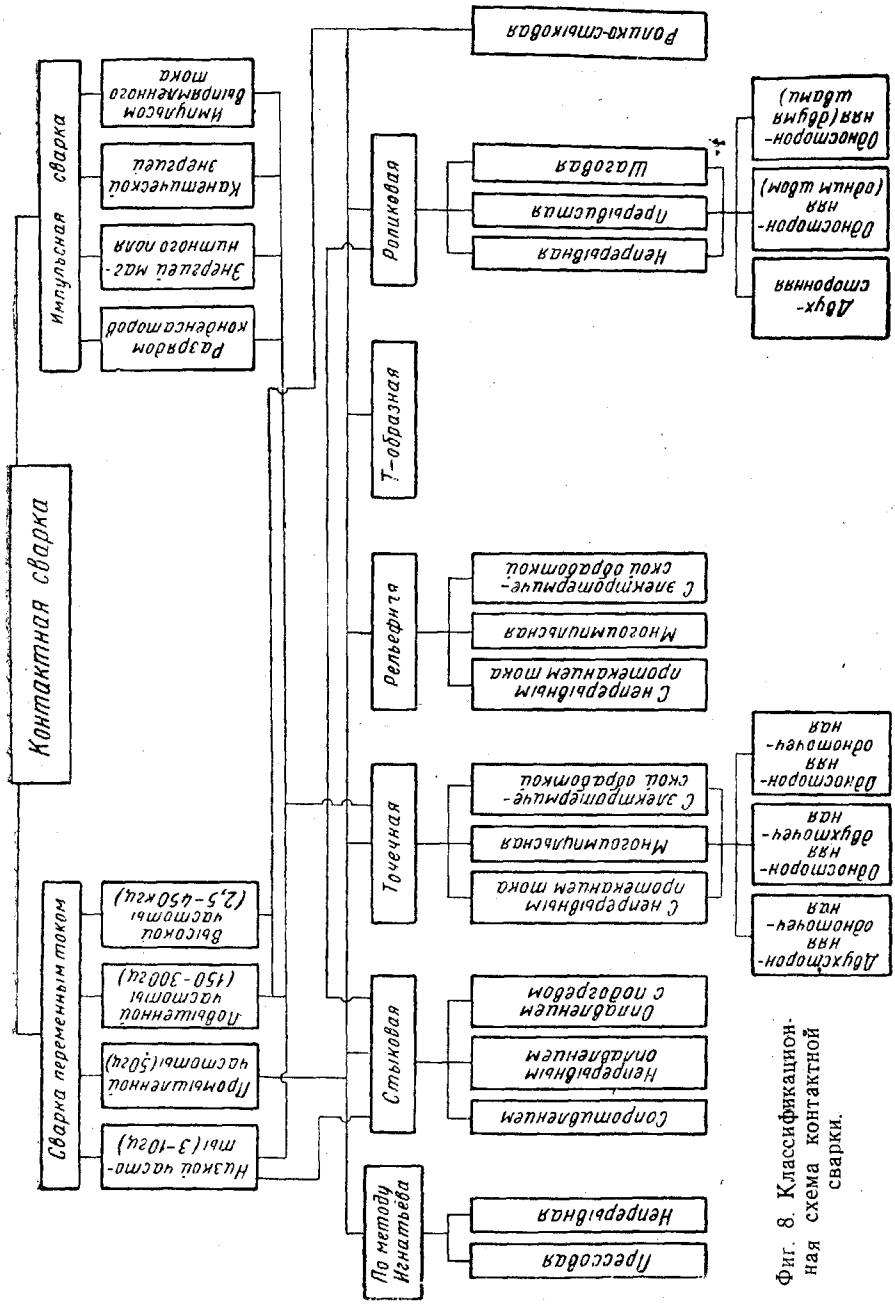
Народнохозяйственное значение контактной сварки очень велико. Оно определяется ее высокой производительностью и относительной легкостью механизации и автоматизации. Особенно широко применяется контактная сварка в массовом производстве. Например, в автомобиле точечная сварка заменила клепку в узлах кузова, кабины, рамы и др. Встык свариваются ободы колес, узлы шасси и др. Роликовая сварка применяется при изготовлении баков для горючего, узлов глушителя и др. Опыт контактной сварки в автомобилестроении успешно используется в сельскохозяйственном машиностроении.

Точечная сварка широко используется в производстве пассажирских вагонов (для приварки листовой обшивки к каркасу) и начинает применяться для той же цели в тепловозо-и электровозостроении, в производстве некоторых узлов товарных вагонов. Резко растет применение контактной сварки в самолетостроении (число сварных точек в некоторых современных самолетах превышает 250 000). Точечная и роликовая сварка обеспечивает минимальный вес конструкций их герметичность и обтекаемость.

Контактная сварка важна в производстве инструмента. Стыковая сварка его рабочей части из быстрорежущей стали с хвостовиком из поделочной значительно сокращает расход дорогой инструментальной стали.

Контактная сварка успешно применяется в производстве тонкостенных стальных труб. Высокая прочность шва и постоянство толщины стенки трубы способствуют эффективному использованию металла.

Большое значение имеют также сварка рельсовых стыков (уменьшается износ рельсов и подвижного состава, удешевляется эксплуатация пути); стыковая сварка магистральных трубопроводов и труб в паровых котлах; стыковая сварка полос, обеспечивающая непрерывность операций в цехах холодного проката; точечная и стыковая сварка арматуры железобетона; сварка в электровакуумном производстве. Быстрый рост промышленного произ-

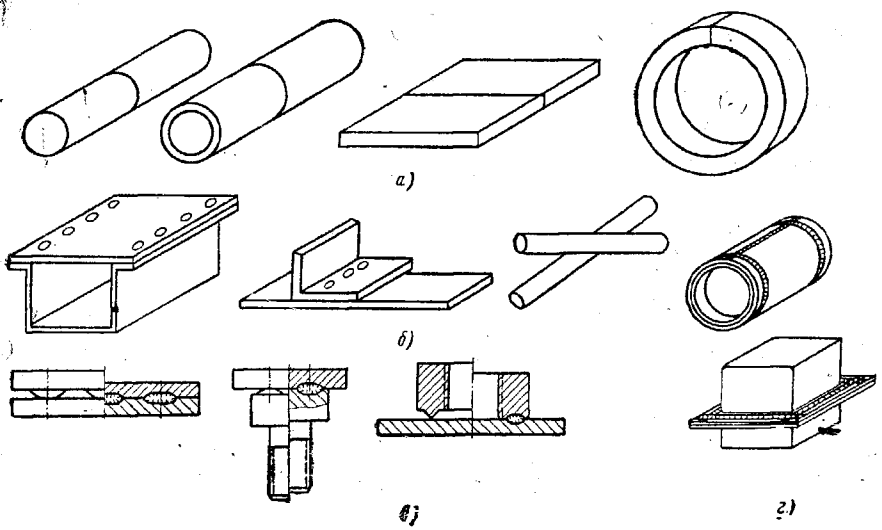


Фиг. 8. Классификационная схема контактной сварки.

водства и систематическое повышение его технического уровня, намеченные решениями XXI съезда КПСС, открывают широкие перспективы дальнейшего развития контактной сварки. За период семилетки (1959—1965 гг.) применение контактной сварки должно возрасти более чем в 2,5 раза при резком увеличении выпуска соответствующего оборудования, особенно высокопроизводительных специализированных машин.

§ 2. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Современные методы контактной сварки можно классифицировать (фиг. 8): а) по способу питания электроэнергией — сварка переменным током (в подавляющем большинстве случаев одно-

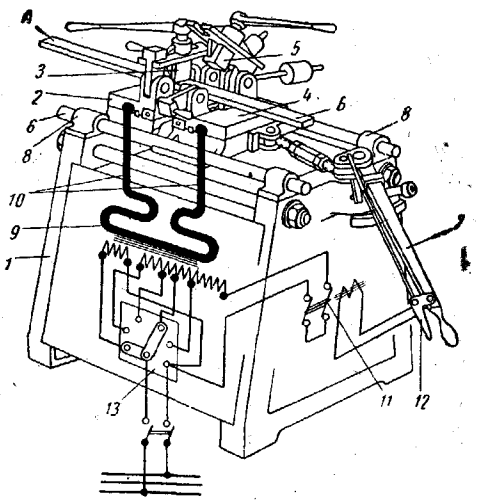


Фиг. 9. Основные типы соединений:
а — при стыковой сварке; *б* — при точечной сварке; *в* — при рельефной сварке (слева — до, справа — после сварки); *г* — при роликовой сварке.

фазным током промышленной частоты), импульсная сварка (импульс выпрямленного трехфазного тока непосредственно преобразуется в сварочном трансформаторе в несинусоидальный импульс сварочного тока или необходимая для сварки энергия относительно медленно накапливается в конденсаторах, электромагнитном поле специального трансформатора, в маховике генератора или в аккумуляторах, а затем используется в сварочной цепи в виде кратковременного импульса большой мощности); б) по форме свариваемого соединения, определяющей тип сварочной машины — стыковая, точечная, рельефная, роликовая и роликостыковая сварка; в) по технологическим признакам (например, стыковая сварка со-

противлением или оплавлением; непрерывная, прерывистая или шаговая роликовая сварка); г) по способу подвода тока к свариваемым деталям (например, односторонняя или двухсторонняя точечная сварка).

Стыковая сварка — вид контактной сварки, при котором соединяемые детали свариваются по всей плоскости их касания (фиг. 9, *а*). Свариваемые детали *А* и *Б* (фиг. 10) зажимаются в электродах стыковой машины. Простейшая стыковая машина с рычажным приводом состоит из станины *1*, на которой укреплена неподвижная плита *2* с левым зажимом *3*. Подвижная плита *4* с правым зажимом *5*, показанным в раскрытом виде, жестко связана с штангами *6*, перемещающимися рычажной системой *7* в направляющих *8*. Показанный схематически сварочный трансформатор *9* монтируется в станине. Его вторичная обмотка соединяется гибкими шинами *10* с зажимами. Ток включается контактором *11* при нажатии кнопки *12* на рукоятке рычага. Секционный переключатель *13*, изменяющий число включенных витков первичной обмотки трансформатора и, как следствие, напряжение в сварочной цепи машины, служит для регулирования мощности, развиваемой при сварке.



Фиг. 10. Схема стыковой машины с рычажным управлением.

Применяются два основных способа стыковой сварки — сопротивлением и оплавлением. При сварке сопротивлением концы деталей, плотно сжатых осевой силой, нагреваются током без расплавления. При этом они пластически деформируются и свариваются.

Наличие контактного сопротивления приводит к неравномерному нагреву деталей по длине; наивысшая температура достигается в стыке; она снижается к зажимам.

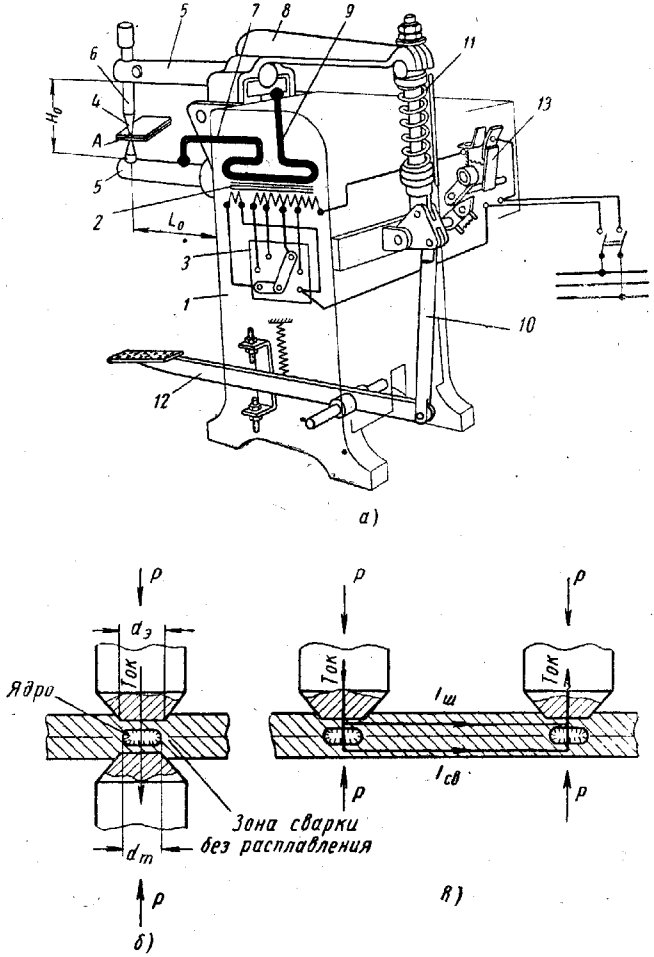
Сварка оплавлением деталей *А* и *Б* (см. фиг. 10) начинается с медленного их сближения до соприкосновения торцов при включенном сварочном трансформаторе, но без сдавливания их заметным усилием. В момент касания торцов между ними образуется контакт, электрическое сопротивление которого из-за

тсутствия сжимающих сил относительно велико. При протекании ерез такой контакт большого сварочного тока выделяется много епла, и окружающий его металл почти мгновенно плавится, обра- уя между торцами деталей жидкие перемычки. При дальнейшем агреве током перемычки взрываются. Это приводит к выбра- ыванию из зазора между торцами частиц металла в виде искр и екоторому укорочению деталей. При постепенном их сближении бразуются все новые контакты и перемычки, что приводит к ин- енсивному нагреву концов деталей. Частые взрывы перемычек со- дают впечатление непрерывного искрообразования, характерного ля сварки оплавлением. После образования на торцах тонкого лоя расплавленного металла и достаточного прогрева деталей по лине они сдавливаются осевой силой (осаживаются). При этом асплавленный металл вытесняется из зазора, а расположенный од ним чистый, хорошо разогретый металл пластически деформи- уется и сваривается. Стадия непрерывного искрообразования на- ывается оплавлением. Иногда процесс сварки оплавлением ус- ложняется.

Вводится предварительный подогрев деталей электрическим то- ом непосредственно в стыковой машине. Оплавлением с подогре- ом можно сваривать стальные детали большого сечения (до 5 000 *мм*^{2} и выше).

Точечная сварка — вид контактной сварки, при котором соединяемые детали свариваются на поверхности их касания в отдельных точках под электродами, см. фиг. 9, *б*). Простейшая точечная ма- ина с педальным приводом (фиг. 11, *а*) состоит из станины *1* с асположенным в ней сварочным трансформатором *2* и секционным ереключателем *3*. Электроды *4*, между которыми зажимают сва- иваемые детали *А*, укрепляются в хоботе *5* или электрододержате- е (свече) *6*. Нижний хобот крепится к станине через изоляцию и оединяется с трансформатором шиной *7*. Верхний хобот, закреп- енный в рычаге *8*, соединен с трансформатором шиной *9*. Рычаг *8* связан рычажной системой *10* через пружину *11*, регулирующую усилие сжатия деталей *А*, с рычагом педали *12*. При нажатии на едаль детали сжимаются и включателем *13* включается сварочный ток. По окончании сварки педаль отпускается, выключается ток и детали освобождаются.

Электроды делаются из меди или ее сплавов с высокой тепло- и лектропроводностью. Поэтому поверхность свариваемых деталей, соприкасающаяся с электродами, нагревается медленнее внутрен- их слоев металла. Процесс точечной сварки обычно продолжает- я до расплавления металла в центральной, наиболее нагретой зо- не. После ее охлаждения образуется местное соединение деталей в виде круглой сварной «точки». В ее сечении видно чечевицеобраз- ное ядро литого металла (фиг. 11, *б*), окруженное кольцом, в пре- елах которого произошла сварка в пластическом состоянии под



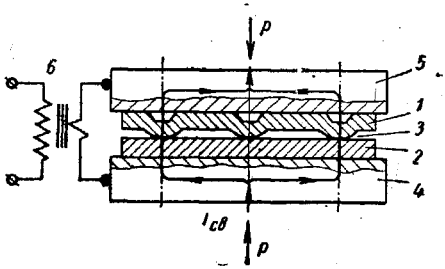
Фиг. 11. Схема точечной сварки:

а — точечная машина с педальным приводом; *б* — расположение электродов при двухсторонней сварке; *в* — то же при односторонней сварке.

действием сил P. Это кольцо, сжатое при нагреве, служит уплотнением, препятствующим вытеканию жидкого металла из ядра. Диаметр точки d_m, определяющий ее рабочее сечение, зависит от толщины свариваемых деталей и технологического процесса. Как правило, он близок к диаметру контактной поверхности электрода $d_э$ и составляет 0,5—20 *мм*. Соединение обычно состоит из нескольких точек. Точечная сварка успешно применяется для соединения пересекающихся стержней.

В зависимости от числа одновременно свариваемых точек различают одно, двух и многоточечную сварку. Применяется двухсторонняя (фиг. 11, *б*) и односторонняя сварка (фиг. 11, *в*).

В последнем случае нагрев осуществляется лишь частью тока $I_{cв}$ протекающего через контакт между деталями.



Фиг. 12. Схема рельефной сварки.

Рельефная сварка — вид контактной сварки, при котором детали соединяются по части поверхности их касания, ограниченной предварительно образованными выступами. Выступы (см. фиг. 9, *в*) могут штамповаться вхолодную (в листах), высаживаться (болты, гайки) или обрабатываться на станках (горловина).

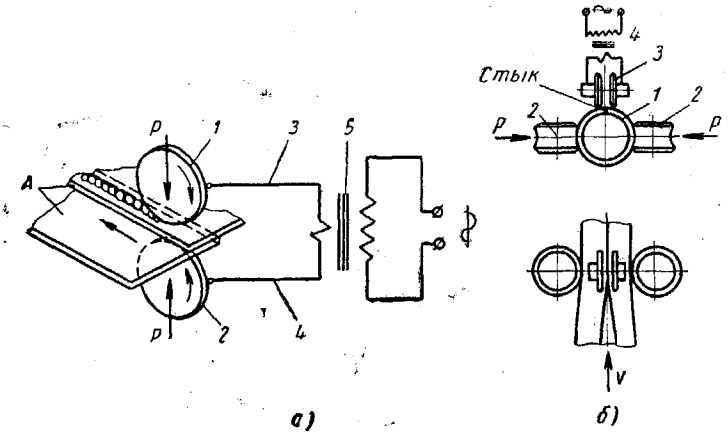
Свариваемые детали *1* и *2* (верхняя из них с выступами *3*) сжимаются усилием P (фиг. 12) между нижней (неподвижной) и верхней (подвижной) контактными плитами *4* и *5*, соединенными шинами со вторичным витком сварочного трансформатора *6*. До начала сварки детали плотно прилегают друг к другу в местах выступов. При включении тока детали здесь интенсивно нагреваются и свариваются с расплющиванием выступов. После сварки детали плотно прилегают друг к другу по всей поверхности. Рельефная сварка широко применяемая в автомобильной промышленности, по своей сущности близка к точечной. Она производится на мощных точечных машинах или специальных сварочных прессах.

Роликовая (или шовная) сварка — вид контактной сварки, при котором между свариваемыми деталями образуется непрерывный шов (см. фиг. 9, г) путем постановки последовательного ряда частично перекрывающих друг друга сварных точек. При роликовой сварке возможно получение плотных швов, не проницаемых для жидкостей и газов.

Обычно при роликовой сварке детали A перемещаются между дисковыми электродами *1* и *2* (фиг. 13, *а*), один из которых (а иногда и оба) вращается электроприводом. Необходимое для сварки усилие P создается моторно-кулачковым или пневматиче-

ским механизмом. Оси электродов вращаются в подшипниках, соединенных гибкими шинами *3* и *4* с трансформатором *5*. Подшипники поддерживают электроды и подводят к ним ток.

Непрерывная роликовая сварка производится при непрерывном перемещении свариваемых деталей и непрерывно протекающем сварочном токе. Ее применение ограничено



Фиг. 13. Схема роликовой (*а*) и роликостыковой сварки (*б*).

сильным перегревом поверхности деталей, соприкасающейся с электродами, что ухудшает качество сварки и вызывает быстрый износ электродов. Наиболее распространена прерывистая роликовая сварка, при которой детали перемещаются непрерывно, а ток включается специальным прерывателем импульсами (обычно короче 0,25 сек.), чередующимися с такими же или более длительными паузами.

Шаговая сварка, при которой прерывистое перемещение деталей чередуется с импульсами тока (включаемого при неподвижных деталях), дает наилучшие результаты.

Роликостыковая сварка — разновидность роликовой сварки, при которой непрерывный шов образуется между кромками листов, соединяемых встык. Она применяется в основном в производстве труб (фиг. 13, *б*). Заготовка трубы *1*, сформованная в специальной машине, зажимается между роликами *2*, сдавливающими усилием P кромки заготовки в месте стыка. Заготовка перемещается с большой скоростью $v_{св}$ под электродами *3*, соединенными со сварочным трансформатором *4*. При этом ее кромки нагреваются, пластически деформируются усилием P и свариваются, образуя непрерывный прочно-плотный шов.

ГЛАВА I

ПОВЕДЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

§ 1. СВАРИВАЕМОСТЬ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Контактная сварка производится с местным нагревом соединяемых деталей до температуры, лежащей ниже или выше точки плавления свариваемого материала. Первое имеет место при стыковой сварке сопротивлением; второе, как правило, при точечной и роликовой сварке, а также при стыковой сварке оплавлением. Как отмечалось выше, при сварке соединение осуществляется за счет действия сил междуатомного сцепления. Для проявления этих сил между двумя металлическими частями и сварки необходимо сблизить их на расстояние, соизмеримое с параметром кристаллической решетки; однако при этом нагрев необязателен. Например, детали из алюминия, меди и других высокопластичных металлов хорошо свариваются вхолодную. Так как даже на гладкой поверхности чистых деталей всегда имеются микронеровности и пленки окислов, при холодной сварке требуется значительная пластическая деформация в плоскости соединения. При такой деформации сминаются поверхностные слои и пленки окислов (если они хрупкие), растягиваясь, разрушаются. Обнажающиеся при этом участки чистого металла приходят в тесный контакт и свариваются. Менее пластичные материалы, например, сталь, вхолодную практически не свариваются, так как значительные упругие напряжения, возникающие при сжатии деталей, разрушают при снятии внешнего усилия образовавшиеся в отдельных точках элементарные сварные соединения.

Контактная сварка без расплавления отличается от холодной сварки главным образом тем, что при нагреве в результате увеличения подвижности атомов уменьшается необходимая для сварки степень пластической деформации, деформация горячего металла осуществляется при меньших удельных давлениях и устраняются затрудняющие сварку упругие силы. Сварка в пластическом состоянии особенно облегчается, а ее качество повышается, если в плоскости соединения образуются общие зерна (фиг. 14, *а*). Это возможно при рекристаллизации, когда размеры и форма кристаллитов изменяются без изменения кристаллической решетки, или при перекристаллизации, когда образование новых кристаллитов со-

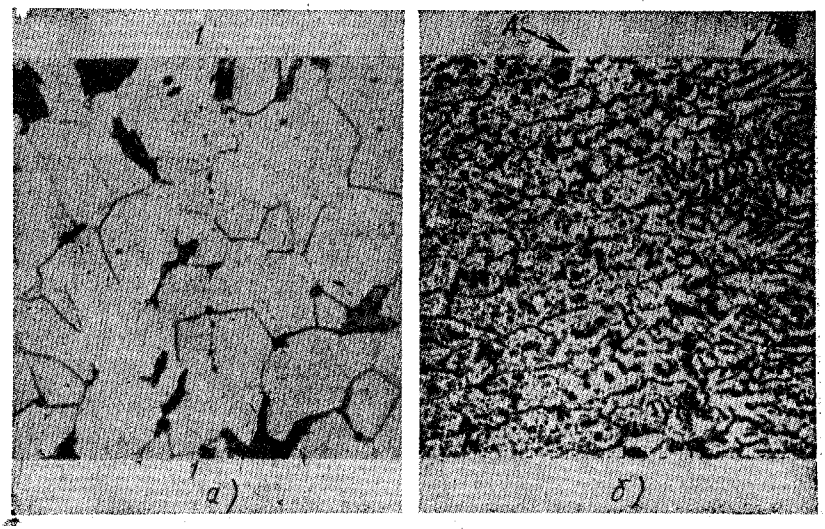
2 Зак. 490

Челябинский политехнический институт
БИБЛИОТЕКА
Инв. № 254276

43660 БИБЛИОТЕКА
Запорожского
машиностроительного

провождается изменением кристаллической решетки (например, при $\alpha \rightarrow \gamma$-превращении в стали).

Для каждого металла и сплава существует минимальная температура рекристаллизации, вблизи которой процесс идет очень медленно. При быстром нагреве во время контактной сварки низкотемпературные процессы рекристаллизации не имеют существенного значения. При достаточно высокой температуре (для стали



Фиг. 14. Особенности кристаллизации в зоне сварки:

а — общие зерна в плоскости стыка (*1—1*) при сварке стали без расплавления ×500 (видны отдельные неметаллические включения); *б* — переход равноосных кристаллитов основного металла *А* к столбчатым дендритам ядра *Б* сварной точки (дуралюмин ×120).

выше 950—1000°) начинается собирательная рекристаллизация (рост зерна), протекающая с большой скоростью, увеличивающейся с повышением температуры. Сварка без расплавления обычно производится при температуре интенсивного роста зерна, при котором она осуществляется с умеренной пластической деформацией.

При сварке с расплавлением жидкий металл (например, в ядре точки, см. фиг. 11, *а*) находится как бы в горячей изложнице из того же металла. При охлаждении кристаллизация металла в ядре начинается у ограничивающей его поверхности с образованием общих кристаллитов. У этой поверхности равноосные зерна основного металла переходят в столбчатые кристаллиты металла ядра (фиг. 14, *б*). Прочное соединение с общими зернами при сварке с расплавлением в принципе можно получить и без давления. Однако контактная сварка даже с расплавлением без давления невозможна. Роль давления сводится к следующему:

а) свариваемые детали сближаются до плотного соприкосновения и регулируется состояние образующееся между ними контакта, влияющее на интенсивность тепловыделения в зоне сварки (см. гл. II);

б) уплотняется металл, кристаллизующийся в замкнутом объеме с возможным образованием литейных пороков (рыхлости, усадочных раковин и др.);

в) удаляется из зоны сварки загрязненный и окисленный металл. Материалы, предназначенные для контактной сварки, должны быть достаточно пластичными. Металлы и сплавы, полученные прокаткой, протяжкой или прессованием, а также многие литые сплавы, как правило, отвечают этому требованию.

Однако не все материалы одинаково хорошо свариваются. Под свариваемостью будем понимать способность материала образовывать при рациональном технологическом процессе сварки прочное соединение без существенного снижения технических свойств свариваемого материала в самом соединении и в прилегающей к нему околошовной зоне.

Из этого технологического определения следует, что свариваемость не является неизменным свойством материала. С усовершенствованием технологии сварки плохо свариваемые материалы могут переходить в группу хорошо свариваемых.

Существенное влияние на технологическую свариваемость материала оказывают свойства, определяющие условия его нагрева током (электрическое сопротивление, теплопроводность), и пластической деформации в зоне сварки. Обычно с уменьшением тепло- и электропроводности, а также жаропрочности материала контактная сварка облегчается.

Технологическую свариваемость нельзя рассматривать в отрыве от самого технологического процесса. В настоящей главе разбираются только основные явления, сопутствующие контактной сварке и влияющие на поведение различных материалов при этом виде сварки. Особенности этих явлений при различных способах контактной сварки рассматриваются в последующих главах.

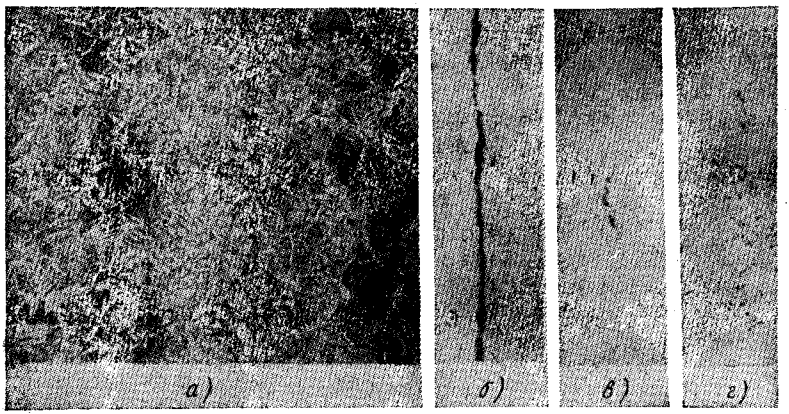
§ 2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ЗОНЕ СВАРКИ

Технические свойства (прочность, пластичность, коррозионная стойкость и др.) зоны сварки, определяющие на ряду со свойствами околошовной зоны качество сварного соединения, могут отличаться от соответствующих свойств свариваемого материала из-за изменений химического состава, макро- и микроструктуры. Эти изменения являются следствием термического цикла сварки, взаимодействия нагретого материала с окружающей средой и пластической деформации.

Контактная сварка обычно производится без присадочного металла. При точечной и роликовой сварке детали настолько плотно

сжимаются в месте их соединения, что материал в ядре практически не взаимодействует с окружающей атмосферой и его состав в результате переплава не изменяется.

При стыковой сварке металл, нагретый в месте соединения, не изолирован полностью от окружающей среды и изменение его состава возможно в результате:



Фиг. 15. Микроструктура стыка при сварке оплавлением:
а — обезуглероживание при сварке стали (×100); *б — г* — окислы в стыке (нетравленый шлиф, ×100).

а) испарения элементов с относительно низкой температурой кипения (например, цинка, кипящего при 907°, из латуни, плавящейся при 850—950°; магния, кипящего при 1107°, из алюминий-магниевых сплавов);

б) взаимодействия с кислородом и азотом воздуха (основное значение имеют процессы окисления, так как при относительно низкой температуре зоны сварки, характерной для контактной сварки, азот почти не диссоциирован и, находясь в молекулярном состоянии, химически мало активен);

в) удаления из зоны сварки при осадке относительно легкоплавкого расплава, богатого легирующими элементами и примесями, например, в случае стыковой сварки оплавлением стали в стыке понижается содержание серы и углерода (фиг. 15, *а*), удаляемых с расплавленным металлом.

Наибольшее практическое значение имеют процессы окисления. Окислы, остающиеся в стыке в виде сплошных плен и цепочек (фиг. 15, *б—г*), понижают механические свойства соединений. Продукты реакции окисления при температуре сварки могут находиться в газообразном, жидком или твердом состоянии. Твердые окислы представляют наибольшую опасность, так как их трудно уда-

лить из зоны сварки при ее пластической деформации во время осадки.

В результате окисления углерода в стали образуется нерастворимый в ней газ CO. Летучие окислы обычно не затрудняют сварку, а выделение окиси углерода, являющейся восстановителем железа, уменьшает окисление Fe. Наличие в стали элементов (Cr, Si), обладающих бо́льшим сродством к кислороду, чем углерод, подавляет реакцию образования CO, поэтому опасность окисления при сварке сталей, легированных этими элементами обычно увеличивается. Она увеличивается также при очень малом содержании в стали углерода (например, при стыковой сварке технического железа с 0,03% C).

Жидкие окислы относительно легко вытесняются из стыка при осадке. Поэтому при сварке оплавлением нелегированной стали, когда в результате окисления железа образуется его закись FeO, плавящаяся при температуре 1370°, которая почти на 150° ниже температуры плавления самой стали, вероятность появления в стыке неудаленных при осадке окислов относительно невелика.

Удаление из стыка твердых окислов, образовавшихся на нерасплавленном металле, практически невозможно. При сварке сопротивлением малоуглеродистой стали с обычным нагревом до 1200—1250° окислы железа находятся в твердом состоянии и остаются в стыке. Поэтому полная гарантия от окисления при сварке сопротивлением возможна только при применении специальной газовой защиты. Скорость окисления мало зависит от парциального давления кислорода (например, при уменьшении парциального давления кислорода в 250 раз окисление железа замедляется всего в 1,5—2 раза). Поэтому для эффективной защиты от окисления требуется среда, тщательно очищенная от кислорода, а также от влаги, диссоциирующей с образованием свободного кислорода.

Чем выше температура плавления окислов, тем больше вероятность их застревания в стыке и тем, как правило, труднее обеспечить отсутствие в соединении окислов. Тугоплавкий окисел Al_2O_3 образуется при сварке алюминия и его сплавов. Тугоплавкие окислы могут образовываться при сварке сталей, легированных хромом, алюминием и кремнием. Чистые окислы этих элементов плавятся при очень высокой температуре (Al_2O_3 — при 2050°; Cr_2O_3 — при 1890°; SiO_2 — при 1710°). Химический состав и температура плавления окислов, образующихся при сварке легированной стали, зависят от ее состава.

Образование окисной пленки толщиной в несколько атомных слоев идет мгновенно путем прямой адсорбции поверхностью металла ионов кислорода. В дальнейшем, как известно, механизм окисления стали сводится к тому, что положительные ионы железа или другого элемента, содержащегося в стали, с малым радиусом (ионный радиус железа 0,75Å) диффундируют через пленку окис-

ла и вблизи ее внешней поверхности соединяются с большими отрицательными ионами кислорода (ионный радиус 1,40 Å). Чем меньше ионный радиус элемента, тем легче он диффундирует через окисную пленку и тем относительно больше его содержание в окисле. Ионные радиусы хрома (0,65Å), алюминия (0,50Å) и кремния (0,41Å) значительно меньше, чем железа. Поэтому их относительное содержание в окислах на много больше, чем в стали. Например, при содержании в стали 13% хрома его содержание в окислах достигает 56%; достаточно 6% Al в стали, чтобы образующаяся на ней окалина содержала 53% Al и представляла собой практически чистую двуокись алюминия Al_2O_3.

Процесс окисления в основном диффузионный. Однако при температуре сварки он протекает настолько интенсивно, что даже в условиях быстрого нагрева, характерного для контактной сварки, окисление имеет практическое значение.

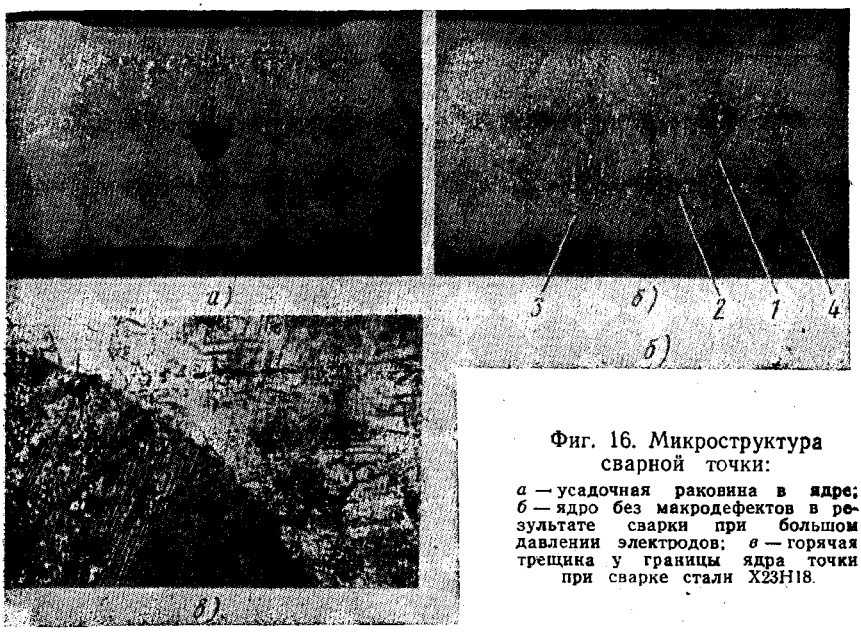
Структура зоны сварки определяется условиями ее нагрева и пластической деформации.

Рассмотрим три важнейших случая: а) сварка с расплавлением металла в замкнутом объеме (точечная, роликовая сварка, см. фиг. 11, *б*); б) сварка с расплавлением металла в незамкнутом объеме (стыковая сварка оплавлением); в) сварка без расплавления (стыковая сварка сопротивлением).

При сварке с расплавлением в замкнутом объеме образуется ядро литого металла с характерной столбчатой структурой. Иногда в центре ядра имеется зона равноосных зерен. Несвободная усадка часто приводит к образованию в ядре усадочной рыхлости и раковин (фиг. 16, *а*). Давление электродов, если оно достаточно велико, вызывает пластическую деформацию в кристаллизующемся ядре и уплотняет его (фиг. 16, *б*).

Большие усадочные напряжения при кристаллизации в замкнутом объеме иногда вызывают горячие трещины. Как правило, однофазные сплавы и сплавы с большим температурным интервалом кристаллизации обладают повышенной склонностью к горячим трещинам. Например, чисто аустенитные стали часто дают горячие трещины при точечной сварке (фиг. 16, *в*) так же, как при дуговой. Повышенное содержание углерода и серы в стали, расширяющее интервал кристаллизации, способствует образованию горячих трещин. Обжатие металла в ядре при кристаллизации уменьшает растягивающие усадочные напряжения и может предупредить появление трещин.

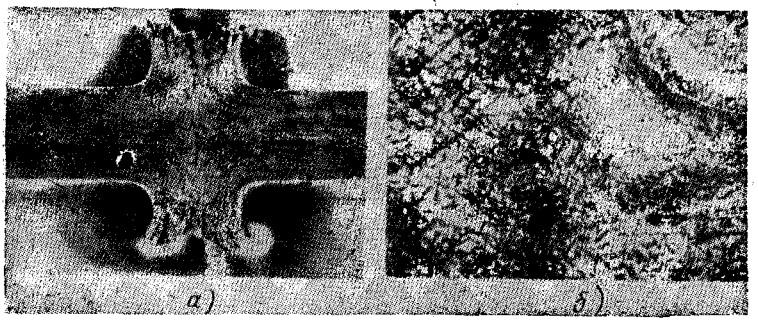
При сварке с расплавлением в незамкнутом объеме в макроструктуре стыка литой металл обычно не обнаруживается. Однако объемное расположение мелких окислов, иногда наблюдаемое при сварке оплавлением (см. фиг. 15, *г*), указывает на неполное удаление из стыка расплавленного (окисленного) металла. Значительная пластическая деформация при осадке обычно предупреждает



Фиг. 16. Микроструктура сварной точки:

а — усадочная раковина в ядре; *б* — ядро без макродефектов в результате сварки при большом давлении электродов; *в* — горячая трещина у границы ядра точки при сварке стали Х23Н18.

образование литейных пороков в стыке. При этом пластическая деформация вызывает заметное искривление волокон (фиг. 17), в результате чего в стыке материал иногда работает не вдоль, а по-



Фиг. 17. Искривление волокон при стыковой сварке:
а — алюминиевого сплава (×2); *б* — стали (×100).

перек волокон. Это может понижать механические свойства сварного соединения и в первую очередь его пластичность.

При сварке без расплавления структура в зоне стыка зависит от температуры нагрева и степени пластической деформации. При быстром нагреве ниже температуры заметного роста зерна (для стали около 1100°) и отсутствии окислов структура стыка может мало отличаться от структуры околостыковой зоны. Окислы в стыке резко снижают его прочность и особенно пластичность.

§ 3. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ

Изменение свойств материала в околошовной зоне происходит в результате термического цикла сварки и сопровождающей ее пластической деформации. Контактная сварка характеризуется двумя особенностями тепловых процессов: высокими скоростями нагрева и охлаждения (в отдельных случаях при точечной сварке тонких листов нагрев до расплавления продолжается 0,01—0,02 сек. и идет со скоростью более 100 000°С/сек) и непосредственным выделением тепла внутри нагреваемого объема.

В то время, как бездиффузионные процессы (например, $\alpha \rightarrow \gamma$-превращение железа) завершаются при неизменной температуре вне зависимости от скорости нагрева, с ускорением термического цикла температура развития диффузионных процессов (отпуска, рекристаллизации, роста зерна и др.) повышается, а степень их полноты уменьшается.

Высказывалось предположение, что нагрев током может ускорять некоторые диффузионные процессы. По этой гипотезе карбиды в стали, обладающие высоким электрическим сопротивлением, омываются током, плотность которого у их поверхности растет. Это может вызвать местное повышение температуры, ускоряющее растворение карбидов.

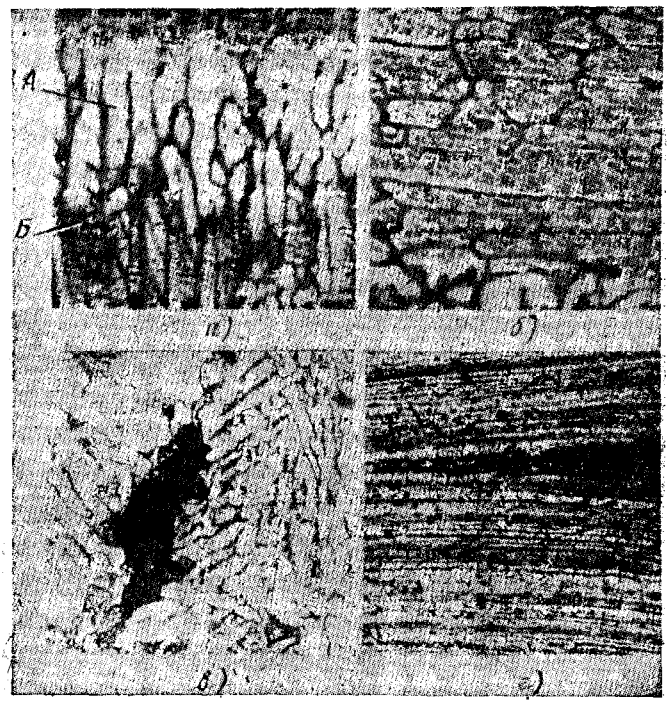
При сварке без расплавления в околошовной зоне состав материала не изменяется. При сварке с расплавлением в этой зоне наряду с изменением структуры возможно и изменение состава. Изменение состава вызывается явлением ликвации, из-за которого при кристаллизации сплава в зоне частичного расплавления он обогащается основным элементом.

На фиг. 18, *а* видно обезуглероживание стали 30ХГСА в зоне *А* на границе расплавленного ядра точки и обогащение углеродом зоны *Б* в ядре. Это может приводить к некоторому разупрочнению околошовной зоны.

Рассмотрим процессы, изменяющие структуру околошовной зоны. При сварке с расплавлением сплавов, кристаллизующихся в некотором интервале температур, всегда имеется зона частичного расплавления. При очень быстром нагреве оплавляются границы зерен без заметного роста зерна (например, при точечной сварке дуралюмина, фиг. 18, *б*). При замедленном нагреве (стыковая сварка стали) в зоне частичного расплавления возможен значительный рост зерна, иногда сопровождаемый усадочной рыхлостью

(фиг. 18, *в*). Чем медленнее нагрев и больше температурный интервал кристаллизации, тем шире зона частичного расплавления и тем вероятнее появление в ней местных пороков.

Строчечная структура, при которой «строчки», обогащенные легирующими элементами, плавятся при более низкой темпера-



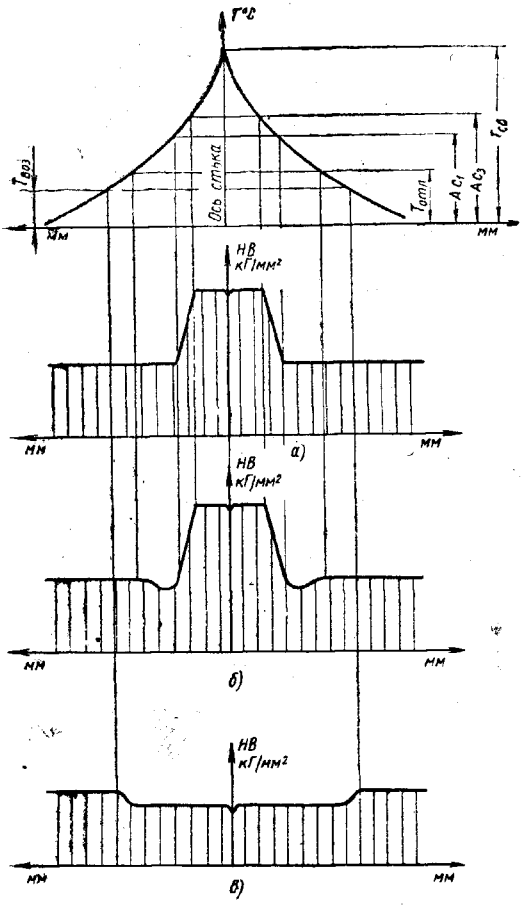
Фиг. 18. Особенности микроструктуры в зоне частичного расплавления:

а — обезуглероживание на границе ядра (сталь 30ХГСА, ×500); *б* — оплавление границы зерна в дуралюмине (×300); *в* — усадочная раковина в малоуглеродистой стали (×1000); *г* — расслоение сплава АМг6Т (×300).

туре, чем основной сплав, может приводить к расслоению материала (фиг. 18, *г*) при осадке (во время стыковой сварки).

Изменения структуры и свойств свариваемого материала в менее нагретых участках околошовной зоны зависят от его состава и предшествующей термической и механической обработки. При контактной сварке, как правило, велика скорость охлаждения. Поэтому материалы, претерпевающие при нагреве до температуры сварки фазовые превращения (например, перекристаллизацию в перлитной стали, растворение упрочняющих фаз в алюминиевых спла-

вах и др.), закаливаются. При сварке закаливающейся стали это может приводить к высокой твердости (фиг. 19, *а*) и хрупкости; при сварке термически упрочненных алюминиевых сплавов, а также незакаливающейся холоднокатаной стали, наоборот, к умягчению и разупрочнению этой зоны (фиг. 19, *в*).



Фиг. 19. Распределение температуры и твердости в околошовной зоне:

а — при сварке отожженной закаливающейся стали (стали 30ХГСА); *б* — при сварке той же стали в закаленном и отпущенном состоянии: *в* — при сварке на закаливающейся холоднокатаной стали.

На участке, нагретом ниже температуры фазовых превращений в материале, не подвергавшемся предварительной термической или механической обработке (наклепу), изменений структуры и свойств не наблюдается. Нагрев материалов, термически обработанных при температуре T_1, в интервале температур выше T_1 и ниже T_2 (температура начала фазовых превращений) приводит к местному разупрочнению. Например, сталь, закаленная и отпущенная при 550°, дополнительно отпускается и несколько разупрочняется на участке, нагретом в интервале температур $550° - Ac_1$ (фиг. 19, *б*); наклепанный материал несколько разупрочняется на участке, нагретом выше температуры возврата.

Таким образом, разупрочнение свариваемого материала в околошовной зоне может явиться следствием изменения его состава; частичного расплавления и роста зерна; закалки, отпуска, возврата. При этом степень разупрочнения, связанная с диффузионными процессами, тем меньше, чем быстрее протекает нагрев.

Свойства соединений часто зависят от исходного состояния свариваемого материала. Например, при стыковой сварке труб из

хромомолибденованадиевой стали 12Х2МФБ, получившей при прокатке значительный наклеп и имевшей неоднородное зерно, рекристаллизация в околошовной зоне, сопровождаемая значительным ростом зерна, вызывала катастрофическое падение ударной вязкости (до 0,5—1 *кГм/см²*). Соединения этих же труб, сваренных после предварительной нормализации, устранившей наклеп и неоднородность микроструктуры, имели ударную вязкость около 15 *кГм/см²*.

§ 4. УГЛЕРОДИСТЫЕ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Малоуглеродистая сталь с 0,08—0,16% С легко сваривается всеми видами контактной сварки вследствие: а) относительно высокого электросопротивления (в 8—10 раз превышающего сопротивление меди); б) пластичности в широком интервале температур (облегчается пластическая деформация); в) малой чувствительности к закалке (отсутствует охрупчивание в сварном соединении); г) узкого интервала кристаллизации (мала склонность к образованию горячих трещин); д) отсутствия элементов, дающих тугоплавкие окислы.

При сварке холоднокатаной стали возможно некоторое ее разупрочнение в околошовной зоне (см. фиг. 19, *в*), практически не устраняемое никаким способом. Для уменьшения степени разупрочнения холоднокатаная сталь должна свариваться с минимальной зоной разогрева, т. е. при кратковременном нагреве. Иногда при этом в околошовной зоне стали с обычной феррито-перлитовой структурой (фиг. 20, *а*) появляются участки с феррито-мартенситной структурой, обладающие пониженной пластичностью. При очень быстром нагреве до температуры, несколько превышающей верхнюю критическую точку стали (Ac_3), состав аустенита не успевает выровняться. Быстрое охлаждение богатых углеродом участков аустенита (в местах, где до нагрева был перлит) приводит к образованию здесь мартенсита (фиг. 20, *б*).

Сталь в околошовной зоне всегда нагревается на некотором участке выше температуры начала интенсивного роста зерна. Чем медленнее нагрев и охлаждение, тем шире этот участок и тем крупнее получаемое зерно. Конечный размер зерна зависит также от величины пластической деформации при сварке.

При большой скорости нагрева (150°/сек. и выше) температура окончания перекристаллизации стали повышается до температуры $\alpha \rightarrow \gamma$-превращения железа (910°), а температура начала интенсивного роста зерна растет на 150—200° по сравнению с этой температурой при медленном нагреве. Однако полностью избежать роста зерна в зоне, даже кратковременно нагретой выше 1150—1200°, нельзя. Обычно нагрев в течение более 3—4 сек. уже ведет к заметному росту зерна. В наибольшей степени рост зерна проявляется при относительно медленной стыковой сварке заготовок большого сечения. Рост зерна часто сопровождается видманштед-

товой структурой (фиг. 20, *в*), при которой избыточный феррит выделяется в остывающей стали не в виде сетки по границам зерен аустенита, а внутри этих зерен параллельными пластинками. Видманштедтова структура может понизить пластичность сварного соединения. Она легко устраняется термической обработкой с перекристаллизацией (нормализацией или отжигом).

Фиг. 20. Микроструктура малоуглеродистой стали в зоне контактной сварки:

а — феррито-перлитовая структура ненаклепанного основного металла, ×100; *б* — участки мартенсита, окруженные ферритом, ×375; *в* — видманштедтово строение, ×400.

При продолжительном нагреве стали до температуры, близкой к солидусу, возможен ее пережог. При этом оплавляются границы зерен аустенита и возможные здесь легкоплавкие примеси (эвтектики). В результате проникновения кислорода из воздуха по границам зерен образуются пленки окислов, нерастворимые при обычной термообработке и сообщающие стали хрупкость.

Влияние содержания углерода и легирующих элементов на условия контактной сварки сталей определяется следующим:

а) характером окислов, образующихся в зоне стыка (если к ней имеется доступ воздуха, например при стыковой сварке); увеличение содержания углерода уменьшает опасность окисления; Al,

Cr и Si могут затруднить сварку из-за образования тугоплавких окислов;

б) температурным интервалом кристаллизации; увеличение содержания С резко расширяет этот интервал (с 50° при 0,2% С до 200° при 1,25% С) и способствует появлению усадочных дефектов и горячих трещин; легирующие элементы в количествах, вводимых в низколегированные стали, мало влияют на эту характеристику;

в) сопротивлением пластической деформации; с увеличением содержания в стали углерода и легирующих элементов оно, как правило, растет; при этом различие в сопротивлении пластической деформации сохраняется до высоких температур (фиг. 21), поэтому для достижения необходимой пластической деформации при сварке углеродистых и низколегированных сталей требуется более высокое удельное давление (на 10—100%), чем при сварке таких же деталей из малоуглеродистой стали;

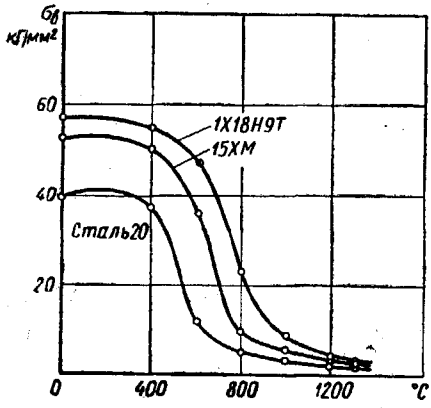
г) склонностью к закалке, углерод и все обычные легирующие элементы (за исключением кобальта) повышают устойчивость переохлажденного аустенита и, как следствие, уменьшают критическую скорость охлаждения, при которой сталь закаливается; поэтому с увеличением содержания в перлитной стали углерода и легирующих элементов увеличивается ее склонность к закалке;

д) электрическим сопротивлением; увеличение содержания в стали углерода и легирующих элементов повышает его, в результате чего растет интенсивность тепловыделения при протекании тока.

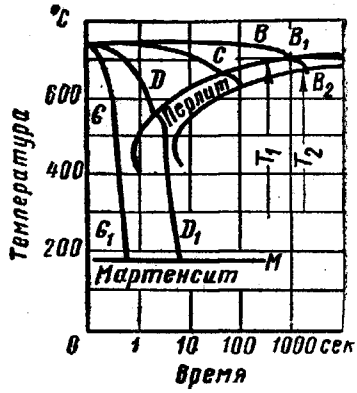
Значение этих факторов зависит от состава стали и от применяемого способа сварки. При всех видах контактной сварки конструкционных углеродистых и низколегированных сталей, обычно содержащих до 0,4% С, наибольшее воздействие на технологический процесс оказывает повышенная склонность стали к закалке. Однако эта склонность проявляется при сварке различно, в зависимости от термического цикла (в первую очередь скорости охлаждения). Например, сталь с 0,4% С и твердостью *НВ* 180 *кГ/мм²* после относительно медленного охлаждения при стыковой сварке оплавлением с подогревом может иметь в стыке твердость 220—240 *кГ/мм²*; твердость этой зоны после сварки оплавлением без подогрева достигнет 300—350 *кГ/мм²*, а при точечной сварке с быстрым нагревом и охлаждением ($t_{св} = 0{,}1$ сек.) — 450—550 *кГ/мм²*. В последнем случае для получения работоспособного соединения требуется последующая термическая обработка, в то время как при сварке оплавлением она не обязательна.

Влияние скорости охлаждения на структуру стали можно приближенно оценить по С-образной диаграмме изотермического распада аустенита, определяемой составом стали. Например, при медленном охлаждении по кривой *В* легированной перлитной стали после стыковой сварки оплавлением с подогревом аустенит превратится в перлит (фиг. 22). Это превращение начнется вблизи точки

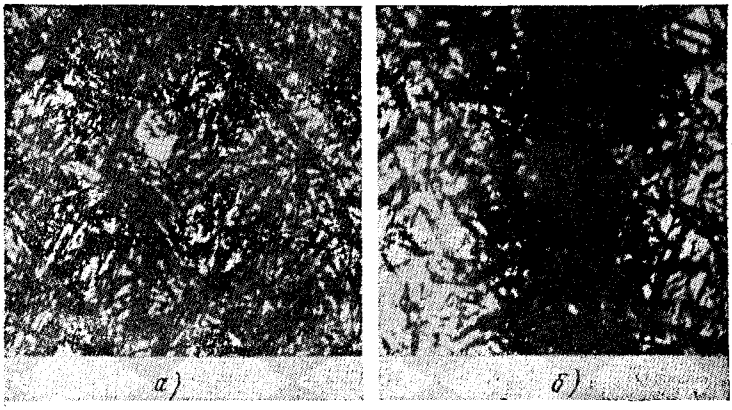
B_1 при T_1 и закончится в B_2 при T_2. В действительности превращение начнется несколько позднее, так как интервал времени, необходимый для начала изотермического распада аустенита при T_1, недостаточен при температуре, изменяющейся от T_1 до T_2. При несколь-



Фиг. 21. Зависимость предела прочности некоторых перлитных и аустенитных сталей от температуры.



Фиг. 22. С-образная диаграмма изотермического распада аустенита, совмещенная с кривыми охлаждения.



Фиг. 23. Микроструктура зоны сварки легированной перлитной стали при быстром охлаждении:

а—в зоне стыка троосто-мартенсит, рядом — мартенсит, × 300; *б*—в зоне стыка троостит, рядом мартенсит (×300).

ко большей скорости охлаждения (по кривой *C*) возможно появление сорбитной или троститовой структуры. Наконец, при очень

быстром охлаждении той же стали по кривой G по достижении температуры M начнется мартенситное превращение — сталь полностью закалится. При охлаждении по промежуточной кривой D в точке D_1 начнется образование троостита; однако часть нераспавшегося аустенита в точке M превратится в мартенсит, и сталь получит структуру неполной закалки (фиг. 23, *а* и *б*). Иногда в зоне сварки наблюдается и нераспавшийся остаточный аустенит.

§ 5. АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ

Как известно, стали, сохраняющие при охлаждении на воздухе структуру аустенита, относятся к аустенитному классу. Они обладают многими ценными свойствами: высокой коррозионной стойкостью, прочностью в условиях длительной работы при высоких температурах (жаропрочностью) и, наконец, жаростойкостью, т. е. малой скоростью окисления при значительном нагреве.

Наиболее распространена хромоникелевая аустенитная сталь с содержанием 17—19% хрома и 8—10% никеля, иногда дополнительно легированная молибденом, кремнием, титаном, ниобием и другими элементами, повышающими ее коррозионную стойкость или жаропрочность. Применяются стали с большим содержанием хрома и никеля (25% Cr и 20% Ni) и еще более легированные.

В зависимости от состава аустенитная сталь при первичной кристаллизации из жидкого состояния получает чисто аустенитную структуру (например, сталь с 25% Cr и 20% Ni) или ее кристаллизация начинается с выделения δ-феррита (сталь с 18% Cr и 9% Ni). В первом случае сталь очень склонна к горячим трещинам (см. фиг. 16, *в*), что заметно проявляется в условиях несвободной усадки (точечная и роликовая сварка). Стали с небольшим количеством феррита (от 1—1,5%) значительно менее склонны к горячим трещинам.

На поведение некоторых аустенитных сталей при сварке существенно влияет их склонность к межкристаллитной коррозии, появляющаяся в результате нагрева до 500—800°. В равновесном состоянии в аустените хромоникелевой стали может раствориться около 0,02% C. Если закаленную сталь, в которой весь углерод растворен в аустените, нагреть до 500—800°, то избыток углерода (сверх 0,02%) выделяется из твердого раствора и образует карбиды хрома, обладающего большей карбидообразующей способностью, чем железо. При этой температуре карбиды хрома выделяются по границам зерен аустенита за счет атомов хрома, расположенных вблизи этих границ. Аустенит у границ зерен сильно обедняется хромом и теряет коррозионную стойкость. Под действием агрессивной среды сталь разрушается по границам зерен (межкристаллитная коррозия). Следует отметить, что аустенитная сталь, нагретая выше 800°, после охлаждения, несмотря на выделение карбидов хрома, не склонна к межкристаллитной коррозии. Это

объясняется диффузией хрома в стали при $T > 800°$ с достаточной скоростью для выравнивания его содержания внутри зерен. При этом выделение карбидов хрома не приводит к обеднению хромом границ зерна. Чем быстрее идет нагрев, тем выше температурный интервал опасного выпадения карбидов. При любой скорости нагрева сталь в околошовной зоне неизбежно нагревается до опасных температур. Однако при очень быстрых процессах (например, при точечной сварке с кратковременным нагревом) карбиды не успевают выпасть и сталь не приобретает чувствительности к межкристаллитной коррозии.

При более медленных процессах сталь может стать склонной к этому виду коррозии.

Для уменьшения опасности выпадения карбидов хрома снижают содержание в стали углерода или вводят в нее стабилизаторы (титан, ниобий) обладающие большей карбидообразующей способностью, чем хром. При нагреве в опасном интервале температур выделяющийся из твердого раствора избыточный углерод связывается Ti или Nb, а хром остается в аустените, обеспечивая его высокую коррозионную стойкость.

Поведение аустенитных сталей при контактной сварке и ее технологические режимы определяются следующими особенностями этих сталей:

а) их сопротивление пластической деформации при высоких температурах значительно больше сопротивления малоуглеродистой и низколегированной стали (см. фиг. 21), поэтому при контактной сварке аустенитных сталей требуются бо́льшие удельные давления, чем при сварке перлитных сталей;

б) они обладают высоким электрическим сопротивлением и малой теплопроводностью, поэтому их нагрев осуществляется меньшим током, чем при сварке таких же деталей из малоуглеродистой стали;

в) аустенитные стали часто используются в холоднокатаном состоянии; для уменьшения разупрочнения в околошовной зоне (см. фиг. 19, *в*) желательно их сваривать на «жестких» режимах («жесткие» режимы характеризуются быстрым нагревом, «мягкие» — относительно медленным), в особенности, если при длительном нагреве сталь приобретает склонность к межкристаллитной коррозии; однако сварка некоторых аустенитных сталей (например, стали, содержащей 25% Cr и 20% Ni), склонных к горячим трещинам, целесообразнее на «мягких» режимах; «мягкие» режимы иногда применяют также из-за высокой жаропрочной стали, затрудняющей ее пластическую деформацию при малой зоне разогрева, характерной для сварки на «жестких» режимах;

г) аустенитные стали дают тугоплавкие окисные пленки (в основном за счет хрома), затрудняющие получение качественного соединения при омывании свариваемых поверхностей воздухом (например, при стыковой сварке);

д) аустенитные стали обладают высоким коэффициентом теплового расширения (например, сталь, содержащая 18% Cr и 9% Ni, в интервале температур 20—1000° имеет $\alpha = 20 \cdot 10^{-6}$, а малоуглеродистая сталь имеет $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$), что позволяет ожидать больших сварочных деформаций; однако при контактной сварке этих сталей из-за низкой теплопроводности зона разогрева мала и деформации невелики.

Таким образом, сварку аустенитных сталей всегда целесообразно производить при высоких удельных давлениях как на «жестких», так и, реже, на «мягких» режимах.

§ 6. АЛЮМИНИЙ И ЛЕГКИЕ СПЛАВЫ

Чистый алюминий обладает высокой тепло- и электропроводностью (62% проводимости меди). Точечная и роликовая сварка чистого алюминия применяется редко, так как возможна только при очень больших токах и связана с быстрым износом электродов. При стыковой сварке алюминия и его сплавов особое значение имеет окисление нагреваемых поверхностей (образование пленки Al_2O_3). Стыковая сварка должна сопровождаться очень большой пластической деформацией в стыке, достаточной для разрушения окисных пленок.

В промышленности широко применяется контактная сварка (в особенности, точечная и роликовая) высокопрочных алюминиевых сплавов, упрочняемых наклепом (при холодной прокатке) или термообработкой (закалкой с последующим старением). К сплавам, упрочняемым наклепом, относится, например, сплав АМц (1—1,6% Mn, до 1% Fe и до 1% Si). Наклепанный сплав (АМцН) имеет предел прочности более 22 *кГ/мм*^{2}. Минимальный предел прочности отожженного сплава (АМцМ) 13 *кГ/мм*^{2}. При нагреве наклепанного сплава выше 250—300° он полностью разупрочняется.

В группе термически упрочняемых сплавов большее распространение, в частности, имеет дуралюмин. Дуралюмин Д16 содержит 3,6—4,7% Cu; 1,25—1,75% Mg и 0,3—0,9% Mn. Он легко корродирует и поэтому обычно покрывается тонким слоем чистого алюминия (плакируется). Отожженный дуралюмин Д16М имеет предел прочности 21 *кГ/мм*^{2}; термически упрочненный плакированный дуралюмин Д16Т — 42 *кГ/мм*^{2}. Упрочнение дуралюмина основано на ограниченной растворимости меди и магния в алюминии. При нагреве до достаточно высокой температуры медь и магний полностью растворяются в алюминии, образуя после закалки пересыщенный твердый раствор, обладающий высокой пластичностью. Последующее старение при комнатной температуре вызывает перегруппировку атомов растворенных элементов вокруг узлов кристаллической решетки. При этом однородный твердый раствор становится неоднородным и упрочняется. При нагреве упрочненного сплава из него выделяются избыточные фазы ($CuAl_2$, Al_3Mg_2,

$CuMgAl_2$ и др.), его прочность понижается. При 340—370° завершается выделение и коагуляция этих фаз — происходит полный отжиг сплава.

При нагреве дуралюмина выше 510—520° его зерна оплавляются с образованием по их границам легкоплавкой эвтектики. В результате этого явления (пережога) резко падает прочность и пластичность сплава.

Поведение алюминиевых сплавов при контактной сварке и ее режимы определяются следующими особенностями этих сплавов:

а) как наклепанные, так и термически упрочненные сплавы при нагреве в зоне сварки могут существенно разупрочняться, поэтому желательно их сваривать с минимальной зоной нагрева, используя «жесткие» режимы;

б) алюминиевые сплавы обладают высокой электропроводностью (25—55%-ная проводимость меди) и большой теплопроводностью, поэтому для их сварки требуются значительные токи (необходимо оборудование большой мощности);

в) высокопрочные алюминиевые сплавы, как правило, кристаллизуются в широком интервале температур (90—135° и более) и часто склонны к образованию горячих трещин, для борьбы с которыми приходится применять значительные усилия сжатия в процессе кристаллизации расплавленных зон свариваемых соединений;

г) алюминий и его сплавы имеют высокий коэффициент теплового расширения (почти вдвое больший, чем у малоуглеродистой стали), что способствует увеличению сварочных деформаций; применение «жестких» режимов сварки с минимальной зоной разогрева облегчает борьбу с деформациями.

Магниевые сплавы, подвергающиеся контактной сварке, обычно находятся в наклепанном состоянии. Применяются магниевомарганцовистые сплавы (МА1), в которых основная роль марганца сводится к повышению коррозионной стойкости сплава; магниевомарганцовистые сплавы с небольшим содержанием церия (МА8), измельчающего зерно и повышающего механические свойства, и сплавы магния с алюминием и цинком (МА2), упрочняющими твердый раствор. Магниевые сплавы менее тепло- и электропроводны, чем алюминиевые, что несколько облегчает их контактную сварку. Магниевые сплавы так же, как алюминиевые, целесообразно сваривать при относительно «жестких» режимах во избежание разупрочнения.

§ 7. МЕДЬ И ЕЕ СПЛАВЫ

Контактная сварка меди затруднена ее исключительно высокой тепло- и электропроводностью. Практически применяется только ее стыковая сварка сопротивлением, постепенно вытесняемая холодной сваркой.

При сварке меди оплавлением из-за быстрого отвода тепла не удается получить на торцах деталей слой расплавленного металла,

необходимый перед осадкой для качественной сварки. Точечная и роликовая сварка меди возможна только с применением тугоплавких электродов (из вольфрама или молибдена) или прокладок между свариваемыми деталями и электродами, обладающих более низкой, чем у меди, тепло- и электропроводностью. При этом медные детали в местах подвода тока перегреваются и расплавляются, что ведет к повреждению поверхности свариваемых деталей и к быстрому износу электродов.

Условия контактной сварки медных сплавов зависят от их состава и электропроводности. Отдельные элементы различно влияют на свойства сплавов, определяющие их поведение при сварке.

Цинк относительно слабо понижает электропроводность сплава (см. фиг. 134, *а*); вследствие низкой температуры кипения цинка (906° при атмосферном давлении и 419° в вакууме) во время сварки возможно его испарение.

Олово сильно понижает электропроводность; оно кипит при $T>2200°$ и поэтому не улетучивается при контактной сварке; олово придает сплавам жидкотекучесть и увеличивает температурный интервал кристаллизации.

Фосфор резко понижает электропроводность; он легко улетучивается при сварке и, действуя на рабочую поверхность медных электродов как раскислитель, вызывает местную сварку электродов с деталями; это портит поверхность изделия и увеличивает износ электродов.

Никель быстро понижает электропроводность медных сплавов, существенно облегчая их сварку.

Кремний очень сильно понижает электропроводность; он не летуч при температурах контактной сварки и не снижает пластичности сплава при высоких температурах.

Свинец, сурьма и висмут не образуют твердых растворов с медью; при нагреве сплава выше температуры плавления этих элементов между зернами сплава появляются жидкие прослойки, ведущие к повреждению материала при его пластической деформации во время контактной сварки.

Контактной сваркой чаще других медных сплавов приходится сваривать латунь и некоторые бронзы (кремнистую, фосфористую, бериллиевую и др.). Относительно хорошо свариваются латуни с содержанием 30—38% Zn, удельное сопротивление которых приблизительно вчетверо выше, чем у меди. Значительное уменьшение содержания Zn (до 10% в томпаках) вызывает необходимость применения машин очень большой мощности и повышает температуру плавления сплава, что ведет к интенсивному испарению цинка.

Оловянно-фосфористые, кремнистые и бериллиевые бронзы имеют удельное сопротивление, превышающее в 4—6 раз сопротивление меди, что облегчает их контактную сварку. Очень хорошо свариваются медно-никелевые сплавы.

§ 8. НИКЕЛЬ, ТИТАН И ИХ СПЛАВЫ

Чистый никель по своим физическим и электрическим свойствам близок к железу и легко поддается всем видам контактной сварки. Этому способствует относительно низкая химическая активность никеля и, в частности, меньшая, чем у железа, склонность к окислению.

Жаропрочные сплавы на никелевой основе (например, нихром ХН78Т, содержащий около 20% хрома; 0,15% титана и более 75% никеля) обладают очень высоким электрическим сопротивлением и малой теплопроводностью, поэтому при их контактной сварке требуется относительно небольшой ток. Вследствие высокой жаропрочности при сварке этих сплавов необходимы большие удельные давления. Во избежание значительного разупрочнения при сварке наклепаных сплавов и больших сварочных деформаций, связанных с высоким коэффициентом теплового расширения, обычно применяют «жесткие» режимы.

Контактная сварка титана дает вполне удовлетворительные результаты. Важнейшая особенность титана и его сплавов, влияющая на условия их сварки, связана с высокой химической активностью титана. Титан легко окисляется (теплота образования TiO_2 составляет 219 000 *кал/моль*, а FeO всего 129 000 *кал/моль*). Уже при 800° начинается энергичная реакция титана с азотом с образованием нитридов TiN. Титан активно растворяет водород. Поглощение газов приводит к ухудшению механических свойств титана (падению пластичности). Оно возможно при непосредственном взаимодействии горячего металла в зоне сварки с окружающим воздухом, в частности, при стыковой сварке оплавлением. Поэтому стыковую сварку титана и его сплавов желательно производить в среде нейтрального газа (аргона). По своим физическим и механическим свойствам, а также электропроводности титан близок к аустенитной стали. Он сваривается при умеренных токах и относительно большом давлении.

ГЛАВА II

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И НАГРЕВ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

§ 1. ЗАКОН ЛЕНЦА — ДЖОУЛЯ И УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

При контактной сварке, как указывалось выше, свариваемые детали нагреваются теплом, выделяемым электрическим током непосредственно в этих деталях и в переходных контактах между ними. При этом необходимо не только нагреть место соединения до температуры сварки, но и прогреть детали в достаточно широкой околошовной зоне для того, чтобы осуществить требуемую пластическую деформацию. Поэтому тепловое состояние свариваемых деталей, характеризуемое температурным полем (совокупностью температур во всех точках нагреваемого тела в определенный момент времени), оказывает очень большое влияние на процессы контактной сварки.

Температурное поле определяется одновременно протекающими процессами выделения тепла и его распространения (теплопередачей). При контактной сварке роль первого из них очень велика вследствие кратковременного нагрева.

Количество тепла (калорий), выделяемое на любом участке электрической цепи с активным сопротивлением $R = f(t)$ *ом* при токе $I = \varphi(t)$ *а* и длительности его протекания t сек., определяется по закону Ленца — Джоуля

$$Q = 0{,}24 \int_0^t R(t)\, I^2(t)\, dt. \qquad (1)$$

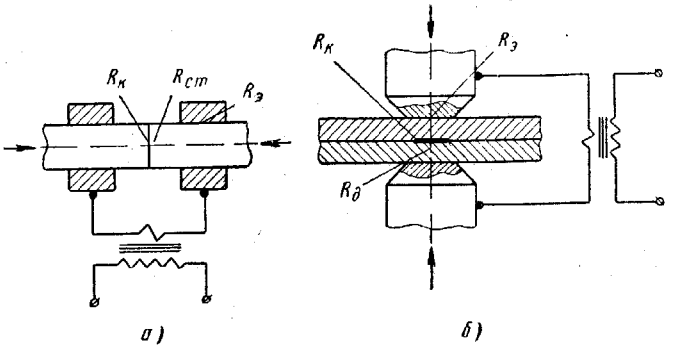
Интенсивность тепловыделения характеризуется мгновенной мощностью в *кал/сек*

$$q(t) = 0{,}24 R(t)\, I^2(t). \qquad (2)$$

Величина сопротивления R и его распределение в зоне сварки существенно влияют на условия нагрева и температурное поле.

При стыковой сварке (фиг. 24, *а*) тепло, полностью или частично используемое на полезный нагрев, выделяется в контакте меж-

ду торцами свариваемых стержней за счет контактного сопротивления $R_к$ и в самих стержнях с собственным сопротивлением $R_{ст}$. Контактным сопротивлением $R_э$ между электродами и свариваемыми стержнями можно пренебречь, так как оно относительно мало и



Фиг. 24. Распределение сопротивлений при стыковой (*а*) и точечной (*б*) сварке.

выделяемое на нем тепло практически не сказывается на нагреве зоны сварки. Для стыковой сварки формула (1) принимает вид

$$Q = 0{,}24 \int_0^t [R_к(t) + 2R_{ст}(t)]\, I^2(t)\, dt. \qquad (3)$$

При точечной сварке двух деталей (фиг. 24, *б*)

$$Q = 0{,}24 \int_0^t [R_к(t) + 2R_д(t) + 2R_э(t)]\, I^2(t)\, dt, \qquad (4)$$

где $R_д$ — сопротивление каждой из деталей.

Омическое сопротивление проводника сечением F *см*^{2} и длиной l *см* равно

$$R = \rho \frac{l}{F}, \qquad (5)$$

где ρ — удельное сопротивление в *ом · см*.

Собственное сопротивление свариваемых деталей пропорционально удельному сопротивлению, с увеличением которого обычно растет и контактное сопротивление; поэтому удельное сопротивление — важнейшая характеристика материала при контактной сварке. С его увеличением по закону Ленца — Джоуля уменьшается ток, необходимый для сварочного нагрева. Материалы с высоким удельным сопротивлением (табл. 1), в частности сталь, свариваются на машинах относительно малой мощности и, наоборот, для сварки материалов с низким сопротивлением (медные и алюминиевые сплавы) обычно требуются мощные машины.

Таблица 1

Удельное сопротивление и теплофизические свойства некоторых металлов и сплавов

Материал	Удельное сопротивление при 20° в *мк·ом·см*	Теплопроводность при 20° в *кал/см·сек·°С*	Теплоемкость при 20° в *кал/г·°С*	Температуропроводность при 20° в *см²/сек*	Удельный вес в *г/см³*	Температура плавления в °С	Температурный коэффициент β возрастания отношения $\frac{\rho}{c_\gamma}$ в 1/°С
Медь	1,75	0,86	0,09	1,05	8,9	1083	$2{,}8 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	2,8	0,49	0,21	0,73	2,71	658	$2{,}53 \cdot 10^{-3}$
Дуралюмин в упрочненном состоянии Д16Т (4,2% Cu; 1,5% Mg; 0,6% Mn)	5,8	0,28	0,20	0,50	2,8	650	—
Дуралюмин в отожженном состоянии Д16М .	3,5	0,41	0,20	0,73	2,8	650	—
Магниевый сплав МА8 (2% Mn; 0,3% Ce) . .	6,1	0,35	0,25	0,79	1,77	650	—
Латунь Л62	7,1	0,2	0,09	0,26	8,5	905	—
Фосфоритная бронза Бр.СФ 6,5-0,4	9,7	0,12	0,09	0,15	8,65	995	—
Малоуглеродистая сталь	15	0,12	0,11	0,15	7,85	1530	$3{,}8 \cdot 10^{-3}$
Аустенитная сталь 18% Cr — 9% Ni	70	0,044	0,11	0,05	7,86	1440	$0{,}28 \cdot 10^{-3}$
Аустенитная сталь 25% Cr — 20% Ni	87	0,033	0,11	0,038	7,9	1430	—
Сталь хромансиль 30ХГСА	22	0,09	0,115	0,10	7,85	1480	—
Нихром ХН78Т	98	0,04	0,067	0,042	8,5	1320	—
Титан технический . .	60	0,036	0,11	0,073	4,5	1725	—
Молибден	5,14	0,355	0,065	0,53	10,35	2622	—

Удельное сопротивление сплавов в основном определяется их составом. Оно особенно резко повышается при введении в сплав элементов, образующих твердые растворы. Например, сопротивление латуни Л62 в 4 раз выше, чем меди. Удельное сопротивление сплава зависит также от его структуры и степени наклепа. Например, сопротивление отожженного дуралюмина (Д16М) после закалки и старения повышается с $3{,}4 \cdot 10^{-6}$ *ом·см* до $5{,}2 \cdot 10^{-6}$ *ом·см* вследствие перехода меди и магния в твердый раствор. Удельное сопротивление наклепанного материала несколько выше, чем ненаклепанного.

Удельное сопротивление при сварке непостоянно. Оно растет с повышением температуры. Зависимость ρ от T имеет вид

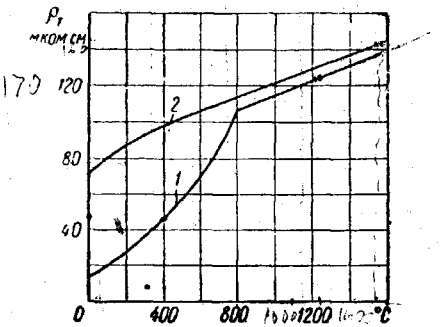
$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T), \quad (6)$$

где ρ_T — удельное сопротивление при $T°$;

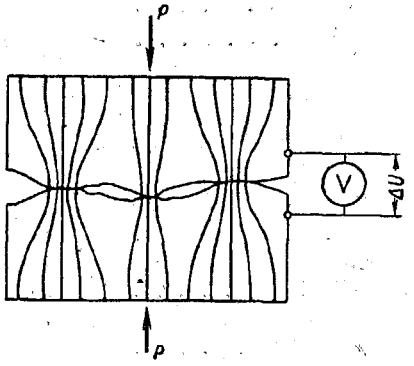
ρ_0 — то же при 0°;

α — температурный коэффициент сопротивления, приблизительно равный для чистых немагнитных металлов (медь, алюминий, титан) 0,004. Для стали он не постоянен.

Зависимость ρ_T от T для стали дана на фиг. 25. При комнатной температуре удельное сопротивление стали изменяется в широких



Фиг. 25. Зависимость удельного сопротивления от температуры:
1 — для малоуглеродистой стали;
2 — для аустенитной стали.



Фиг. 26. Схема образования электрического контакта.

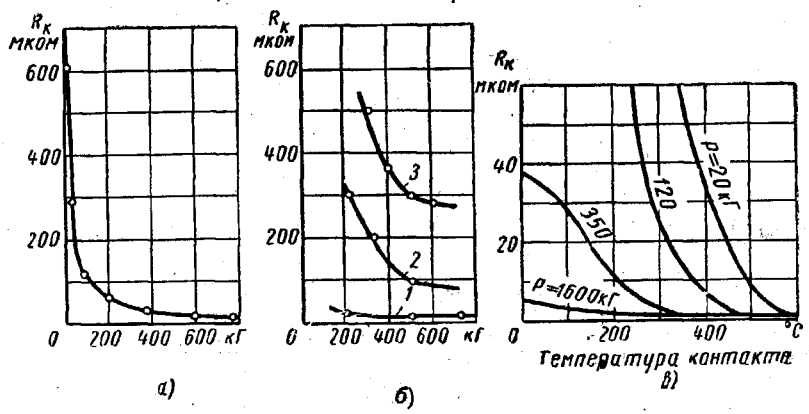
пределах в зависимости от ее состава. Например, сопротивление аустенитной стали при 20° в 5—6 раз выше, чем малоуглеродистой. Однако это различие почти исчезает при 850—900°, когда малоуглеродистая сталь приобретает аустенитную структуру. Поэтому удельное сопротивление стали при комнатной температуре количественно не определяет интенсивности тепловыделения при ее сварке.

§ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТА

Если через металлические детали, сжатые усилием P, пропустить электрический ток, то подключенный к ним вольтметр (фиг. 26) покажет падение напряжения $\Delta U = I R_к$ ($R_к$ — электрическое сопротивление контакта).

Прокатанные или механически обработанные детали имеют неровную поверхность. При сжатии они соприкасаются по отдельным небольшим контактным площадкам, через которые и устремляется

ток. Поверхность металлических деталей обычно покрыта пленкой окислов с большим удельным сопротивлением. Контактное сопротивление вызывается двумя основными причинами: резким уменьшением сечения проводника вблизи контакта, сопровождаемым сгущением линий тока, и наличием поверхностных пленок.



Фиг. 27. Зависимость контактного сопротивления:

а — от приложенного усилия для малоуглеродистой стали при 20°; *б* — от приложенного усилия, для дуралюмина: *1* — толщиной 1,5+1,5 *мм*, очищенного стальной щеткой; *2* и *3* — толщиной 1,5+1,5 и 0,5+0,5 *мм* травленого в ортофосфорной кислоте; *в* — от температуры для малоуглеродистой стали при сжатии контакта усилием *P*.

Влияние состояния поверхности деталей на их контактное сопротивление очень велико. Контактное сопротивление при 20° различно обработанных пластин из малоуглеродистой стали толщиной 3 *мм*, сжатых усилием 200 *кГ*, составляло в *мком*:

Травленых	300
Очищенных наждачным кругом и шлифованных	100
Обработанных резцом	1 200
Заржавленных или покрытых окалиной	80 000
Покрытых окалиной и ржавчиной . .	300 000

Контактное сопротивление чистых и покрытых окислами деталей уменьшается с ростом усилия P (фиг. 27, *а* и *б*), что объясняется увеличением площади истинного (физического) контакта между ними из-за смятия поверхности выступов. Экспериментально подтверждена следующая зависимость между контактным сопротивлением $R_к$ и усилием P:

$$R_к = \frac{r_к}{P^{\alpha_1}}, \qquad (7)$$

где $r_к$ — количественно соответствует контактному сопротивлению при $P = 1$ *кГ*;

α_1 — показатель степени, лежащий в пределах 0,5—1,0.

Величина $r_к$ зависит от свойств материала и состояния его поверхности; она обычно уменьшается с уменьшением твердости и увеличением электропроводности материала. Для хорошо очищенной шлифованной малоуглеродистой стали и алюминиевых сплавов $r_к$ соответственно изменяется в пределах 0,005—0,006 и 0,001—0,002. Показатель α_1 для стали равен 0,65—0,75 и для алюминиевых сплавов 0,75—0,85. Как следует из формулы (7), контактное сопротивление не зависит от общей площади контактирующих поверхностей.

Сопротивление между электродом и свариваемой деталью определяется зависимостью

$$R_э \leqslant 0{,}5(R_м + R_к), \tag{8}$$

где $R_м$ и $R_к$ — соответственные контактные сопротивления между двумя деталями из электродного материала и двумя деталями из свариваемого материала при тех же условиях.

При сварке стали электродами из меди или ее сплавов с высокой проводимостью величина $R_м$ мала, и

$$R_э \leqslant 0{,}5R_к. \tag{9}$$

Иногда сопротивление $R_э$ значительно меньше 0,5 $R_к$. Например, при травлении дуралюмина в ортофосфорной кислоте $R_э$ почти в 25 раз меньше $R_к$. Контактное сопротивление разнородных металлов существенно зависит от их твердости. Размеры физического контакта между электродом из мягкого материала и твердой деталью определяются механическими свойствами более мягкого материала. Поэтому сужение линий тока в твердой детали и ее сопротивление в контакте с мягким материалом будут меньше, чем в контакте с твердым.

Сопротивление контакта очень сильно изменяется при нагреве в результате роста удельного сопротивления слоя металла, прилегающего к контакту; снижения сопротивления окисной пленки и увеличения числа и площади физических контактов между деталями благодаря пластической деформации нагретого металла. В условиях контактной сварки два последних фактора имеют главное значение: с повышением температуры контактное сопротивление быстро падает и практически исчезает у стали при 600° (фиг. 27, *в*); у алюминиевых сплавов — при 350°.

Выше было рассмотрено сопротивление контакта твердых тел. При стыковой сварке оплавлением (см. введение) электрический контакт между нагреваемыми деталями осуществляется перемычками расплавленного металла. Его сопротивление определяется числом одновременно существующих перемычек и их поперечным сечением. Средние размеры перемычек растут с увеличением сечения свариваемых деталей и скорости оплавления (скорости взаимного сближения деталей при оплавлении). В процессе образования

и разрушения перемычки ее сопротивление изменяется от нескольких микроом практически до бесконечности.

Эффективное значение контактного сопротивления при сварке оплавлением стали (в *мком*) можно приближенно определить по эмпирической формуле

$$R_{опл} = \frac{9500k_1}{F^{\frac{2}{3}} v_{опл}^{\frac{1}{3}} j}, \qquad (10)$$

где F — сечение свариваемых деталей в $см^2$;
$v_{опл}$ — скорость оплавления в *см/сек*;
j — плотность тока в $а/мм^2$;
k_1 — коэффициент, учитывающий свойства стали (для углеродистых и низколегированных сталей $k_1 = 1$; для аустенитной стали $k_1 = 1{,}1$).

Эффективное сопротивление контакта при оплавлении относительно велико (обычно 100—1500 *мком* для стали).

§ 3. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

При стыковой сварке нагрев зоны соединения в соответствии с формулой (3) определяется контактным сопротивлением между торцами деталей и собственным сопротивлением их концов, выступающих из зажимов (см. фиг. 24, *а*). При сварке сопротивлением, когда торцы деталей все время сжаты достаточно большим усилием, контактное сопротивление относительно мало и быстро исчезает при нагреве. Среднее контактное сопротивление при сварке оплавлением в первом приближении можно считать постоянным.

Сопротивление выступающих концов деталей определяется по формуле (5). Оно минимально при холодных деталях и растет по мере их нагрева. В расчетах распределение температуры в деталях из стали к концу сварки можно приближенно принимать по ломаной линии *А* (фиг. 28, *а*); при сварке оплавлением с подогревом — по линии *Б*, а при сварке непрерывным оплавлением — по линии *В*. Типичные кривые истинного распределения температуры для этих случаев показаны на фиг. 28, *б*.

Переменный ток взаимодействует с создаваемым им магнитным полем и оттесняется к поверхности проводника (поверхностный эффект). Поэтому при переменном токе активное сопротивление проводника R_a увеличивается по сравнению с его сопротивлением при постоянном токе $R_{пост}$.

Коэффициент поверхностного эффекта $\left(m = \frac{R_a}{R_{пост}}\right)$ особенно велик в ферромагнитных материалах. При нагреве выше точки Кюри (768°) железо теряет ферромагнитные свойства; поэтому к концу сварки влияние поверхностного эффекта на сопротивление мало и им можно пренебречь.

Коэффициент m определяется по формулам:

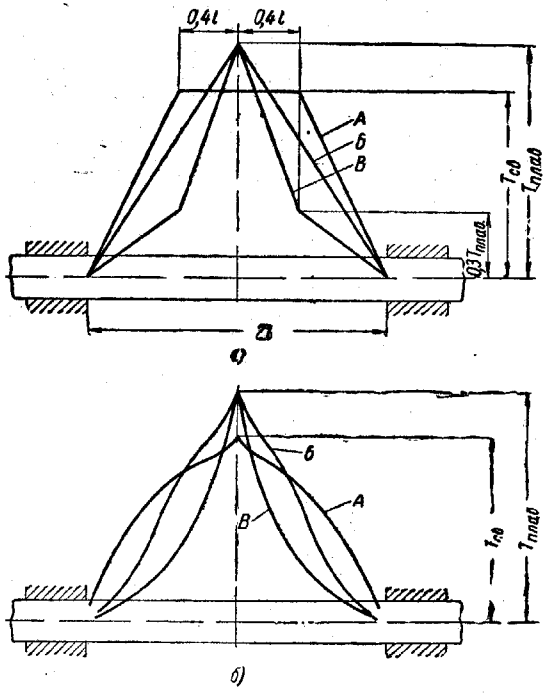
$$m = 1 + \frac{\varepsilon^4}{3} \quad \text{при } \varepsilon < 1$$

и (11)

$$m = \varepsilon + 0{,}25 + \frac{3}{64\,\varepsilon} \quad \text{при } \varepsilon > 1.$$

Здесь

$$\varepsilon = \frac{a_0}{2}\sqrt{\frac{1{,}256\pi f \mu}{\rho} \cdot 10^{-8}}, \qquad (12)$$

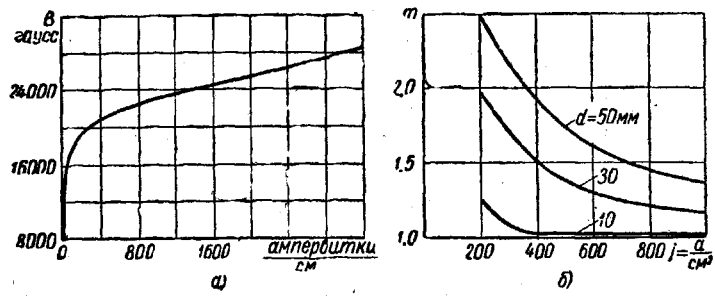


Фиг. 28. Схемы распределения температуры вдоль стальных деталей к концу стыковой сварки:
а — расчетные и *б* — действительные (l — установочная длина; $T_{плав}$ — температура плавления; $T_{св}$ — температура сварки в пластическом состоянии).

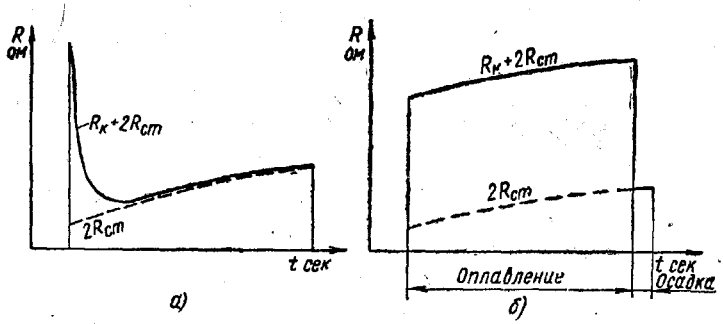
где a_0 — радиус круглого проводника в *см*;
f — частота переменного тока в *гц*;
μ — относительная магнитная проницаемость проводника;
ρ — удельное сопротивление проводника в *ом · см*.

Относительная проницаемость $\mu = \frac{B}{H}$ (B — индукция в *гс* и H — напряженность магнитного поля в *а/см*).

У поверхности круглого проводника при токе I a напряженность магнитного поля $H = \frac{0,2\ I}{a_0}$. Для заданных I и a_0 определяется соответствующее число ампер-витков на 1 *см*, равное $\frac{H}{0,4\ \pi}$, и по кривой намагничивания (на фиг. 29, *а* дана кривая для малоуглеродистой стали) определяется индукция B, а затем $\mu = \frac{B}{H}$.



Фиг. 29. Кривая намагничивания малоуглеродистой стали (*а*) и зависимость коэффициента поверхностного эффекта от плотности тока и диаметра стержней из малоуглеродистой стали (*б*).



Фиг. 30. Изменение сопротивления в процессе стыковой сварки: *а* — сопротивлением; *б* — оплавлением ($R_к$ — сопротивление контакта, $2R_{ст}$ — собственное сопротивление деталей).

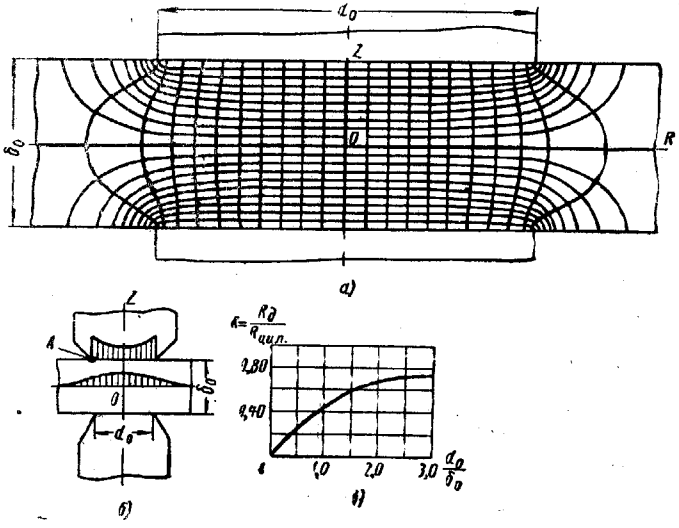
Поверхностный эффект увеличивается с увеличением диаметра проводника и с уменьшением в нем тока. При контактной сварке ток очень велик и, как следствие, велика напряженность поля H, в связи с чем значения μ относительно малы и влияние поверхностного эффекта начинает практически проявляться только в стержнях диаметром более 20—25 *мм* (фиг. 29, *б*).

В процессе сварки стальных стержней методом сопротивления сначала сопротивление быстро снижается из-за резкого уменьшения контактного сопротивления, затем снова растет вследствие увеличения собственного сопротивления нагретых деталей (фиг. 30, *а*). В процессе оплавления эффективное сопротивление относительно велико, а в момент осадки оно резко снижается из-за исчезновения контактного сопротивления (фиг. 30, *б*).

При сварке оплавлением собственное сопротивление деталей по сравнению с их контактным сопротивлением относительно мало, а при сварке сопротивлением велико. Однако общее сопротивление при оплавлении значительно выше, чем при сварке сопротивлением.

§ 4. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

Общее сопротивление в зоне точечной сварки складывается из контактных и собственных сопротивлений свариваемых деталей (см. § 2). Для определения собственного сопротивления каждой



Фиг. 31. Электрическое поле и сопротивление бесконечной пластинки с круглыми токоподводящими контактами:
а — электрическое поле; *б* — распределение плотности тока; *в*—зависимость отношения $A=\frac{R_д^0}{R_{цил}}$ от $\frac{d_0}{\delta_0}$.

свариваемой детали рассмотрим поле электрического тока в бесконечно протяженной пластинке толщиной δ_0, ток к которой подводится через два круглых контакта диаметром d_0 (фиг. 31, *а*). Линии тока совпадают с его направлением в любой точке поля, а их густота характеризует плотность тока. Плотность тока в плоско-

сти контактов растет от центра к периферии (фиг. 31, *б*). Теоретически на границе контакта в точке A она достигает бесконечности. В среднем сечении пластинки наибольшая плотность тока совпадает с осью OZ. Степень неравномерности тока зависит от геометрических параметров поля, характеризующихся отношением $\frac{d_0}{\delta_0}$. Чем оно больше, тем равномернее протекает ток в центральной зоне пластинки — в объеме столбика диаметром d_0.

Можно показать, что омическое сопротивление рассматриваемой пластинки при ее равномерном нагреве равно:

$$R_{\partial}^{0} = A\,\rho_T \frac{\delta_0}{\frac{\pi d_0^2}{4}} = AR_{цил}, \qquad (13)$$

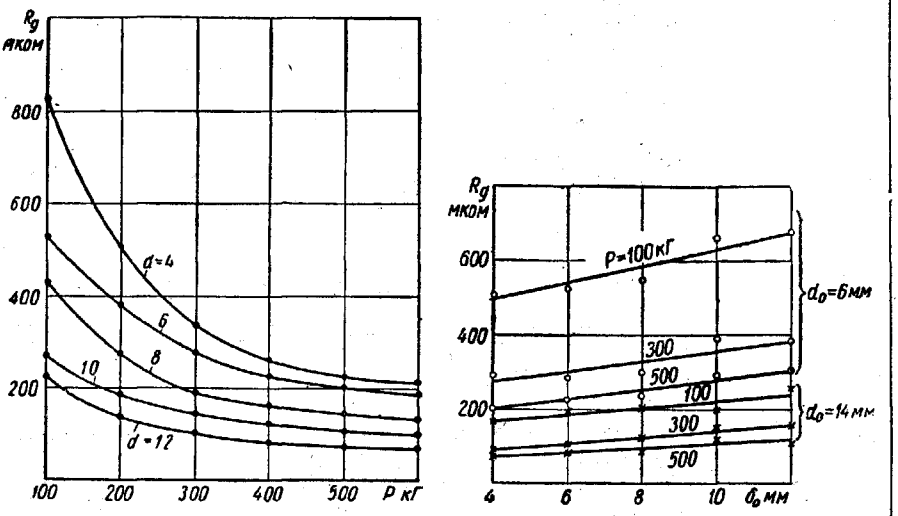
где ρ_T — удельное сопротивление материала пластинки в *ом·см* (при холодной пластинке оно равно ρ_0);

$R_{цил}$ — омическое сопротивление цилиндрического столбика длиной δ_0 и диаметром d_0.

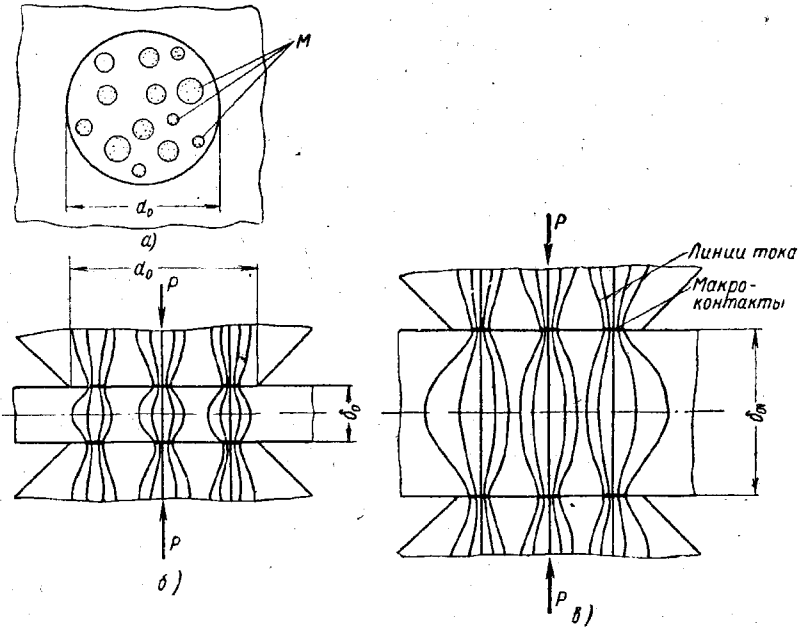
Сопротивление пластинки R_{∂}^{0} всегда меньше сопротивления $R_{цил}$ ($A<1$). Коэффициент A зависит от параметра $\frac{d_0}{\delta_0}$ (фиг. 31, *в*). Чем он меньше, тем меньше A. Легко показать, что при значениях $\frac{d_0}{\delta_0}<1{,}5$ из-за линейной зависимости $A = f(\frac{d_0}{\delta_0})$ сопротивление теоретически не зависит от δ_0. Действительно, если при малом d_0 увеличить в n раз δ_0, то $R'_{цил} = nR_{цил}$, а $A' = \frac{A}{n}$, и их произведение не изменится.

Рассмотрим собственное сопротивление холодных деталей в начале сварки. Измеренное сопротивление R_{∂} пластинки толщиной δ_0, зажатой между двумя электродами диаметром d_0, как правило, значительно больше расчетного сопротивления R_{∂}^{0}. Сопротивление R_{∂} существенно зависит от сжимающего контакт усилия P (фиг. 32, *а*), а также, как показали более точные измерения последнего времени, от фактического диаметра электродов (фиг. 32, *б*). Эти измерения выявили также, что R_{∂} всегда растет с увеличением толщины пластинки даже при малом отношении $\frac{d_0}{\delta_0}$.

Установленные экспериментально зависимости $R_{\partial} = f(P, d_0)$ удовлетворительно объясняются при допущении «ситового» характера контакта, при котором элементарные микроконтакты группируются на отдельных макроучастках M, разбросанных по всей площади, ограниченной диаметром d_0 (фиг. 33, *а*). При увеличении P увеличиваются размеры и количество макроконтактов, а при увеличении d_0 эти контакты распределяются по большей площади. При относительно малой толщине пластинки (фиг. 33, *б*) полное ее со-

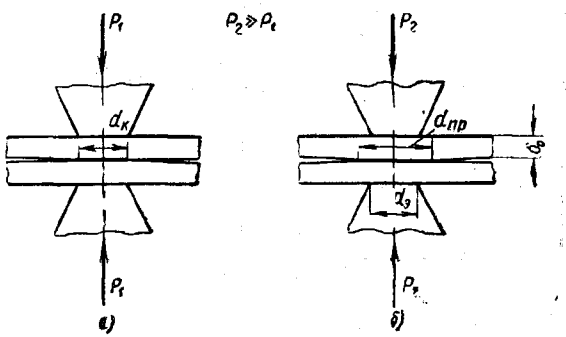


Фиг. 32. Зависимость сопротивления пластинки:
а — от усилия сжатия в контактах и их диаметра (сталь Ст. 3, δ_0 = 4 *мм*); верхняя кривая соответствует диаметру контакта d_0=4 *мм*; нижняя — 12 *мм*; *б* — от толщины пластинки при различных усилиях и диаметрах контакта.



Фиг. 33. Схема «ситового» контакта:
а — распределение макроконтактов; *б* — поле тока при малой толщине пластинки и *в* — то же при большей толщине.

противление $R_д = \frac{R_д'}{n}$, где $R_д'$ — сопротивление пластинки между одной парой макроконтактов, а n — число этих макроконтактов, создающих n параллельных цепей, практически независимых друг от друга (при малой δ_0 поля тока каждой пары макроконтактов перекрываются только в зонах с малой плотностью тока). При большой толщине пластинки (фиг. 33, *в*) сопротивление $R_д \gg \frac{R_д'}{n}$, так как поля тока стеснены. Этим объясняется, что при неизменном диа-



Фиг. 34. Размер контакта между свариваемыми деталями при малом (*а*) и при большом (*б*) усилии сжатия.

метре электродов d_0 и постоянном усилии P сопротивление пластинки $R_д$ растет (см. фиг. 32, *б*) с увеличением ее толщины. При хорошо подогнанных электродах площадь их возможного контакта со свариваемыми деталями ограничивается размерами рабочей поверхности электрода.

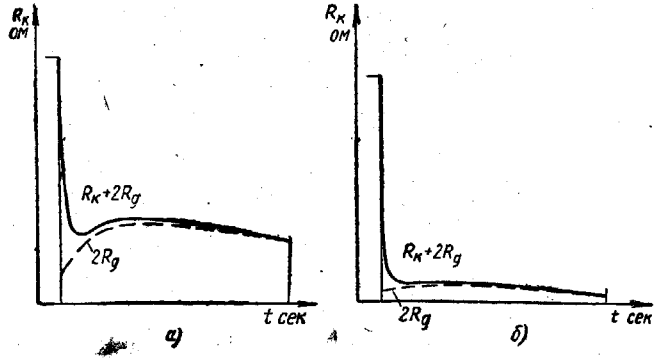
Площадь контакта между свариваемыми деталями зависит от приложенного усилия P и толщины деталей. С увеличением P диаметр контакта $d_к$ увеличивается (фиг. 34) до некоторого предельного значения $d_{пр}$, зависящего от толщины пластинки ($d_{пр} \approx \approx d_э + 1{,}7\delta_0$).

Дальнейшее повышение P не увеличивает $d_к$, но вызывает увеличение размеров и числа макроконтактов, что ведет к некоторому уменьшению собственного сопротивления деталей.

Как правило, начальное сопротивление холодных деталей определяется в основном контактными сопротивлениями (фиг. 35). Однако при сварочном нагреве контактные сопротивления быстро понижаются, а собственное сопротивление сначала растет (из-за повышения удельного сопротивления), а затем иногда медленно уменьшается в результате увеличения площади контакта. Сопротивление к концу сварки может быть найдено исходя из допущения, что физический контакт между электродом и деталью распро-

страняется на всю площадку их касания (контакт при нагреве теряет ситовой характер из-за большой пластической деформации), а между деталями — на площадку диаметром $d_{пр} = d_э + a\delta_0$. Коэффициент a зависит от усилия P.

При сварке стали на «мягких» режимах (при относительно малом P) $a \approx 1$; при сварке на «жестких» режимах (при большом P) $a = 1{,}5—1{,}7$.



Фиг. 35. Изменение сопротивления в процессе точечной сварки:
а — малоуглеродистой стали; *б* — дуралюмина.

Собственное сопротивление пластинки толщиной $\delta_1 + \delta_2$, неравномерно нагретой в условиях точечной сварки с контактами неодинакового размера (фиг. 36), можно приближенно рассчитать по формуле как полусумму сопротивлений двух пластинок толщиной $2\delta_1$ и $2\delta_2$:

$$R^0_{д.гор} = A_1 k \rho'_T \frac{\delta_1}{\frac{\pi d_э^2}{4}} + A_2 k \rho''_T \frac{\delta_2}{\frac{\pi d_{пр}^2}{4}}, \qquad (14)$$

где A_1 и A_2 — коэффициенты (см. фиг. 31, *в*), соответствующие отношениям $\frac{d_э}{2\delta_1}$ и $\frac{d_{пр}}{2\delta_2}$;

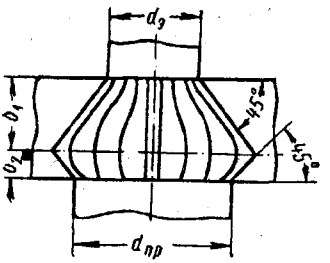
ρ'_T и ρ''_T — удельные сопротивления, соответствующие средним температурам T_1 и T_2 на оси OZ в верхней и нижней частях нагретой пластинки (при сварке стали к концу процесса $T_1 \approx 1200°$ и $T_2 \approx 1500°$;

k — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева (при сварке стали можно принять $k = 0{,}85$).

Таким образом, сопротивление при точечной сварке уменьшается с увеличением сжимающего усилия P и с увеличением диаметра токоподводящих электродов.

При точечной сварке переменным током сопротивление деталей несколько выше из-за поверхностного эффекта. Вследствие большой плотности тока это повышение незначительно и им можно пренебречь.

При сварке переменным током детали оказываются в сфере действия сильного магнитного поля. Детали из магнитной стали при этом перемагничиваются (с частотой 50 *гц*) и в них индуктируются вихревые токи. В результате этого часть потребляемой энергии расходуется на бесполезный нагрев деталей вне зоны их



Фиг. 36. Схема поля тока при приближенном расчете сопротивления детали с неодинаковыми размерами контактов.

сварки и увеличивается как активное, так и реактивное сопротивление сварочной цепи (см. § 5, гл. VIII).

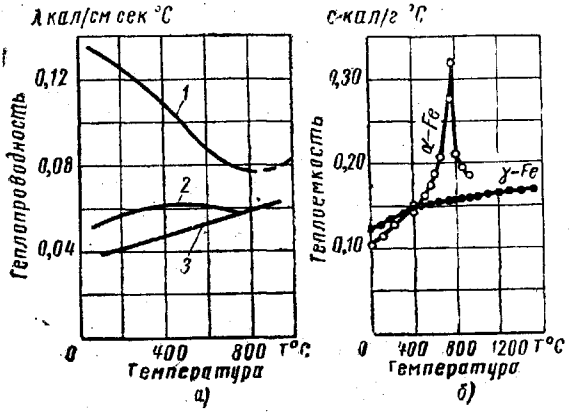
В силу родственного характера процессов сопротивление при рельефной и роликовой сварке подчиняется основным зависимостям, установленным для точечной сварки.

§ 5. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Распространение тепла в неравномерно нагретом твердом теле определяется законами теплопередачи и зависит от физических свойств материала (см. табл. 1): коэффициента теплопроводности λ *кал/см · сек* °С; удельной теплоемкости *с кал/г* °С, удельного веса γ в *г/см*^{3} и коэффициента температуропроводности $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ *см*^{2}*/сек*.

Физические свойства материала существенно влияют на условия его контактной сварки. Чем выше теплопроводность, характеризующая интенсивность теплового потока в неравномерно нагретом теле, и коэффициент температуропроводности, определяющий скорость распространения в этом теле температуры, тем быстрее распространяется в свариваемых деталях тепло и тем шире зона их нагрева. С увеличением λ и a растут необходимые для сварки мощность и расход электроэнергии. Поэтому контактная сварка малоуглеродистой стали, теплопроводность которой в 6—8 раз ниже, чем у меди, осуществляется при значительно меньшей мощности, чем сварка алюминия, теплопроводность которого выше, чем у стали, более чем втрое.

Теплофизические свойства зависят от температуры. Характер этой зависимости неодинаков у различных материалов. Например, теплопроводность малоуглеродистой стали (фиг. 37, *а*) при нагреве до 800° уменьшается, а после аустенитного превращения начинает расти. Теплопроводность высоколегированных сталей (инструментальных, нержавеющих) значительно ниже, чем малоуглеродистой; при нагреве она растет. Температурная зависимость удельной теплоемкости малоуглеродистой и других магнитных сталей харак-



Фиг. 37. Зависимость от температуры:

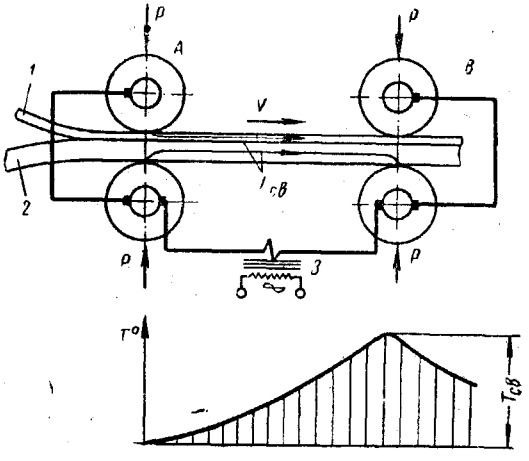
а — теплопроводности стали: *1* — малоуглеродистой; *2* — быстрорежущей; *3* — аустенитной, 1Х18Н9Т; *б* — теплоемкости стали (α — перлитной; γ — аустенитной).

теризуется пиком (фиг. 37, *б*), вызываемым поглощением тепла при переходе в немагнитное состояние. Зависимость $c=f(T)$ у немагнитной аустенитной стали этого пика не имеет. При повышении температуры теплопроводность меди медленно понижается, а чистого алюминия слегка растет.

§ 6. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАГРЕВА ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Условия выделения и распространения тепла существенно зависят от технологического процесса. При стыковой сварке поток тепла в основном распространяется линейно вдоль свариваемых стержней; при роликовой сварке пластины нагреваются подвижным источником тепла, которое распространяется главным образом в двух направлениях; точечная сварка характеризуется объемным распространением тепла в свариваемые детали и электроды. Ниже рассматриваются некоторые общие особенности нагрева при контактной сварке, более подробный их анализ при различных способах сварки дается при изучении соответствующих технологических процессов.

При контактной сварке детали обычно нагреваются теплом, выделяемым на их собственном и контактном сопротивлениях током, протекающим перпендикулярно плоскости соединения. Иногда, например, при сварке способом Игнатьева (фиг. 38) или при сварке продольного стыка труб током радиочастоты (см. фиг. 118) ток протекает параллельно плоскости соединения и детали нагреваются только теплом, выделяемым на их собственном сопротивлении.



Фиг. 38. Схема непрерывной сварки по способу Игнатьева:

1 и *2* — свариваемые заготовки; *3* — сварочный трансформатор.

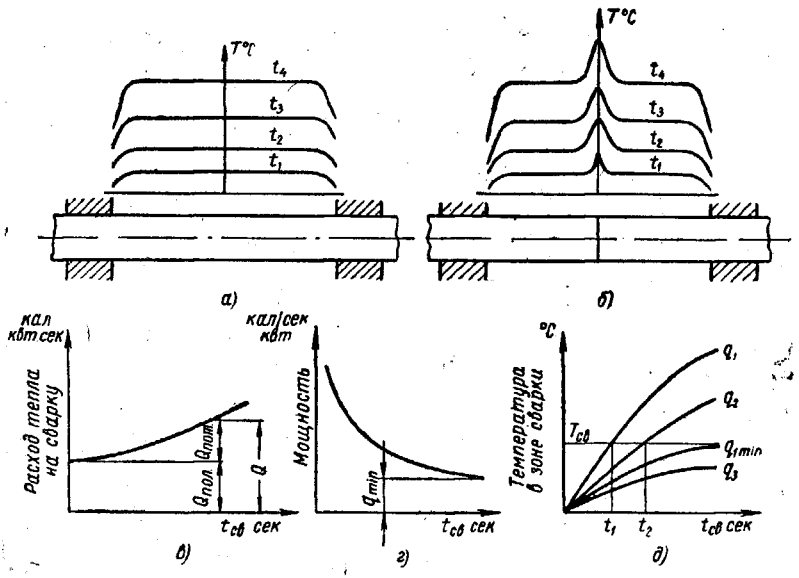
При нагреве по «перпендикулярной» схеме часть тепла выделяется в сварочном контакте. Если допустить, что ток в процессе сварки не изменяется, то формула (1) примет вид

$$Q = 0{,}24I^2 \int_0^t R\,(t)dt. \qquad (15)$$

Интеграл представляет собой площадь, ограниченную кривой $R=f\,(t)$. При всех способах контактной сварки по «перпендикулярной» схеме, за исключением сварки оплавлением, при которой $R_к$ относительно велико, площадь кривой $R_к = f(t)$ в силу быстрого понижения $R_к$ обычно не превышает 10% от общей площади кривой $R=f(t)$, как это видно на фиг. 30, *а* и фиг. 35.

Таким образом, сопротивление контакта не играет существенной роли в общем балансе тепла, генерируемого при сварке (за исключением сварки оплавлением). Однако оно может заметно влиять на распределение тепла в свариваемых деталях. В начале сварки контакт интенсивно нагревается и хотя при этом его сопротивление быстро падает, появление у контакта тонкого слоя сильно

нагретого металла с высоким удельным сопротивлением вызывает здесь при дальнейшем протекании тока интенсивное местное тепловыделение (создается концентратор источников тепла). Влияние этого концентратора на температурное поле видно при сопоставлении кривых распределения температуры в нагреваемом током стержне без контакта (фиг. 39, *а*) и с контактом по середине (фиг. 39, *б*) в различные моменты времени ($t_4 > t_3 > t_2 > t_1$).



Фиг. 39. Типовые зависимости от продолжительности нагрева:
а — распределения температуры в стержне без контакта; *б* — то же с контактом посередине; *в* — необходимого для сварки расхода тепла; *г* — потребляемой мощности; *д* — температуры в зоне сварки.

Контактное сопротивление зависит от состояния поверхности материала и усилия, действующего в контакте. Поэтому при сварке по «перпендикулярной» схеме условия нагрева и, как следствие, результаты сварки часто зависят от состояния поверхности деталей и других параметров, влияющих на контактное сопротивление. При сварке по «параллельной» схеме контактное сопротивление не участвует в тепловыделении, что способствует стабилизации условий нагрева.

Это принципиальное преимущество «параллельной» схемы начинает успешно использоваться при сварке током радиочастоты продольных швов труб (см. гл. VI).

Тепло Q, выделяемое при сварке, расходуется на полезный нагрев деталей непосредственно в зоне сварки ($Q_{пол}$) и на компен-

сацию потерь тепла в электроды, в окружающий зону сварки металл деталей и в атмосферу ($Q_{пот}$).

Количества выделенного и израсходованного тепла равны между собой

$$Q = Q_{пол} + Q_{пот}. \tag{16}$$

Тепло $Q_{пол}$ не зависит от продолжительности нагрева. Действительно для нагрева без тепловых потерь тела объемом V до температуры T при удельном весе γ и удельной теплоемкости c требуется

$$Q_{пол} = c\gamma VT. \tag{17}$$

Потери тепла растут с увеличением продолжительности сварочного нагрева $t_{св}$. Поэтому общее количество тепла Q, необходимое для осуществления сварки, также растет с удлинением t_c (фиг. 39, *в*). Росту Q способствует также расширение зоны нагрева при высоком коэффициенте температуропроводности свариваемого материала.

Среднее количество тепла q *кал/сек*, выделяемое в единицу времени в зоне сварки и определяющее мощность, расходуемую непосредственно в зоне сварки, равно

$$q = \frac{Q}{t_{св}}. \tag{18}$$

Помимо этого, значительная часть мощности, забираемой из сети при сварке, теряется в сварочной машине на нагрев ее трансформатора и токоведущих элементов. С увеличением $t_{св}$ необходимая мощность уменьшается сначала быстро, а затем медленно (фиг. 39, *г*), достигая в пределе минимального значения q_{min}.

Изменение температуры при нагреве электрическим током проводника, теряющего тепло в окружающую среду, следует экспоненциальному закону

$$T = T_{пр}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \tag{19}$$

где $T_{пр}$ — предельная температура, достигаемая при $t = \infty$;

t — время;

τ — постоянная, зависящая от плотности тока, удельного сопротивления и других характеристик проводника.

Этот же характер изменения температуры примерно соответствует нагреву зоны соединения при контактной сварке.

Скорость нагрева зоны сварки зависит от потребляемой мощности. При большой мощности q_1 (фиг. 39, *д*) температура вначале растет почти линейно и быстро (через t_1) достигает необходимого для завершения сварки значения $T_{св}$. С уменьшением мощности (например, до q_2) время нагрева до $T_{св}$ увеличивается ($t_2 > t_1$).

При некоторой предельной мощности q_{min} требуемая температура теоретически достигается при $t_{св} = \infty$. Наконец, при $q_з < q_{min}$ нагреть детали до заданной температуры и осуществить сварку вообще нельзя.

Таким образом, мощность, необходимая для контактной сварки данных деталей, не является постоянной величиной; она уменьшается с увеличением продолжительности нагрева, но всегда должна оставаться существенно больше q_{min}.

Современная технология контактной сварки характеризуется использованием машин большой мощности, так как при этом, во-первых, уменьшается продолжительность процесса и, как следствие, растет его производительность и, во-вторых, уменьшается расход электроэнергии.

ГЛАВА III

СТЫКОВАЯ СВАРКА

§ 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ТИПЫ СОЕДИНЕНИЙ

Контактная стыковая сварка широко применяется:

а) для получения из проката длинных изделий или заготовок, поступающих в дальнейшую переработку, например, сварка трубчатых змеевиков поверхностей нагрева котлов; сварка на трассе стыков труб нефте- и газопроводов; сварка концов рулонов стальной ленты для пропуска через линии непрерывного травления и холодной прокатки; сварка концов проволоки для непрерывного волочения; сварка железнодорожных рельсов в длинные плети, улучшающие условия прохождения по ним подвижного состава;

б) для изготовления деталей замкнутой формы (звеньев цепей; ободов автомобильных колес, фиг. 40, *а*; колец жесткости для реактивных двигателей; венцов шестерен; оконных переплетов из легких сплавов и др.);

в) для экономичного образования сложных деталей из простых катаных, кованых, штампованных или механически обработанных заготовок, часто прошедших перед сваркой окончательную термическую обработку (например, кожух карданного вала автомобиля, фиг. 40, *б*, можно сваривать из трубы и двух поковок; в кожухе задней полуоси автомобиля, фиг. 40, *в*, подвеску рессоры *1* с запрессованным и предварительно закаленным пальцем *2*, привариваются по сечению *а — а* к фланцу *3*; тягу самолета, фиг. 40, *г*, сваривают из трубы и двух штампованных проушин);

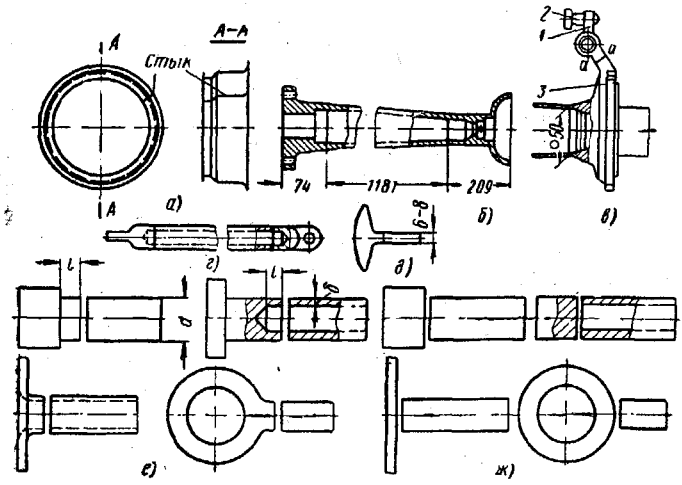
г) для экономии легированных сталей (например, рабочая часть сверла из быстрорежущей стали сваривается с хвостовиком из поделочной; заготовка клапана двигателя внутреннего сгорания, фиг. 40, *д*, получается сваркой стержня из жаропрочной стали, образующего после высадки головку клапана, и хвостовика из конструкционной стали);

д) для уменьшения отходов (например, сварка прутков арматуры железобетона в бесконечную плеть с отрезкой от нее стержней заданной длины; сварка коротких угольников, швеллеров и т. д.).

Как указывалось в введении, возможна стыковая сварка сопротивлением или оплавлением. Основные усло-

вия хорошей сварки в обоих случаях одинаковы: а) равномерный по сечению нагрев каждой из свариваемых деталей в прилегающей к стыку зоне; б) защита их торцов от окисления; в) наличие примерно равных возможностей для пластической деформации обеих деталей при осадке.

При сварке сопротивлением эти условия выполнимы только при быстром нагреве плотно прилегающих друг к другу торцов дета-



Фиг. 40. Примеры применения стыковой сварки (*а* — *д*) и типы соединений (*е* — наиболее рациональные; *ж* — менее рациональные).

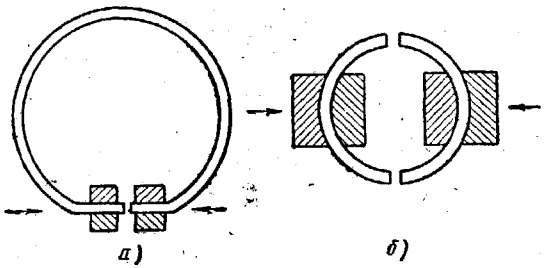
лей и большой пластической деформации в зоне стыка. Поэтому ее применение ограничивается сваркой деталей небольшого компактного сечения (например, стержней диаметром до 20 *мм*). Малое применение сварки сопротивлением связано и с относительно невысокой прочностью получаемых соединений. Сопротивлением обычно сваривают проволоку из стали и цветных металлов, хотя в последнее время все чаще применяется холодная сварка медной и алюминиевой проволоки.

Разработанная в ЦНИИТМАШе газовая защита повышает качество соединений и несколько расширяет область возможного применения сварки сопротивлением, важнейшим преимуществом которой является гладкая поверхность деталей в зоне стыка (отсутствие грата).

Основной способ стыковой сварки — сварка оплавлением. Плоскость стыка обычно перпендикулярна осям свариваемых деталей, но может располагаться и под углом 45° (например, при сварке узлов оконных переплетов). Обе детали должны иметь вблизи стыка одинаковые или близкие по размерам и форме сечения.

Это создает условия для их равномерного нагрева и одинаковой пластической деформации.

Целесообразные типы соединений при сварке оплавлением показаны на фиг. 40, *е*. На фиг. 40, *ж* приведены менее рациональные соединения, дающие стыки пониженной прочности с неполным проваром. При сварке деталей неодинакового сплошного сечения необходимо, чтобы $l \geqslant \frac{a}{2} + 0{,}25\ d$, (см. фиг. 40, *е*), а при сварке листов или труб $l \geqslant \frac{a}{2} + 3\ \delta$, где d — диаметр детали; δ — толщина листа или стенки трубы и a — общее укорочение свариваемых деталей при



а) *б)*

Фиг. 41. Сварка кольцевых деталей:
а — с одним; *б* — с двумя стыками.

оплавлении и осадке (см. § 3). Разница в диаметре стержней или разностенность труб не должна превышать 15%.

Оплавлением хорошо свариваются как детали компактного сечения (круг, квадрат, катаные или прессованные профили), так и детали с развитым периметром (трубы, листы). В настоящее время на специальных машинах свариваются листы шириной до 2000 *мм* и трубы диаметром до 529 *мм*.

Кольца большого диаметра (обод колеса) свариваются с одним стыком; небольшие кольца (звенья цепей) с двумя (фиг. 41). Два стыка делаются для облегчения деформирования жесткого кольца при сближении свариваемых торцов, а также для уменьшения шунтирования тока (см. § 6). Для более удобного зажатия кольца его участки, прилегающие к стыку, часто спрямляются (фиг. 41, *а*), а после сварки правятся.

Подготовка торцов деталей перед сваркой оплавлением производится отрезкой на прессе, ножницах, пиле или металлорежущем станке, а также кислородной резкой с очисткой торца от шлака.

Листы и тонкостенные трубы требуют относительно точной подготовки торцов, поэтому их обрезают перед сваркой механическими способами. Поверхность деталей, зажимаемая электродами, обычно очищается (наждачным кругом, иногда травлением или галтовкой) от ржавчины и окалины для улучшения электрического контакта. Однако листы, поступающие на сварку со станов непрерыв-

ного горячего проката, не очищаются и надежный контакт образуется благодаря значительным усилиям зажатия листов в электродах.

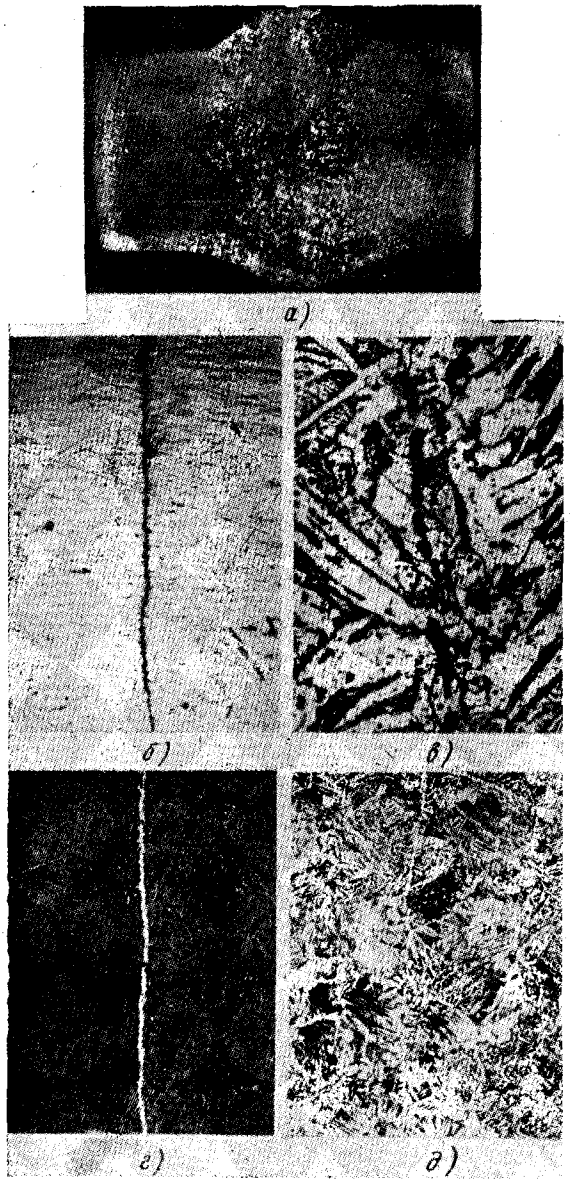
Оплавлением можно сваривать сталь, а также никель, алюминий, титан и их сплавы, многие медные сплавы и другие материалы. С увеличением сечения свариваемых деталей повышается необходимая мощность стыковой машины. В современной технике применяются машины мощностью от долей киловольтампера (*ква*), служащие для сварки мельчайших деталей в приборостроении, до сотен и тысяч *ква*. Например, машины для сварки в стык стальной ленты шириной до 1500 *мм* при толщине до 6 *мм* имеют мощность 1500 *ква*. Существуют и более мощные машины (до 12 000 *ква*). Наиболее распространены машины мощностью до 150—300 *ква*. В большинстве машин свариваемые детали устанавливаются вручную, а управление процессом осуществляется оператором или автоматически. В единичных случаях машины снабжаются и автоматическими загрузочными приспособлениями. Такие высокопроизводительные стыковые машины-автоматы в ближайшее время должны найти широкое применение, особенно в массовом производстве (инструментальной и автомобильной промышленности).

§ 2. СВАРКА СТАЛИ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Соединения, сваренные сопротивлением (фиг. 42, *а*), характеризуются плавным очертанием. При медленном нагреве рядом со стыком заметно растет зерно. Сварка стали без специальной защиты часто сопровождается появлением окисных включений в стыке в виде сплошного непровара (фиг. 42, *б*) или цепочки включений (фиг. 42, *в*). Иногда при отсутствии видимых неметаллических включений в стыке обнаруживается полоска окисленного феррита (фиг. 42, *г*). Все это сильно понижает пластичность соединения. Чтобы избежать непровара, стык необходимо нагревать до высокой температуры (1200—1300° — для малоуглеродистой стали), что вызывает значительный рост зерна (фиг. 42, *в*) и дает при осадке большую пластическую деформацию. Однако при плотном прилегании шлифованных торцов прочное соединение деталей можно получить и при нагреве до значительно более низкой температуры (фиг. 43).

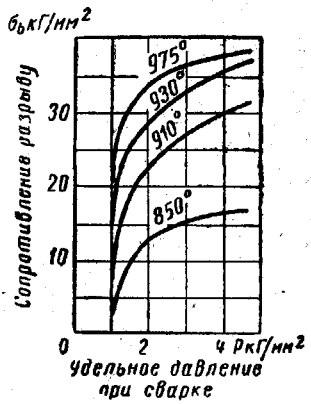
Комплекс основных контролируемых параметров технологического процесса называется р е ж и м о м с в а р к и. Режим сварки сопротивлением обычно определяется следующими параметрами: током, продолжительностью сварочного нагрева, давлением осадки и установочной длиной деталей (длиной их концов, выступающих из электродов). Все эти параметры существенно влияют как на температуру свариваемых деталей, так и на условия их пластической деформации.

Контакт между торцами деталей в начале сварки имеется не по всему сечению. Это приводит к неравномерному их нагреву, особен-

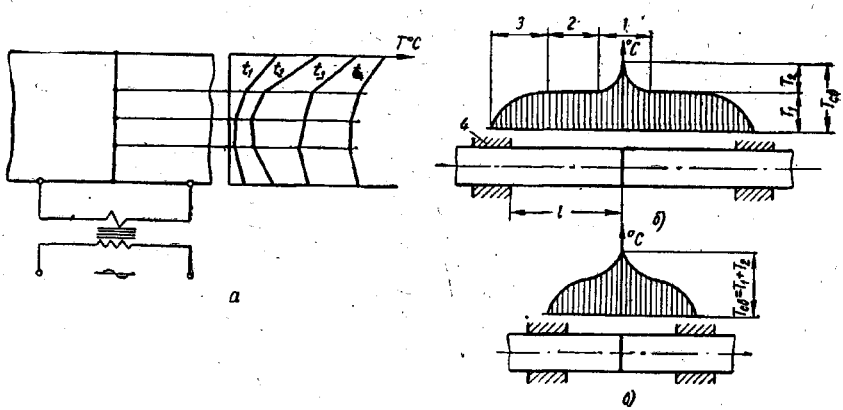


Фиг. 42. Структура соединения при сварке сопротивлением стали:

а — макроструктура; *б* — непроваренный участок соединения (нетравленный шлиф, ×100); *в* — микроструктура участка стыка с окислами при сварке без газовой защиты (× 100); *г* — окисленный феррит в стыке при сварке без газовой защиты (хроматное травление, × 100); *д* — микроструктура стыка при сварке с газовой защитой (травление в азотной кислоте, × 100).



Фиг. 43. Зависимость прочности сварного соединения от температуры и удельного давления (зажатые прессом шлифованные цилиндрики сваривались при нагреве в муфельной печи).



Фиг. 44. Распределение температуры при сварке сопротивлением:

а — по торцу деталей; *б* — вдоль деталей при большой установочной длине; *в*—то же при малой установочной длине.

но заметному в начале процесса (фиг. 44, *а*). Постепенно степень неравномерности нагрева уменьшается (см. кривые для $t_1 - t_4$). Однако при сварке деталей большого или развитого сечения эта неравномерность сохраняется до конца сварки и приводит к непровару более холодных участков стыка. Распределение температуры вдоль свариваемых деталей (фиг. 44, *б*) характеризуется тремя участками (при большой длине l): а) узкой околостыковой зоной *1*, в которой сказывается местное выделение тепла в контакте; б) равномерно нагретыми участками *2* и в) участками *3*, на которых температура постепенно понижается в результате теплоотвода в электроды *4*. При малой длине l (фиг. 44, *в*) второй участок отсутствует.

Нагрев при сварке сопротивлением можно рассматривать как результат наложения двух процессов:

а) нагрева (до температуры T_1) бесконтактного стержня теплом, равномерно выделяемым на собственном сопротивлении по всей его длине (см. фиг. 44, *б*);

б) дополнительного нагрева (на температуру T_2) теплом, выделяемым в стыке и распространяющимся в стороны от него.

Если стержни сечением F *см*^{2} с удельным весом γ *г/см*^{3}, удельной теплоемкостью c *кал/г*°С и средним удельным сопротивлением ρ_T *ом·см* нагреваются в течение $t_{св}$ сек. током I_2 *а*, то на 1 *см* их длины выделится тепло

$$Q_1 = 0{,}24\rho_T \frac{1}{F} I_2^2 t_{св}. \qquad (20)$$

Оно расходуется на нагрев до T_1 и на потери в электроды и лучеиспусканием. Учитывая эти потери коэффициентом k_2, получим из уравнения (17).

$$k_2 Q_1 = F \cdot 1 \cdot c\gamma T_1. \qquad (21)$$

При сварке сопротивлением деталей из перлитных сталей $k_2 \approx 0{,}75$; при сварке аустенитных сталей с малой теплопроводностью k_2 повышается до 0,9.

Решая совместно уравнения (20) и (21), находим температуру

$$T_1 = \frac{0{,}24 k_2 \rho_T I_2^2 t_{св}}{c\gamma F^2}. \qquad (22)$$

Температуру T_1 можно определить точнее, если учесть изменение удельного сопротивления и удельной теплоемкости при нагреве.

В первом приближении справедлива линейная зависимость

$$\frac{\rho_T}{c_T \gamma} = \frac{\rho_0}{c_0 \gamma}(1 + \beta T),$$

где ρ_0 и c_0 — удельное сопротивление и удельная теплоемкость при $T = 0°C$;

β — температурный коэффициент возрастания $\frac{\rho_T}{c_T\gamma}$ (см. табл. 1).

При отсутствии потерь тепла в окружающую среду температура проводника, нагреваемого током плотностью j $a/см^2$, равна

$$T_1(t) = \frac{1}{\beta}(e^{\beta w_0 t} - 1), \qquad (23)$$

где $w_0 = 0{,}24\frac{\rho_0}{c_0\gamma} j^2$ — начальная скорость нагрева в °C/*сек*.

Изменение температуры в таком проводнике характеризуется вогнутым начальным участком кривой $T_1 = f(t)$, что связано с постепенным повышением скорости нагрева с ростом температуры (из-за увеличения $\frac{\rho_T}{c_T\gamma}$). При учете потерь тепла с поверхности проводника (не существенных в условиях быстрого нагрева во время сварки сопротивлением) температура T_1 будет стремиться к некоторой предельной температуре $T_{пр}$ (см. фиг. 39, *д*).

Температуру T_2 (x, t) в любой точке на расстоянии x от плоскости стыка относительно легко определить аналитически в предположении (Н. Н. Рыкалина), что все тепло, генерируемое током за время сварки в сопротивлении контакта, выделяется в нем мгновенно в начале процесса, а затем постепенно распространяется вдоль свариваемых стержней.

В начальный момент процесса температура в стыке, рассчитанная по этой схеме, достигает бесконечности. Однако экспериментально показано, что такой расчет дает результаты, хорошо согласующиеся с измеренными температурами, в представляющей практический интерес конечной стадии процесса.

Температура T_2 (x, t) может быть определена по формуле

$$T_2(x,t) = \frac{Q_2}{\bar{c}\gamma\sqrt{4\pi\bar{a}t}} e^{\beta w_0 t - \frac{x^2}{4\bar{a}t}}, \qquad (24)$$

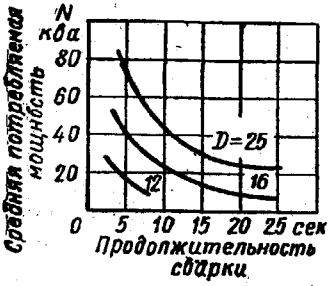
где $Q_2 = \frac{\mu\sqrt{\bar{\lambda}\bar{c}\gamma}}{\beta j\sqrt{0{,}24\,\beta\frac{\rho_0}{c_0\gamma}}}$ — общее количество тепла, выделяемое в контакте за время сварки, отнесенное к единице площади контакта;

$\bar{c}$, $\bar{\lambda}$ и $\bar{a}$ — средние значения удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности и коэффициента температуропроводности в процессе нагрева (для стали они могут быть определены по графику фис. 37).

Для коэффициента μ, характеризующего интенсивность тепловыделения в контакте, экспериментально найдены следующие значения:

Сталь 10	2,6—3,0	Алюминий	0,34—0,36
Сталь 45	2,0—2,3	Медь	0,14—0,15
Сталь 1Х18Н9	0,07—0,08		

Большим удельным давлениям в контакте соответствуют меньшие значения μ (интенсивность тепловыделения с повышением давления понижается).



Фиг. 45. Зависимость потребляемой мощности от продолжительности сварки сопротивлением деталей различного диаметра из малоуглеродистой стали.

Процесс распространения тепла при сварке сопротивлением (без учета потерь тепла с поверхности деталей) описывается уравнением

$$T(x, t) = T_1(t) + T_2(x, t). \qquad 5)$$

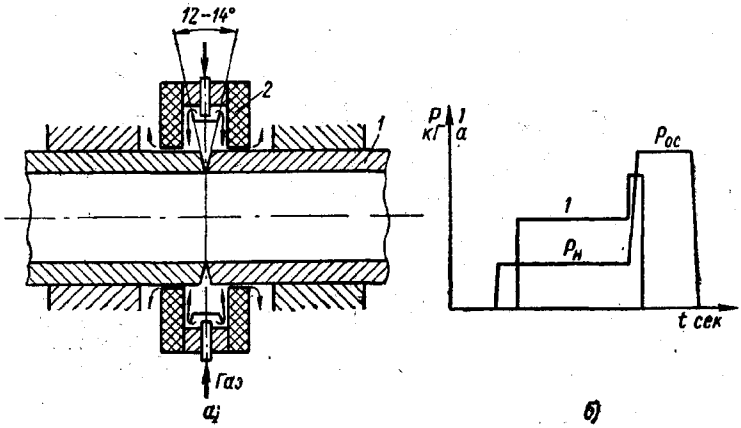
Пользуясь формулами (23) и (24), можно рассчитать по формуле (25) температуру в стыке и прилегающей к нему зоне в любой момент времени (достаточно удаленный от начала процесса).

Интенсивность нагрева растет с увеличением плотности тока $j = \frac{I_2}{F}$ и с увеличением контактного сопротивления (при уменьшении усилия сжатия стержней P_{oc}). Обычно при сварке сопротивлением малоуглеродистой стали плотность тока составляет 20—60 *а/мм²*, а удельная мощность — 0,12—0,20 *ква/мм²*. Полная мощность пропорциональна сечению свариваемых деталей и уменьшается с удлинением процесса (фиг. 45). Сварка сопротивлением обычно продолжается 0,5—10 сек.

Усилие осадки влияет на тепловыделение в контакте и на пластическую деформацию. Оно задается удельным давлением. Это давление при сварке прутков небольшого диаметра из малоуглеродистой стали $p_{oc} = \frac{P_{oc}}{F} = 1{,}5 \div 3$ *кГ/мм²*. При таком давлении и нагреве до 1200—1300° пластическая деформация в зоне сварки (укорочение при осадке) достигает 1,5—2,5 *мм*. Это укорочение деталей компенсируется припуском на осадку.

Установочная длина l деталей диаметром d составляет (0,6 ÷ ÷ 1,0)d. С ее увеличением уменьшаются потери тепла в электроды. Однако при чрезмерной установочной длине растет потребляемая мощность (из-за большой длины нагреваемого участка) и возможно искривление нагретых деталей во время осадки.

Разработана технология сварки сопротивлением с газовой защитой в ЦНИИТМАШе). При сварке этим способом труб (диа-



Фиг. 46. Особенности сварки труб сопротивлением с газовой защитой: *а* — схема подачи защитного газа; *б* — изменение усилия осадки и тока в процессе сварки.

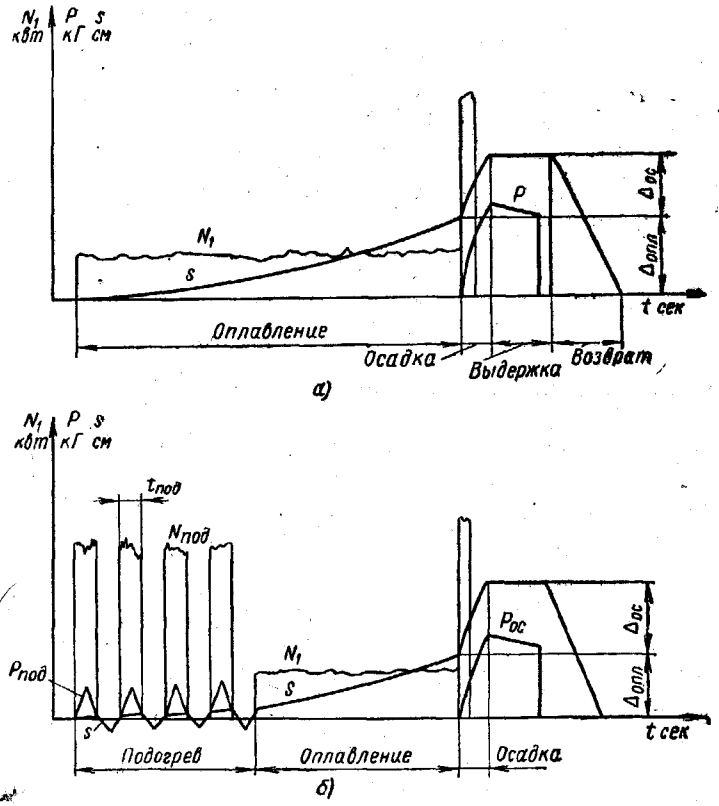
метром 25—42 *мм*) обеспечивается равномерный нагрев по периметру стыка и отсутствие в нем окислов. С этой целью концы труб *1* перед сваркой обрабатываются со скосом 6—7° и в газозащитную камеру *2* (фиг. 46, *а*) подается тщательно осушенный и очищенный от кислорода газ (азот или азот с небольшой добавкой водорода).

При нагреве (фиг. 46, *б*) трубы сжимаются относительно небольшим усилием $P_н$, благодаря чему контактное сопротивление велико и тепло в зоне стыка выделяется очень интенсивно. В результате конусной подготовки торцов труб при малом $P_н$ удельное давление в начале нагрева очень значительно. Это приводит к тому, что при включении сварочного тока сразу достигается плотное взаимное прилегание кромок и нагрев их идет очень быстро и равномерно по всему периметру; острые кромки почти мгновенно свариваются, преграждая доступ воздуха из трубы в открытую разделку. Дальнейший нагрев кромок, омываемых защитным газом, идет без заметного окисления и сопровождается постепенной пластической деформацией, к концу нагрева до 1200° продолжительностью 4—8 сек. полностью закрывающей стык. Одновременно с выключением сварочного тока усилие осадки резко увеличивается до $P_{ос}$, соответствующего удельному давлению $p_{ос}=$

$= 4 \div 5$ *кГ/мм²*. Этим обеспечивается пластическая деформация, необходимая для получения качественного сварного соединения без непровара и крупного зерна (см. фиг. 42, *д*).

§ 3. ПРОЦЕСС СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Сварка оплавлением производится без подогрева (непрерывным оплавлением) или с подогревом. В первом случае процесс состоит из двух стадий: оплавления и

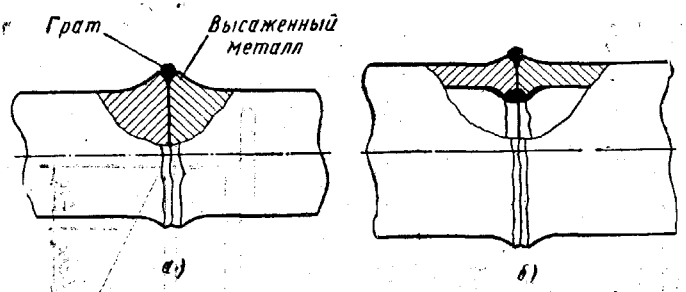


Фиг. 47. Схема процесса сварки:

а — непрерывным оплавлением; *б* — оплавлением с подогревом (*s* — перемещение подвижной плиты стыковой машины; *P* — усилие сжатия деталей; *N* — мощность, выделяемая в стыке).

осадки (фиг. 47, *а*); во втором случае — из трех: подогрева, оплавления и осадки (фиг. 47, *б*). В обоих случаях при оплавлении детали должны нагреваться до появления на их торцах тонкого слоя жидкого металла. При осадке этот загрязненный окислами металл

вытесняется из зазора с образованием так называемого грата, а расположенный под ним твердый и чистый металл сваривается. Необходимая для этого пластическая деформация, сопровождаемая высадкой металла (фиг. 48), осуществима только при достаточном прогреве деталей в глубину. При сварке непрерывным оплавлением это достигается главным образом теплопередачей от торцов, где сосредоточено тепловыделение. Подогрев облегчает получение необходимого распределения температуры вдоль свариваемых дета-



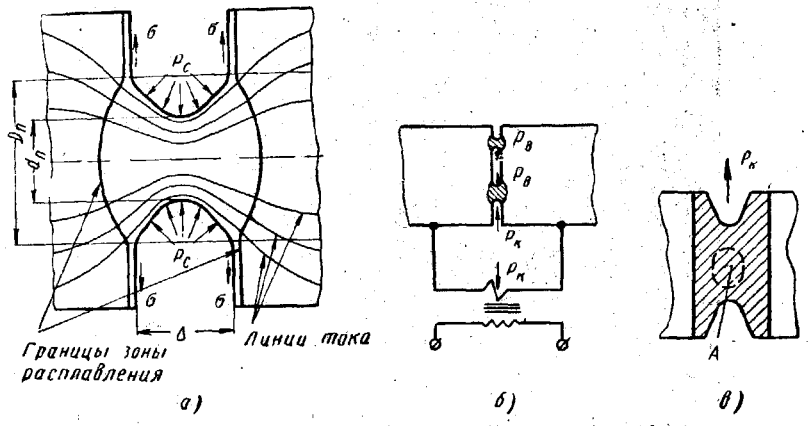
Фиг. 48. Форма соединения при сварке оплавлением:
а — стержня; *б* — трубы.

лей. Он осуществляется при возвратно-поступательном перемещении подвижной плиты стыковой машины (см. фиг. 47, *б*) и непрерывно включенном сварочном трансформаторе: при сближении деталей сварочная цепь замыкается накоротко, между ними возникает усилие $P_{под}$ и через подогреваемые детали протекает ток, которому соответствует мощность $N_{под}$; при раздвижении деталей сварочная цепь разрывается. Обычно короткие импульсы тока ($t_{под}$ = 0,5 ÷ 2,0 сек.) чередуются с паузами приблизительно такой же продолжительности. Нагрев импульсами способствует выравниванию температуры.

При оплавлении детали медленно сближаются при включенном токе. Их соприкосновение сопровождается образованием между торцами в одной или нескольких точках электрических контактов. Так как при оплавлении $P \approx 0$, сопротивление этих контактов велико и в них выделяется много тепла. Поэтому металл около контактов почти мгновенно плавится, и между торцами образуются жидкие токоведущие перемычки, схематически показанные на фиг. 49.

Форма и размеры перемычки определяются действием двух основных сил (фиг. 49, *а*): поверхностного натяжения σ, стремящегося при сближении деталей (уменьшении Δ) увеличить диаметр перемычки d_n (увеличение d_n ведет к уменьшению общей поверхности жидкого металла в перемычке и на торцах) и электромагнитных сил P_c, стремящихся сжать и разорвать проводник, обтекаемый

электрическим током. Силы P_c пропорциональны квадрату тока и растут с увеличением степени сужения проводника, т. е. отношения $\frac{D_n}{d_n}$. Между одновременно существующими перемычками, как между проводниками с током одинакового направления, действуют электромагнитные силы $P_в$ (фиг. 49, *б*), стремящиеся сблизить и объединить эти перемычки. Из-за быстрого их разрушения этот процесс обычно не завершается. Силы $P_к$ взаимодействия тока в перемычке с магнитным полем сварочного контура вызывают также перемещение перемычек в зазоре между торцами и выталкивают их из сварочного контура.

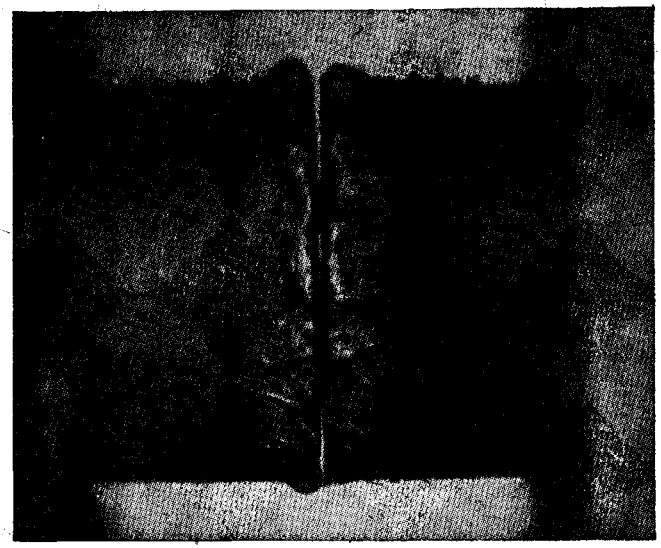


Фиг. 49. Схемы перемычек расплавленного металла при оплавлении:
а — действующие на них внутренние силы; *б* — внешние силы, действующие на перемычки; *в* — смещение перемычки под действием силы $P_к$.

При нулевом мгновенном значении сварочного тока все силы, кроме σ, равны нулю и форма перемычки определяется силами поверхностного натяжения. При этом непрерывное сближение деталей, сопровождаемое уменьшением зазора Δ, увеличивает d_n. Однако в следующий момент ток в перемычке быстро нарастает и d_n уменьшается под действием сил P_c. Растущая плотность тока в перемычке способствует интенсивному повышению ее температуры. В центре перемычки начинается испарение металла. Стремительный рост давления паров металла внутри перемычки взрывает ее жидкую оболочку, преодолевая поверхностное натяжение. При этом частицы расплавленного металла выбрасываются в виде искр из зазора между оплавляемыми деталями, что ведет к постепенному укорочению деталей.

Ускоренная киносъемка показала, что отдельная перемычка существует 0,001—0,003 сек. После взрыва перемычки на торцах остаются лунки-кратеры диаметром D_n (фиг. 49, *а*). Например, при оплавлении труб диаметром около 40 *мм* зазор равен 0,1—

0,8 *мм* и $D_п = 1 \div 6$ *мм*. Глубина кратеров пропорциональна их диаметру. Перемычки перемещаются в направлении силы $P_к$ (фиг. 49, *в*). Поэтому наиболее горячая зона A, в которой возникает взрыв, смещена с оси перемычки. При взрыве большая часть расплавленного металла, расположенная выше A, выбрасывается в направлении $P_к$. Некоторые перемычки успевают достигнуть края



Фиг. 50. Неравномерно оплавленные трубы (стык не осажен).

сечения не взорвавшись. Здесь они, по-видимому, спокойно разрываются, образуя на поверхности детали наплыв из жидкого металла (фиг. 50). Направленное движение перемычек, например снизу вверх, приводит к увеличению зазора и большему прогреву в верхней части деталей.

Плавное сближение укорачиваемых при оплавлении деталей ведет к последовательному возникновению и разрушению перемычек (до 500 и более в секунду), создающему впечатление непрерывного потока искр, характерного для оплавления. Для того, чтобы оплавление не прерывалось, мгновенная скорость сближения деталей v' должна соответствовать скорости их фактического укорочения, т. е. мгновенной скорости оплавления $v_{опл}$. При $v' \gg v_{опл}$ зазор Δ (см. фиг. 49, *а*) уменьшается, а диаметр перемычек $d_п$ растет настолько, что их разрушение становится невозможным; происходит короткое замыкание деталей и оплавление прекращается. При $v' \ll v_{опл}$ образование и взрыв серии перемычек сопровождается

увеличением зазора Δ и перерывом в оплавлении, необходимым для образования нового контакта между медленно сближающимися деталями.

Мгновенная скорость оплавления зависит от того, с какой скоростью металл на торцах деталей может быть расплавлен и частично нагрет до температуры кипения. В секунду в контакте с сопротивлением $R_к$ выделяется количество тепла $q_{опл} = 0{,}24\, R_к I_2^2$. Это тепло расходуется на дополнительный нагрев от T_1 до $T_{опл}$ металла, выбрасываемого из зазора при оплавлении ($q'_{опл}$), и на теплопередачу в детали ($q''_{опл}$):

$$q_{опл} = q'_{опл} + q''_{опл} = v_{опл} F \gamma [c (T_{опл} - T_1) + m_0] + 2\lambda F \frac{dT}{dx}, \quad (26)$$

где F — сечение деталей в $см^2$;

γ, c, λ и m_0 — удельный вес, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и скрытая теплота плавления свариваемого материала (для стали $m_0 = 65$ *кал/г*);

$T_{опл}$ — средняя температура металла, выбрасываемого из зазора при оплавлении (для стали можно принять $T_{опл} \approx 2000°$ С);

T_1 — средняя температура металла у торцов (в начале процесса непрерывного оплавления — комнатная; к его концу — близкая к температуре плавления; при сварке с подогревом $T_1 \gg T_{под}$);

$\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры у торца (при сварке стали $\frac{dT}{dx} = 2000 \div 8000°$ С/*см*).

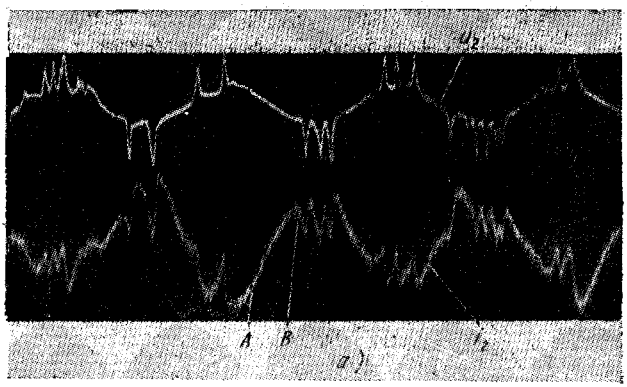
Отсюда $v_{опл}$ после подстановки вместо $q_{опл}$ его значения равно

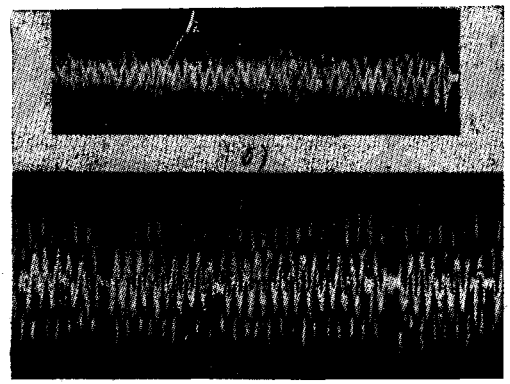
$$v_{опл} = \frac{0{,}24 R_к I_2^2 - 2\lambda F \frac{dT}{dx}}{\gamma F [c (T_{опл} - T_1) + m_0]}. \quad (27)$$

Из уравнения (27) следует, что мгновенная скорость оплавления растет с увеличением интенсивности тепловыделения $q_{опл}$, с уменьшением градиента температуры и с повышением температуры T_1. В начале непрерывного оплавления (при холодных деталях) оно идет очень медленно; по мере разогрева деталей $v_{опл}$ растет. Для поддержания непрерывного процесса оплавления (при неизменном токе I_2) скорость сближения деталей должна изменяться таким же образом. Повышение температуры T_1 путем подогрева увеличивает возможную скорость оплавления.

Следует отметить, что только часть $q''_{опл}$ увеличивает теплосодержание оплавляемых деталей. Эта часть $q'''_{опл} = q''_{опл} - Fv_{опл}\gamma c T_1$, здесь $Fv_{опл}\gamma c T_1$ — количество тепла, уже имеющееся

в нагретых деталях и удаляемое из них с выплавляемым металлом. Можно ввести понятие эффективного термического к. п. д. процесса оплавления $\eta_{опл} = \frac{q''_{опл}}{q_{опл}}$. Он растет с уменьшением $v_{опл}$ и T_1, т. е. в





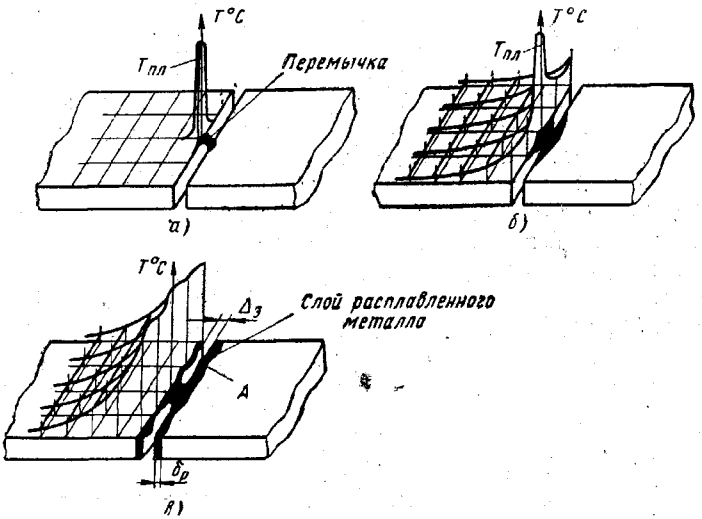
в)

Фиг. 51. Осциллограммы процесса оплавления.

начале оплавления. К концу процесса в случае достижения квазистационарного температурного поля $\eta_{опл} = 0$, так как при перемещении вдоль оплавляемых деталей неизменяющегося поля их теплосодержание остается постоянным и, следовательно, $q''_{опл} = 0$.

Оплавление сопровождается характерными электрическими процессами. Вблизи нулевого значения сварочного тока (точка A на осциллограмме, фиг. 51, $а$) ток i_2 и напряжение между электродами u_2 изменяются по синусоидальному закону. В точке B начинается разрушение перемычек, вызывающее резкое увеличение со-

противления цепи, уменьшение тока и мгновенное повышение напряжения. Последовательное возникновение и разрушение перемычек приводят к пульсации тока и напряжения. Устойчивый процесс оплавления идет без перерывов (фиг. 51, *б*); при неустойчивом процессе на осциллограмме видны перерывы в протекании тока продолжительностью 0,02—0,06 сек. (фиг. 51, *в*) и более.



Фиг. 52. Схема распределения температуры при сварке оплавлением.

Наличие между оплавляемыми торцами паров металла и энергичное окисление мельчайших капель жидкого металла, выбрасываемых из зазора при взрыве перемычек, снижает содержание в зазоре кислорода и уменьшает окислительную способность газовой среды. Например, газ, отобранный из оплавляемых труб длиной около 300 *мм* с закупоренными концами (малоуглеродистая сталь), содержал 2—4% O_2, около 1% CO и 2% CO_2. Непосредственно в зазоре между торцами содержание O_2 и CO_2 ниже, а CO выше, чем их среднее содержание в трубе.

Сужение линий тока и процессы теплопередачи ведут к интенсивному местному нагреву металла в основании перемычки. Этот нагрев в начале непрерывного оплавления очень неравномерен (фиг. 52, *а*), так как расплавленная перемычка окружена почти холодным металлом. Перемычки периодически образуются на всех участках торцовой поверхности оплавляемых деталей, что ведет к постепенному выравниванию температуры торцов и к распространению тепла в глубь деталей (фиг. 52, *б* и *в*). Достаточный прогрев перед осадкой оплавленных деталей по их длине также существенен для хорошей сварки, как и температура торцов, так как, во-первых, он определяет условия пластической деформации деталей

при осадке и, во-вторых, как показано ниже, сильно влияет на возможность удаления из стыка окислов.

Несмотря на пониженное содержание кислорода в газовой среде зоны сварки, окисление при оплавлении все же возможно, особенно при наличии в стали элементов с большим сродством к кислороду (хрома, кремния, алюминия). Для того, чтобы в сваренном стыке не было окислов, необходимо создать условия, обеспечивающие их удаление при осадке. Последнее возможно в двух случаях: если при осадке на торцах имеется слой расплавленного металла (окислы удаляются из стали вместе с этим металлом) или твердый металл покрыт жидкими легкоплавкими окислами (например, при сварке нелегированной стали с температурой плавления около 1500°, на которой образуется закись железа FeO, плавящаяся при 1370°). Удаление твердых окисных пленок, образовавшихся на поверхности металла, закристаллизовавшегося или нерасплавленного перед осадкой, очень затруднительно.

Оплавленные торцы перед осадкой имеют неровную поверхность (фиг. 52, *в*). Хотя осадка производится относительно быстро, для закрытия зазора Δ_3 и полного удаления из стыка окислов требуется некоторое время Δt_1. При оплавлении всегда имеется некоторый интервал времени Δt_2 между двумя последовательными перемычками, образующимися в одной и той же точке на торцах. Поэтому на отдельных участках торцов между образованием последней перемычки перед осадкой и фактическим началом осадки (моментом короткого замыкания) может проходить время Δt_2. В течение времени

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 \tag{28}$$

возможно остывание металла на дне кратера при незакрытом зазоре. Для того, чтобы сохранилась возможность удаления из стыка окислов, его температура T_2 при этом не должна стать ниже температуры плавления окислов (при легкоплавких окислах) или температуры, при которой металл теряет свойство жидкотекучести (при тугоплавких окислах).

Можно легко показать, что интервал времени Δt_0, достаточный для охлаждения металла на торцах от T_1 (средней температуры в момент существования перемычки) до T_2, приблизительно равен

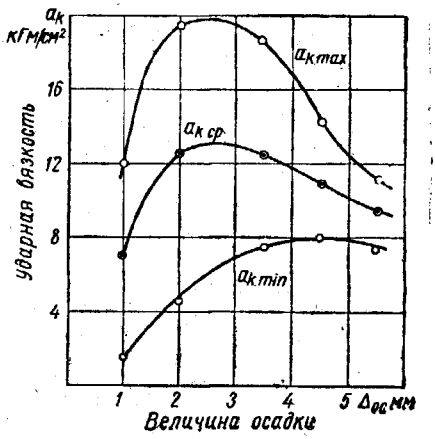
$$\Delta t_0 = \frac{\delta_p \gamma \left[c\left(T_1 - T_2\right) + m_0\right]}{\lambda \dfrac{dT}{dx}}, \tag{29}$$

где δ_p — толщина слоя расплавленного металла на торцах [остальные обозначения как в уравнении (27)].

Из уравнения (29) следует, что Δt_0 тем меньше, чем меньше δ_p и чем больше градиент температуры $\frac{dT}{dx}$. Легко показать, что при оплавлении малоуглеродистой стали, когда δ_p обычно составляет

0,1—0,3 *мм*, $\Delta t_0 = 0{,}02 \div 0{,}10$ сек. При сварке сталей, содержащих элементы, образующие тугоплавкие окислы, $T_1 - T_2$ — меньше, чем при сварке обычной углеродистой стали, поэтому Δt_0 уменьшается и удаление окислов затрудняется.

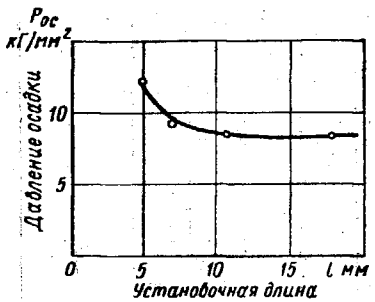
Если $\Delta t > \Delta t_0$, то условия для удаления окислов неблагоприятны. Поэтому необходимо стремиться к уменьшению Δt и увеличению Δt_0. Первое достигается применением устойчивого и интенсивного оплавления (уменьшается Δt_2) и увеличением скорости осадки (сокращается Δt_1); второе — уменьшением градиента $\frac{dT}{dx}$ за счет более равномерного прогрева оплавляемых деталей в глубину. Во избежание увеличения Δt_2 из-за преждевременного отключения тока осадка всегда начинается при включенном токе. Иногда выключение тока при осадке преднамеренно задерживается для дополнительного нагрева деталей, облегчающего их пластическую деформацию и уменьшающего возможность наклепа металла в стыке. Минимальная осадка Δ_{oc} (см. фиг. 47) должна быть по крайней мере в 1,5—2 раза больше максимального зазора $\Delta_з$ с тем, чтобы во всех точках соединения обеспечить необходимую для сварки пластическую деформацию. Следует отметить, что после удаления из стыка расплавленного металла и окислов большой деформации не требуется. Например, при сварке брусков сечением 30 × 30 *мм* с осадкой всего на 1,5 *мм* (фиг. 53) отдельные образцы, по-видимому вырезанные из участков, соответствующих точке *А* на фиг. 52, *в*, имели очень высокую ударную вязкость. Однако только при сварке с осадкой на 3,5—5 *мм* показатели ударной вязкости a_k были устойчивыми ($a_{k\min} \approx a_{k\max}$) Отсюда следует, что с уменьшением степени неровности оплавленных торцов (с уменьшением $\Delta_з$) условия получения хорошего соединения облегчаются. Пластическая деформация обычно распространяется в каждую сторону от стыка на величину $(1{,}5 \div 2{,}5)\ \Delta_{oc}$, где Δ_{oc} — суммарное укорочение при осадке. В этой зоне детали должны быть нагреты до достаточно высокой температуры. Чем она ниже, тем больше требуемое давление осадки. При сварке малоуглеродистой стали минимальная температура в зоне пластической деформации превышает 600—700°; при сварке аустенитной стали она выше 800—900°.



Фиг. 53. Зависимость ударной вязкости сварного соединения от величины осадки (малоуглеродистая сталь).

§ 4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА НАГРЕВ И ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ ПРИ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Режим сварки оплавлением определяется следующими параметрами (см. фиг. 44 и 47); установочной длиной деталей l; температурой $T_{под}$ и продолжительностью $t_{под}$ подогрева (если он применяется); суммарным укорочением деталей при оплавлении (припуском на оплавление $\Delta_{опл}$); его скоростью ($v_{опл}$); напряжением в сварочной цепи ($U_{2\cdot0}$); величиной ($\Delta_{ос}$) и скоростью осадки ($v_{ос}$), а также связанным с ними удельным давлением осадки ($p_{ос}$); наконец, имеет значение усилие зажатия деталей в электродах машины ($P_э$). Установочная длина l влияет на условия нагрева и пластической деформации. При малой l много тепла отводится в электроды и зона интенсивного нагрева оказывается очень узкой. Это затрудняет пластическую деформацию и вызывает увеличение необходимого давления осадки (фиг. 54) из-за объемно-напряженного состояния, вызываемого сопротивлением холодного металла у электродов свободной деформации горячего металла в стыке.



Фиг. 54. Зависимость необходимого давления осадки от установочной длины (сварка листов толщиной 3 *мм* из стали Ст. 3).

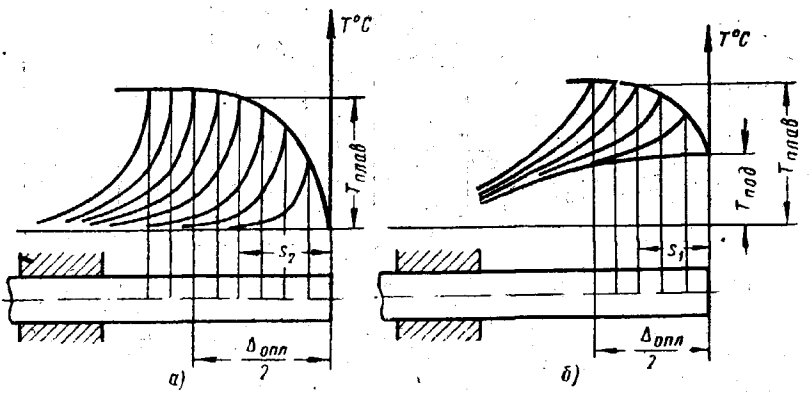
Чрезмерная установочная длина ведет к излишней потере энергии на нагрев деталей вне зоны сварки, а в некоторых случаях (при сварке листов и тонкостенных труб) вызывает изгиб и выпучивание деталей при осадке и нарушение их соосности. Обычно при сварке круглых стержней и толстостенных труб $l = (0{,}7 \div 1{,}0)\ D$, где D — диаметр стержня или трубы.

Подогрев существенно влияет на температурное поле в свариваемых деталях (схематически показанное для конца оплавления при сварке с подогревом кривой *Б* и при непрерывном оплавлении кривой *В* на фиг. 28, *б*). По сравнению со сваркой непрерывным оплавлением при сварке с подогревом возбуждается и поддерживается интенсивное оплавление при меньшем токе, поэтому с подогревом можно сваривать детали при относительно малой удельной мощности; шире зона интенсивного нагрева, и поэтому легче деформировать детали при осадке; меньше градиент температуры, и поэтому меньше вероятность застревания окислов в стыке; меньше скорость охлаждения, и поэтому легче сваривать стали, восприимчивые к закалке.

При подогреве так же, как при сварке сопротивлением, торцы деталей нагреваются очень неравномерно (см. фиг. 44, *а*). Эта неравномерность частично сохраняется и после оплавления, что по-

нижает стабильность качества сварки, особенно деталей с развитым сечением (тонкостенных труб, листов). Кроме того, автоматизация сварки с подогревом относительно сложна. Поэтому в настоящее время стремяться шире применять сварку непрерывным оплавлением. Институтом электросварки им. Е. О. Патона разработаны специальные приемы сварки непрерывным оплавлением рельсов и др. (см. § 6).

Температура подогрева $T_{под}$ зависит от сечения свариваемых деталей и их материала. При сварке конструкционных сталей обыч-

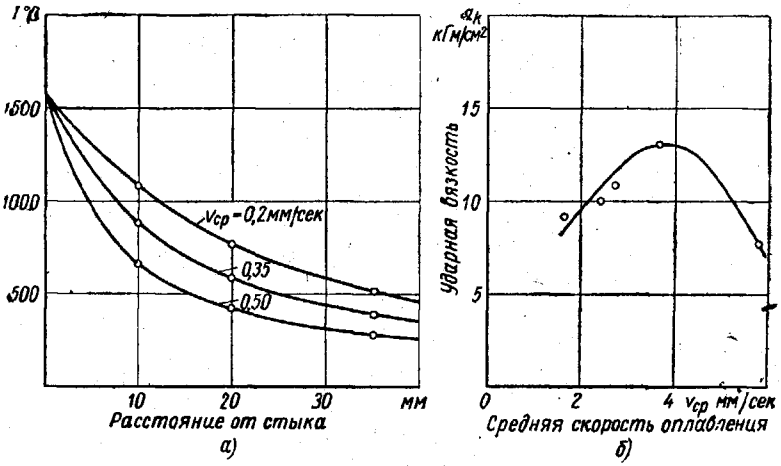


Фиг. 55. Схемы распределения температуры (средней по сечению) вдоль свариваемых деталей в процессе оплавления:
а — без подогрева; *б* — с подогревом.

но $T_{под}$ не превышает 800—900° и лишь при сварке деталей очень большого сечения достигает 1000—1100°. При сварке трудно деформируемых аустенитных сталей $T_{под}$ на 100—150° выше. Чем больше сечение деталей, тем, как правило, больше длительность подогрева ($t_{под}$). Суммарная продолжительность импульсов и пауз обычно колеблется от нескольких секунд до 1—2 мин. Иногда она достигает 5—8 мин. (например, при сварке деталей сечением более 20 000—25 000 *мм*^{2}).

Основная технологическая роль оплавления заключается в нагреве деталей. Если не учитывать неравномерного распределения температуры на оплавляемых торцах и в непосредственной близости к ним, то температурное поле при оплавлении можно приближенно считать линейным и рассматривать его как результат действия в стержне плоского подвижного источника тепла, перемещающегося по его длине с переменной скоростью 0,5 $v_{опл}$. Изменение средней температуры свариваемых деталей в процессе непрерывного оплавления схематически показано на фиг. 55, *а*. Достаточно каждую деталь оплавить на величину s_2, чтобы приблизиться к квазистационарному состоянию, при котором дальнейшее оплавление мало изменяет температурное поле, перемещающееся вдоль

деталей вместе с оплавляемым торцом. Следует отметить, что истинное квазистационарное состояние достижимо лишь при оплавлении с постоянной скоростью. Практически $\Delta_{опл}$ должно быть в 1,5—2 раза больше $2s_2$ с тем, чтобы компенсировать неравномерность нагрева торцов, а также неточность подготовки и сборки свариваемых деталей (местный зазор между торцами уменьшает фактический припуск на оплавление). Необходимый припуск обычно повы-



Фиг. 56. Графики зависимости от средней скорости оплавления:
а — температурного поля вдоль оплавляемой детали и *б* — ударной вязкости сварного соединения (сталь 1Х18Н9Т).

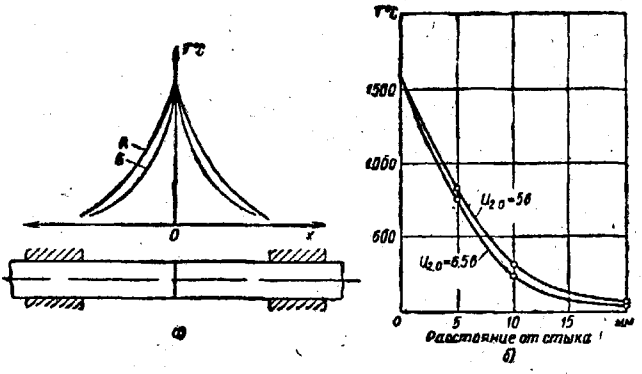
шается с увеличением диаметра стержней или толщины свариваемых листов, так как при этом (для обеспечения возможности осадки) требуется интенсивный прогрев деталей на большей длине. При оплавлении на одну и ту же величину ($\Delta_{опл}$) увеличение его средней скорости $v_{ср} = \frac{\Delta_{опл}}{t_{опл}}$ приводит, с одной стороны, к неблагоприятному сужению зоны нагрева деталей и к увеличению градиента температуры $\frac{dT}{dx}$ у оплавляемых торцов (фиг. 56, *а*), а с другой стороны, к более равномерному нагреву торцов вследствие их более интенсивного оплавления. Повышение скорости оплавления вызывает также увеличение кратеров. Поэтому как малая, так и чрезмерно большая скорость оплавления отрицательно сказываются на качестве сварного соединения (фиг. 56, *б*). Чем больше вероятность окисления свариваемого материала, тем выше оптимальная скорость оплавления. Обычно средняя скорость оплавления сталей лежит в пределах 1—3 *мм/сек*.

Для того, чтобы начать оплавление холодных деталей и устойчиво его поддерживать, сближение оплавляемых деталей должно

идти со скоростью, постепенно нарастающей от нуля до v_{max}. Малая начальная скорость оплавления способствует также прогреву деталей на большую глубину; а большая конечная скорость уменьшает опасность окисления. Оптимальная зависимость $s=f(t)$, где s — перемещение подвижной плиты сварочной машины, а t — время, в основном определяется свойствами свариваемого материала. Часто применяется параболическая зависимость

$$s=\frac{kt^b}{b}. \qquad (30)$$

Чем больше b, тем больше конечная скорость оплавления при заданном $\Delta_{опл}$ и тем глубже прогрев деталей (фиг. 57, *а*). При



Фиг. 57. Распределение температуры в деталях:

а — оплавленных при $s=\frac{kt^2}{2}$ (кривая *А*) и $s=v_{ср}t$ (кривая *Б*);

б — оплавленных при различном напряжении $U_{2\cdot0}$.

сварке малоуглеродистой стали часто $b=2$; при сварке сильно окисляющихся материалов b увеличивается.

При сварке непрерывным оплавлением деталей большого компактного сечения целесообразно ступенчатое изменение его скорости: почти весь процесс идет с небольшой скоростью (например, 0,25 *мм/сек*), обеспечивающей прогрев деталей на необходимую глубину, а заканчивается при относительно высокой скорости (1—2 *мм/сек*), предупреждающей опасность окисления.

Повышение вторичного напряжения $U_{2\cdot0}$ ускоряет разрушение перемычек при оплавлении и сужает зону разогрева (фиг. 57, *б*). Значительное повышение $U_{2\cdot0}$ ведет к нарушению устойчивости (непрерывности) процесса.

При повышении $U_{2\cdot0}$ уменьшается доля тепла $q'''_{опл}$ (см. стр. 73), идущая на непосредственный нагрев деталей. С повышением температуры деталей (по мере их оплавления) $\eta_{опл}$ также

уменьшается. Это подтверждается следующими данными (при оплавлении на 10 *мм* деталей из стали:

$U_{2\cdot0}$ в *в*	6	9	12
$\eta_{опл}=\frac{q'''_{опл}}{q_{опл}}$	0,59	0,53	0,46

При оплавлении с той же скоростью на 20 *мм* $U_{2\cdot0}=6$ *в*; $\eta_{опл}=0{,}47$, а при $\Delta_{опл}=30$ *мм* $\eta_{опл}=0{,}38$. Всегда желательно вести оплавление при минимальном напряжении, достаточном для возбуждения и поддержания процесса, так как этим обеспечивается большая глубина прогрева детали. Обычно $U_{2\cdot0}=4\div12$ *в*. При сварке непрерывным оплавлением деталей большого сечения иногда применяют программное регулирование напряжения: процесс начинается при высоком $U_{2\cdot0}$ (облегчается его возбуждение) и заканчивается при пониженном $U_{2\cdot0}$ (обеспечивается устойчивость процесса). При ступенчатом изменении скорости оплавления процесс начинается при высоком $U_{2\cdot0}$, затем напряжение снижается, а при повышении $v_{опл}$ вновь увеличивается.

Условия оплавления существенно зависят от характеристики сварочной машины. Чем меньше ее внутреннее сопротивление, тем меньше напряжение, необходимое для поддержания процесса, тем устойчивее идет процесс и тем ровнее оплавленные торцы. Это объясняется тем, что при малом сопротивлении велик ток короткого замыкания в момент образования перемычки. В результате этого перемычка быстро разрушается, не достигая больших размеров и не вызывая образования глубоких кратеров.

Применение при сварке оплавлением тока низкой частоты (10 *гц*), предложенное институтом им. Патона, целесообразно при сварке деталей большого сечения (рельсов, толстостенных труб) благодаря повышению устойчивости процесса оплавления, более равномерному нагреву (из-за меньшего влияния поверхностного эффекта) и меньшей потребляемой мощности при этом. Вследствие этого заметно снижается напряжение $U_{2\cdot0}$, необходимое для поддержания процесса оплавления.

При сварке с подогревом квазистационарное тепловое состояние наступает (в случае $v_{опл}=\text{const}$) после оплавления на меньшую величину (см. фиг. 55), чем при сварке непрерывным оплавлением. Поэтому необходимый припуск на оплавление в первом случае обычно в 1,5—3 раза меньше, чем во втором. Подогрев облегчает возбуждение оплавления и позволяет начинать его с относительно высокой скоростью [см. уравнение (27)]. Поэтому оплавление предварительно подогретых деталей часто ведут с постоянной скоростью $v_{ср}$. Лишь при сварке с подогревом деталей большого сечения желательно оплавление с нарастающей скоростью.

Распределение температуры в оплавляемых стержнях при квазистационарном состоянии не зависит от времени и опреде-

ляется теплофизическими свойствами материала (температуропроводностью a *см*^{2}/*сек*), условиями оплавления и расстоянием исследуемой точки от оплавляемого торца. Условия оплавления можно охарактеризовать его скоростью $v_{ср}$ (при оплавлении с постоянной скоростью) или ускорением k при параболической зависимости перемещение — время ($s = \frac{kt^2}{2}$). Температура T в любой точке оплавляемого стержня может быть найдена из соотношения

$$T - T_0 = \psi (T_{пл} - T_0), \tag{31}$$

где $T_{пл}$ — температура на оплавляемом торце, равная по достижению квазистационарного состояния температуре плавления материала;

T_0 — начальная температура ($T_0 \approx 0$ при непрерывном оплавлении и $T_0 = T_{под}$ при сварке с подогревом);

ψ — безразмерный параметр температуры (в зависимости от условий оплавления $\psi = \psi_\sim$, $\psi'_\sim$ или ψ').

При большой установочной длине и $v_{опл} = v_{ср} = \text{const}$ хорошо согласуется с экспериментальными данными зависимость

$$\psi_\infty = e^{-\frac{v_{ср} x}{2a}}, \tag{32}$$

где x — расстояние исследуемой точки от оплавляемого торца.

Аналогично при равномерно ускоренном оплавлении

$$\psi'_\infty = e^{-0{,}92 \left(\frac{k}{a^2}\right)^{1/3} x}. \tag{33}$$

При малой установочной длине ψ' связано с ψ'_∞ зависимостью

$$\psi' = \frac{\psi'_\infty - r}{1 - r},$$

где r — поправочный коэффициент, равный

$$r = e^{-0{,}92 \left[\left(\frac{k}{a^2}\right)^{1/3} (l + B') - 0{,}70\right]}, \tag{34}$$

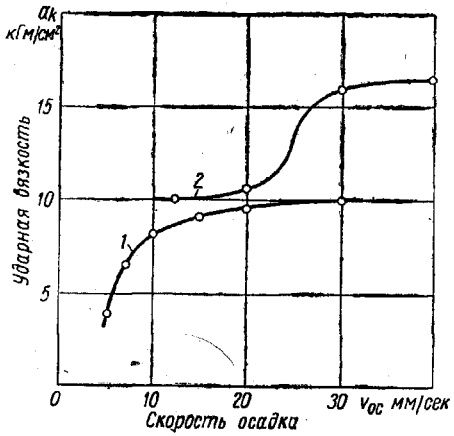
здесь l — установочная длина;

B' — толщина детали прямоугольного сечения или радиус круглого стержня.

При равномерно ускоренном оплавлении тепловое состояние, близкое к квазистационарному, достигается после оплавления на

$$\Delta_{\min} = \frac{1{,}40}{\left(\frac{k}{a^2}\right)^{1/3}}. \tag{35}$$

Приведенные эмпирические формулы пригодны для приближенных технологических расчетов. Если, например, технологически приемлема параболическая зависимость $s = f(t)$ и известны необходимая ширина зоны пластической деформации и ее минимальная температура к концу оплавления (например, $x = 2\Delta_{oc}$ и $T = 0{,}5\,T_{пл}$), то, определив ψ' и r, можно найти ψ'_{cr}, а затем рассчитать по уравнению (33) необходимое ускорение k (при известном, a, см. табл. 1). После этого по формуле (35) определяется минимальный припуск Δ_{min} и далее из уравнения $s = \frac{kt_{опл}^2}{2}$ рассчитывается продолжительность оплавления ($t_{опл}$). Технологическая роль осадки заключается в непосредственном образовании сварного соединения между нагретыми деталями. Чем выше скорость осадки v_{oc}, тем меньше Δt_1 [см. формулу (28)] и тем меньше вероятность застревания окислов в стыке. Поэтому при малой v_{oc} качество сварных соединений понижается (фиг. 58). В зависимости от состава стали минимальная допустимая скорость осадки лежит в пределах 15—40 *мм/сек*. Значительное увеличение скорости осадки (при сварке конструкционной стали выше 80—100 *мм/сек*) может иногда ухудшить качество соединений, по-видимому, из-за затрудненной пластической деформации.



Фиг. 58. Зависимость ударной вязкости сварного соединения от скорости осадки: *1* — сварка труб диаметром 42 *мм* из низколегированной стали 15ХМ; *2* — сварка труб диаметром 32 *мм* из аустенитной стали 1Х18Н12М2Т.

Величина осадки (Δ_{oc}) должна быть достаточной для полного закрытия зазора между оплавленными торцами с вытеснением из стыка всего окисленного жидкого металла и для некоторой пластической деформации нерасплавленного металла. Чем ровнее оплавленные торцы, тем меньше необходимая величина осадки (тем меньше требуемый припуск на осадку).

С увеличением диаметра свариваемых стержней, толщины листов или толщины стенки труб увеличиваются перемычки и остающиеся после них кратеры, в связи с чем должен быть увеличен припуск на осадку. Пластическая деформация при осадке распространяется вдоль оплавленных деталей на тем большее расстояние, чем шире зона интенсивного нагрева. Поэтому при сварке с подогревом Δ_{oc} обычно в 1,25—1,5 раза выше, чем при сварке таких же деталей непрерывным оплавлением. Припуск на осадку в за-

висимости от сечения свариваемых деталей обычно составляет 2—8 *мм*. Однако при сварке с подогревом деталей большого сечения, например толстостенных труб сечением 15 000—20 000 *мм*^{2}, Δ_{oc} достигает 20—30 *мм*. Часть осадки [обычно 0,5 ÷ 0,8) Δ_{oc}] производится при включенном сварочном токе, что облегчает пластическую деформацию.

Удельное давление осадки p_{oc} зависит от сечения свариваемых деталей (оно растет с увеличением диаметра стержня и толщины листа) и от условий их нагрева (при сварке непрерывным оплавлением p_{oc} обычно в 1,5—2 раза выше, чем при сварке с подогревом, обеспечивающим более равномерное распределение температуры по длине деталей). Особенно сильно влияют на p_{oc} механические свойства свариваемого материала при высокой температуре. Например, при сварке аустенитных сталей p_{oc}, как правило, в 2—3 раза выше, чем при сварке малоуглеродистой стали.

Общий ход процесса при сварке с подогревом и непрерывным оплавлением иллюстрируется (см. фиг. 47) соответствующими графиками зависимости s, P и N от t, где s — перемещение подвижной плиты стыковой машины; P — усилие сжатия деталей и N — мощность, потребляемая из сети.

Стыковая сварка осуществляется с упорами или без них. В первом случае усилие осадки P_{oc} передается свариваемым деталям через жесткие упоры, закрепленные на станине машины, и усилие зажатия деталей в электродах $P_э$, необходимое для подвода тока, относительно невелико (достаточно $P_э' = 0{,}5\ P_{cc}$).

Применение упоров практически невозможно при сварке длинных рельсов, труб или листов. При сварке без упоров усилие осадки передается свариваемым деталям силами трения, развиваемыми в зажимах. Для предупреждения проскальзывания деталей в электродах при осадке.

$$P_э \geqslant \frac{P_{oc}}{2f} = k_0 P_{oc}, \qquad (36)$$

где f — коэффициент трения между свариваемым материалом и электродом.

Здесь учтено, что трение развивается в двух плоскостях (между каждым из электродов и деталью).

Коэффициент k_0 обычно лежит в пределах от 1,5 (сварка круглых деталей из мягких сталей) до 4,0 (сварка широких холоднокатаных наклепанных листов из аустенитной стали).

§ 5. СВАРКА ОПЛАВЛЕНИЕМ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Стали, как правило, удовлетворительно свариваются оплавлением. По условиям сварки их удобно разделить на пять групп:

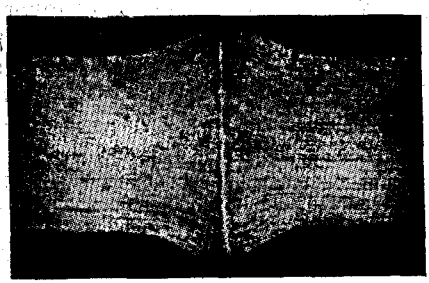
а) малоуглеродистая сталь;

б) среднеуглеродистые стали (до 0,5% С) и низколегированные стали с малым содержанием углерода (например, сталь 12ХМФ, содержащая до 0,15% С; 1,0% Cr; 0,5% Mo и 0,25% V);

в) высокоуглеродистые нелегированные и легированные стали (например, сталь ШХ15, содержащая ~1% С и более 1% Cr);

г) высоколегированные малоуглеродистые перлитные стали (например, сталь 15Х5МА, содержащая 0,15% С; 5% Cr и 0,5% Mo);

д) аустенитные стали (например, сталь 1Х18Н9, содержащая 18% Cr и 9% Ni).



Фиг. 59. Искривление волокон вблизи стыка, сваренного оплавлением (малоуглеродистая сталь).

Малоуглеродистая сталь хорошо сваривается без подогрева и с подогревом. Подогрев целесообразен при сварке деталей большого компактного сечения. В хорошем соединении отсутствуют поры, трещины, непровар и значительные неметаллические включения. Рядом со стыком выявляется искривление волокон (фиг. 59). В стыке наблюдается обезуглероживание (см. гл. 1, § 2 и фиг. 15, *а*). Например, при сварке стали с 0,25% С содержание углерода в стыке падает до 0,1%. Это вызывает местное понижение твердости в стыке. В околошовной зоне иногда растет зерно и наблюдается видманштедтово строение (см. фиг. 20, *в*), вследствие чего возможно понижение пластичности соединения. Его прочность, как правило, не ниже прочности основного металла. При отсутствии концентраторов напряжений пределы усталости сварного соединения и основного металла близки. Рассмотрим параметры режима сварки малоуглеродистой стали.

Наименьшая удельная мощность (0,03—0,05 *ква/мм²*) используется в мелкосерийном производстве при сварке с подогревом деталей большого сечения. Обычно при сварке с подогревом удельная мощность лежит в пределах 0,08—0,12 *ква/мм²*. При сварке непрерывным оплавлением в массовом производстве удельная мощность достигает 0,2—0,4 *ква/мм²*, а при сварке кольцевых деталей с одним стыком вследствие шунтирования тока — 0,3—0,6 *ква/мм²*.

Плотность тока при оплавлении с подогревом $j = 5 \div 15$ *а/мм²* (в момент самого подогрева, а также при осадке она в 2—4 раза выше), а без подогрева — 8—40 *а/мм²*. Иногда при сварке непрерывным оплавлением деталей большого сечения и малой скорости оплавления плотность тока понижается до 2—3 *а/мм²*.

Длительность сварки $t_{св}$ включает время на подогрев (если он применяется), оплавление и осадку. Для определения продолжительности сварочной операции к $t_{св}$ следует прибавить время на

их установку, закрепление и съем свариваемых деталей. Чем меньше их сечение и больше удельная мощность, тем, как правило, меньше $t_{св}$ (табл. 2). С увеличением сечения $t_{св}$ быстро растет. Средняя скорость оплавления малоуглеродистой стали обычно составляет 0,8—1,5 *мм/сек* (иногда при сварке деталей большого сечения она снижается до 0,25 *мм/сек*). При непрерывном оплавлении максимальная его скорость перед осадкой может достигать 4—5 *мм/сек*.

Припуск на оплавление ($\Delta_{опл}$) при сварке с подогревом обычно на 30—50% ниже, чем при непрерывном оплавлении (табл. 2). При-

Таблица 2

Ориентировочная длительность сварки оплавлением деталей из малоуглеродистой стали и припуски (суммарные для обеих свариваемых деталей)

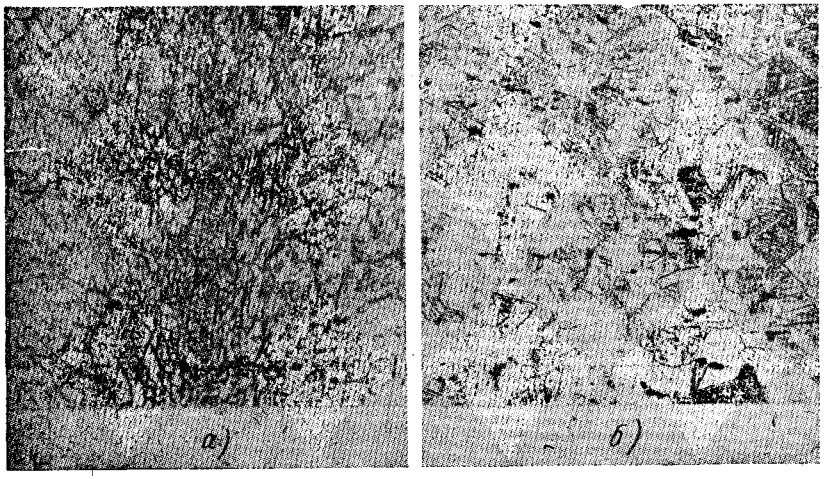
Диаметр свариваемой детали в *мм*	Сварка с подогревом					Сварка непрерывным оплавлением			
	Время в сек.		Припуск в *мм*			Время в сек.	Припуск в *мм*		
	на подогрев	на оплавление и осадку	общий	на подогрев и оплавление	на осадку		общий	на оплавление	на осадку
5	—	—	—	—	—	2	6	4,5	1,5
10	—	—	—	—	—	3	8	6	2
15	3	4	9	6,5	2,5	6	13	10,5	2,5
20	5	6	11	7,5	3,5	10	17	14	3
30	8	7	16	12	4	20	25	21,5	3,5
40	20	8	20	14,5	5,5	40	40	35,5	4,5
50	30	10	22	15,5	6,5	—	—	—	—
70	70	15	26	19	7	—	—	—	—
90	120	20	32	24	8	—	—	—	—

пуск на осадку, наоборот, при сварке с подогревом выше в связи с более широкой зоной нагрева и пластической деформации. Скорость осадки при сварке малоуглеродистой стали не должна быть ниже 15—20 *мм/сек*.

Удельное давление осадки зависит от условий нагрева. При сварке малоуглеродистой стали с подогревом $p_{ос} = 3 \div 5$ *кГ/мм²*; при ее сварке непрерывным оплавлением $p_{ос} = 6 \div 8$ *кГ/мм²*.

При сварке среднеуглеродистых и низколегированных сталей приходится на 25—50% повышать $p_{ос}$ в связи с их большей прочностью при высоких температурах. Повышение содержания в стали углерода уменьшает вероятность окисления в зоне сварки и поэтому не вызывает затруднений при сварке оплавлением. Получение соединений, свободных от окислов, при сварке

низколегированных сталей, в частности, сталей с ванадием, требует повышения скоростей оплавления (перед осадкой $v_{max} \geqslant 4 \div 5$ *мм/сек*) и осадки ($v_{oc} \geqslant 30$ *мм/сек*). При качественно выполненной сварке прочность и пластические свойства соединений вполне удовлетворительны (обычно и без термической обработки после сварки).



Фиг. 60. Микроструктура соединения аустенитной стали, сваренного оплавлением:
а — до термообработки; *б* — после термообработки.

Особенности сварки высокоуглеродистых сталей связаны со значительным температурным интервалом их кристаллизации и большой восприимчивостью к закалке. Иногда при сварке с подогревом на расстоянии 1,0—2,0 *мм* от стыка наблюдаются мелкие усадочные раковины (см. фиг. 18, *в*), возникающие в частично расплавленной стали, не удаляемой полностью при осадке. Борьба с этой рыхлостью возможна двумя путями: снижением степени подогрева (уменьшением зоны частичного расплавления) и увеличением давления осадки (до 6—8 *кГ/мм*^{2}), способствующим удалению частично расплавленного металла и его уплотнению при пластической деформации.

Закалка зоны стыка приводит к хрупкости, а при сварке деталей большого сечения иногда и к трещинам. Степень закалки уменьшается при применении подогрева, замедляющего охлаждение. Однако лучшие результаты дает сварка на «жестком» режиме (узкая зона нагрева исключает образование рыхлости) с последующей термообработкой. Интенсивное выделение окиси углерода

позволяет сваривать высокоуглеродистые стали при умеренных скоростях оплавления и осадки.

При сварке высоколегированных перлитных сталей необходимо учитывать их закаливаемость и высокое сопротивление пластической деформации. После сварки изделия из этих сталей обычно подвергаются местной (в зоне стыка) или общей термообработке (нормализации или высокому отпуску). При их сварке желательны повышенные скорости оплавления и осадки. В зависимости от рода и степени легирования давление осадки повышается на 50—100% по сравнению с p_{oc} при сварке таких же деталей из малоуглеродистой стали.

Аустенитные стали хорошо свариваются оплавлением при условии интенсивного оплавления и осадки с большой скоростью, что связано с высоким содержанием в стали хрома, образующего тугоплавкие окислы типа Cr_2O_3. При сварке с подогревом скорость оплавления не должна быть ниже 2,5—3 *мм/сек*; при непрерывном оплавлении его скорость перед осадкой $v_{max} > 5 \div 6$ *мм/сек*. Скорость осадки должна быть не менее 30—50 *мм/сек*. Припуски на оплавление и осадку при сварке аустенитных сталей приблизительно такие же, как для малоуглеродистой стали, а необходимое давление осадки, в 2—3 раза выше из-за их жаропрочности (иногда p_{oc} превышает 25 *кГ/мм*^{2}). Несоблюдение этих требований приводит к появлению в стыке окислов, резко понижающих пластичность. Чем больше в стали хрома, тем труднее избежать окисления в стыке.

В структуре стыка заметна темная полоска с сильно деформированными зернами (фиг. 60, *а*). После термообработки (нагрев до 1100° с охлаждением на воздухе) структура выравнивается (фиг. 60, *б*). Как правило, термообработка после сварки оплавлением аустенитных сталей не требуется, так как прочность, пластичность и коррозионная стойкость термически не обработанных соединений вполне удовлетворительны. Высокие параметры процесса сварки аустенитных сталей приводят к тому, что эти стали часто не удается хорошо сварить на серийных машинах, предназначенных для сварки конструкционных сталей.

Дефекты, встречающиеся при стыковой сварке, можно разделить на три группы: а) неправильность формы сварного узла; б) дефекты макроструктуры и в) дефекты микроструктуры.

К первой относятся смещение осей и перекос деталей, могущие понизить прочность соединения и затрудняющие его механическую обработку. Эти дефекты вызываются неточностью заготовки и установки свариваемых деталей, ненадежным креплением электродов, малой жесткостью сварочной машины.

Основные дефекты макроструктуры: непровар (см. фиг. 15, *б* и *в*), расслоение, трещины рыхлость (см. фиг. 18, *в*). Чаще других встречается непровар, резко снижающий механические свойства со-

единения (особенно его пластичность). Непровар вызывается недостаточным нагревом и сильным окислением. К дефектам третьей группы относятся значительный рост зерна, наличие хрупких структурных составляющих, загрязнение стыка неметаллическими включениями. Качество стыковых соединений контролируется осмотром и обмером деталей, механическим испытанием части или всех сваренных деталей (например, при растяжке обода колеса, см. § 6), испытанием контрольных образцов, металлографическим исследованием. Наиболее опасным скрытым дефектом является непровар. Из-за ничтожной толщины залегающих в стыке окисных пленок рентгено- и гамма-просвечивание, а также обычно магнитная дефектоскопия не обнаруживает непровара. Даже ультразвуковые колебания не всегда отражаются от непроваренных участков, и поэтому ультразвуком можно обнаружить только грубые дефекты, например, при сварке толстостенных труб. Отсутствие в настоящее время неразрушающих методов контроля сварных стыков заставляет тщательно контролировать технологический процесс сварки, который должен предварительно и периодически проверяться испытанием контрольных образцов. Лучшие результаты дает автоматизация процесса с использованием непрерывного оплавления.

§ 6. СВАРКА ОБОДЬЕВ КОЛЕС, РЕЛЬСОВ, ТРУБ, ЛИСТОВ И ЗВЕНЬЕВ ЦЕПЕЙ

Ободья колес автомобиля свариваются непрерывным оплавлением на автоматических машинах мощностью до 750 *ква* с производительностью 200—250 шт. в час. Заготовка обычно имеет спрямленные концы (см. фиг. 41, *а*). Для облегчения пластической деформации почти вся осадка идет при включенном токе. Грат и высаженный металл удаляются на специальном станке с двумя резцовыми головками, срезывающими излишек металла с внутренней и наружной стороны стыка, или на прессе вгорячую (до остывания стыка). Далее обод калибруется, для чего он сначала растягивается в экспандере (на 1,5—2%), а затем обжимается до заданного размера. При растяжке обод упрочняется благодаря наклепу. Одновременно испытывается его стык. Плохие стыки в экспандере разрушаются. В практике известны случаи сварки с подогревом колец сечением до 10 000 *мм*^{2} при диаметре около 1500 *мм* на машинах мощностью 1000 *ква*.

При сварке небольших колец из-за шунтирования тока необходимая мощность на 15—50% больше, чем при сварке незамкнутых деталей одинакового сечения. Ток в шунте $I_ш$ (фиг. 61, *а*) растет с уменьшением его сопротивления, что следует из уравнения

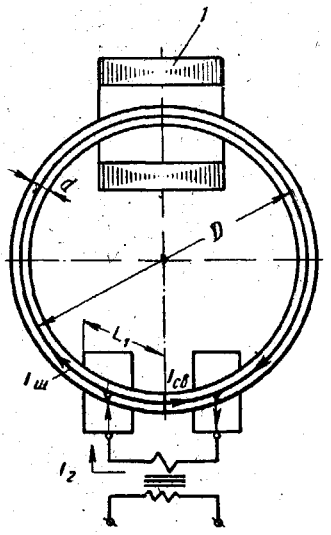
$$I_ш = I_{св} \frac{R_к + 2R_{ст}}{\sqrt{R_ш^2 + X_{Lш}^2}}, \qquad (37)$$

где $R_к + 2R_{ст}$ — сопротивление зоны сварки;
$R_ш$ и $X_{Lш}$ — соответственно активное и индуктивное сопротивление шунта.

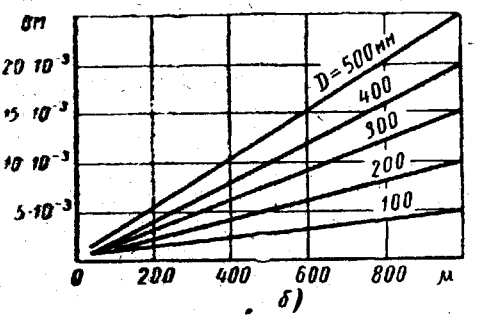
Активное сопротивление шунта

$$R_ш = m\rho_0 \frac{\pi D - 2L_1}{F}, \qquad (38)$$

где m — коэффициент поверхностного эффекта; при диаметре стержня до 20 *мм* или толщине полосы $\delta \leqslant 10$ *мм* $m \approx 1{,}0$; при больших размерах m определяется по формулам (11) и (12);
D и F — ответственно диаметр и сечение кольца;
L_1 — расстояние от конца электрода до стыка.



а)



б)

Фиг. 61. Шунтирование тока при сварке кольцевой детали:
а — схема токов; *б* — зависимость индуктивного сопротивления шунта от μ и D ($f = 50$ *гц*, малоуглеродистая сталь, $D/d = 10$).

Ток в сварочной цепи I_2 равен геометрической сумме $I_{св}$ и $I_ш$. Индуктивное сопротивление кольца диаметром D, загнутого из стержня диаметром d при частоте тока f и относительной магнитной проницаемости μ [см. формулу (12)], равно

$$X_{Lш} = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \pi f D \left(\ln \frac{8D}{d} + \frac{\mu}{4}\right). \qquad (39)$$

Величина μ определяется так же, как в расчетах коэффициента поверхностного эффекта (см. гл. II, § 3). Индуктивное сопротивление кольца (фиг. 61, *б*) растет с увеличением его диаметра и величины μ (которая уменьшается с увеличением тока.) График построен для $f = 50$ *гц* и $\frac{D}{d} = 10$. Для расчета $X_{Lш}$ необходимо задаться ожидаемым значением $I_ш$, определить по нему μ и $X_{Lш}$, а

затем подсчитать $I_ш$ по формуле (37). Затем методом последовательного приближения добиваются согласованных значений тока в шунте и его сопротивления. Иногда для уменьшения $I_ш$ увеличивают $X_{Lш}$, надевая на свариваемое кольцо разъемное железное ярмо *1* (фиг. 61, *а*).

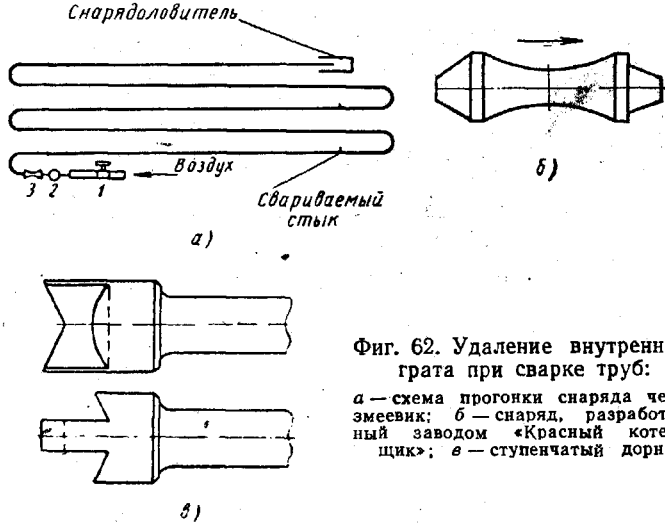
Сварка рельсовых стыков широко применяется на транспорте. Нормальные рельсы имеют сечение 5000—8000 *мм*² и прокатываются из стали, содержащей до 0,9% С. Рельсы свариваются в стационарных или передвижных мастерских оплавлением с подогревом на автоматических машинах мощностью 200—350 *ква* или непрерывным оплавлением на машинах с программным изменением напряжения. Разработано оборудование (подвесная машина К-134) и для сварки рельсов в пути (институтом им. Е. О. Патона).

Рельсы поступают на сварку с перпендикулярно обрезанными торцами. Их концы, зажимаемые в электродах, очищаются. После сварки горячий грат обрубается пневматическим зубилом. Затем стык шлифуется по периметру, что повышает его усталостную прочность и срок службы. Качество сварки контролируется осмотром, иногда — магнитным дефектоскопом. Периодически испытываются на изгиб контрольные образцы. При этом разрушающая нагрузка и прогиб характеризуют прочность и пластичность стыка. Рельсы (сечением около 6000 *мм*²) свариваются с подогревом по следующему режиму: установочная длина 55—60 *мм*; припуск на подогрев и оплавление 20 *мм*; скорость оплавления около 1 *мм/сек*; припуск на осадку 7—9 *мм*, давление осадки около 4 *кГ/мм*², скорость осадки 15 *мм/сек*; продолжительность сварки 180—220 сек. Производительность сварочной установки достигает 10—12 стыков в час и выше.

При таком режиме обеспечивается широкая зона нагрева и умеренная скорость охлаждения. Твердость в стыке не превышает *НВ* 250—280 *кГ/мм*². Термически не обработанный стык прочен при невысокой пластичности. Такие стыки иногда зимой хрупко разрушаются в пути. Местная нормализация подошвы рельса в стыке устраняет это явление. Общая нормализация стыка нежелательна из-за снижения усталостной прочности.

Институтом электросварки им. Патона рекомендован следующий режим сварки непрерывным оплавлением рельсов сечением 6000 *мм*² (Р50) в полевых условиях; продолжительность сварки 120 сек.; напряжение в начале и конце процесса 6,0 *в*, минимальное 3,5 *в*; скорость оплавления 0,25 *мм/сек*; перед осадкой 1,5 *мм/сек*; плотность тока перед осадкой 2,8 *а/мм*², величина осадки 11 *мм*. Длительность сварки рельсов непрерывным оплавлением почти вдвое меньше, чем при сварке с подогревом. Сужение зоны нагрева вызывает незначительное повышение твердости в стыке (на 20—30 *кГ/мм*²) при повышении его прочности и пластичности.

Сварка оплавлением труб широко применяется в котло- и аппаратостроении, а также на строительстве трубопроводов. В котлостроении трубы диаметром до 60—80 *мм* с толщиной стенки до 6 *мм* преимущественно свариваются непрерывным оплавлением. Змеевики из труб диаметром 25—42 *мм* свариваются из предварительно загнутых элементов (фиг. 62, *а*), а иногда они по-



Фиг. 62. Удаление внутреннего грата при сварке труб:

а — схема прогонки снаряда через змеевик; *б* — снаряд, разработанный заводом «Красный котельщик»; *в* — ступенчатый дорн.

лучаются путем гибки плети длиной 40 *м* и более, сваренной из прямых труб. Для обеспечения проходного отверстия в стыке (его диаметр должен быть не менее 86—90% внутреннего диаметра трубы) грат и высаженный в стыке металл должны быть почти полностью удалены.

При сварке гнутых элементов для этого может применяться снаряд (фиг. 62, *б*), криволинейный профиль которого облегчает его проход через гибы труб. Немедленно после сварки стыка в змеевик краном *1* (фиг. 62, *а*) подается сжатый воздух (6—8 *ати*), увлекающий с большой скоростью уплотняющий резиновый шар *2* и закаленный стальной снаряд *3*, срезающий при своем движении горячий грат.

При сварке прямых труб грат часто срезают дорном (фиг. 62, *в*), пробиваемым через горячий стык. Эта операция механизирована с помощью пневматической «пушки» — длинного воздушного цилиндра, поршень которого жестко связан с нерабочим концом штанги дорна. При сварке труб из перлитных сталей грат легко удаляется продувкой горячего стыка воздушно-кислородной смесью (около 75% O_2). Для этого после осадки в течение 1—1,5 сек. в трубу подается смесь O_2 и воздуха требуемого состава.

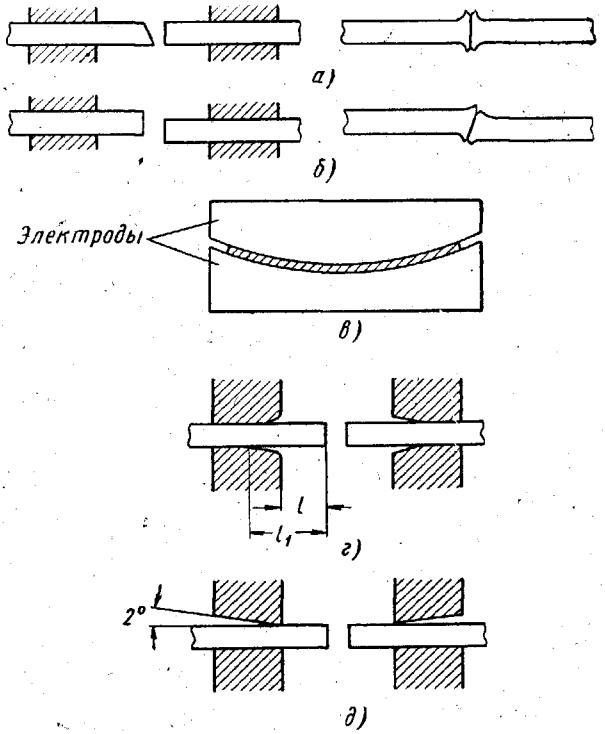
Пользоваться чистым кислородом нельзя из-за опасности сжигания металла трубы рядом со стыком и утоньшения ее стенки.

Толстостенные трубы большого диаметра обычно сваривают с подогревом. При этом полезна газовая защита, уменьшающая опасность окисления. В частности, трубы диаметром 172—196 *мм* с толщиной стенки 25—35 *мм* из 3%-ной хромистой стали, дополнительно легированной Mo, W и V, сваривают на машине мощностью 650 *ква* с защитой продуктами разложения бензина (по технологии ЦНИИТМАШа). Перед сваркой концы труб на расстоянии 100—150 *мм* от стыка забиваются шлаковатой, а внутрь этих концов на расстоянии 40—60 *мм* от стыка закладываются тампоны из шлаковаты, смоченной в бензине. При нагреве бензина без доступа воздуха интенсивно выделяются газы, содержащие много водорода и CO. Трубы диаметром 172×25 *мм* (сечением около 10 000 *мм*^{2}) свариваются по режиму: усилие зажатия 110 *т*, подогрев в течение 270 сек. приблизительно до 1250°; оплавление на 15 *мм* со скоростью около 1 *мм/сек* при $U_{2\cdot0} = 9 \div 10$ *в*; осадка на 18—20 *мм*.

При строительстве магистральных трубопроводов применяется сварка труб большого диаметра непрерывным оплавлением, разработанная институтом им. Патона. Кольцевой трансформатор (см. § 2, гл. IX) обеспечивает равномерный подвод сварочного тока по периметру трубы и резко понижает сопротивление сварочного контура. Поэтому устойчивое оплавление идет при малой удельной мощности (0,015—0,025 *ква/мм*^{2}), что существенно при сварке на трассе, когда машина питается передвижной электростанцией. Трубы диаметром 529×8 *мм* оплавляются на 25 *мм* в течение 40—50 сек. при напряжении 7 *в* и мощности генератора 275 *ква*. Для облегчения возбуждения оплавления концы труб скашивают под небольшим углом. Осадка производится на 12—15 *мм* при удельном давлении до 5 *кГ/мм*^{2}. Наружный грат срубают зубилом, а внутренний сбивается гратобойкой, вводимой в плоскость стыка после сварки. При быстром вращении электродвигателем шарнирно закрепленные на траверсе гратобойки пакеты стальных пластин благодаря центробежным силам сбивают грат и несколько сглаживают поверхность высаженного металла в стыке. Хорошая сварка требует тщательной сборки труб (смещение их кромок при сборке не должно превышать 1,5 *мм*; после сварки — 2 *мм*). Трудность обеспечения такой сборки из-за неточности концов труб мешает более широкому применению их контактной сварки.

Сварка листов производится непрерывным оплавлением, обеспечивающим равномерный нагрев по длине стыка. В цехах холодного проката успешно свариваются концы полос из малоуглеродистой и легированных перлитных и аустенитных сталей, а также из сплавов на никелевой основе (нихромы, пермалои и др.). Качественное соединение, допускающее последующую холодную прокатку, возможно только при отсутствии смещения кромок. Их косой

срез (фиг. 63, *а*) выравнивается при оплавлении и дает стык без смещения. Зажатие в машине со смещением правильно обрезанных кромок (фиг. 63, *б*) ведет к перекосу при оплавлении и смещению в стыке. При отношении ширины листа B к его толщине δ более 500 центровка кромок часто затруднена. Иногда при $\delta \leqslant 1{,}0$ *мм* при-

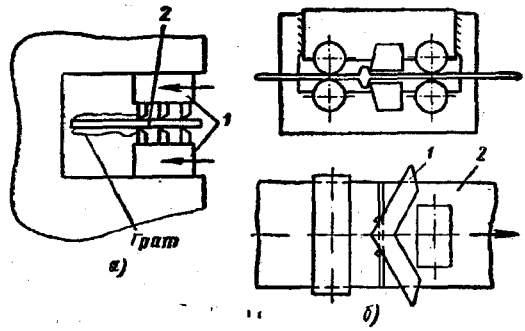


Фиг. 63. Установка тонких листов при сварке в стык:
а — соосный стык при косом срезе кромок; *б* — смещенный стык при неправильной установке листов; *в* — криволинейные электроды для сварки широких листов тоньше 1 *мм*; *г* — изменение установочной длины при деформированных электродах; *д* — скошенные верхние электроды.

меняются криволинейные электроды (фиг. 63, *в*), увеличивающие жесткость кромок. Во избежание деформации кромок при оплавлении и особенно при осадке установочная длина листов делается минимальной. Например, при сварке листов толщиной 3 *мм* она равна 12 *мм*, а конечное расстояние между электродами после сварки не превышает 6—8 *мм*. Решающее значение имеет правильная форма электродов. При деформированных электродах (фиг. 63, *г*) фактическая установочная длина растет ($l_1 \gg l$). Хорошие результаты может дать разработанный в ГДР способ зажатия листов верхней

скошенной стальной губкой (фиг. 63, *д*), гарантирующей заданную установочную длину.

Сварка тонких листов характеризуется следующими параметрами: удельная мощность 0,2—0,25 *ква/мм²*; средняя скорость оплавления 2—4 *мм/сек* (более высокая для аустенитных сталей); давление осадки 8—12 *кГ/мм²* для малоуглеродистой стали и 25—35 *кГ/мм²* для аустенитных сталей и жаропрочных сплавов. Широкие листы толщиной 2,5—3,0 *мм* свариваются с оплавлением на



Фиг. 64. Схема срезки грата при стыковой сварке листов:
а — многорезцовыми головками; *б* — косыми ножами.

10—12 *мм* и осадкой на 4—5 *мм*. Во избежание проскальзывания листов из перлитных и аустенитных сталей усилие зажатия должно быть соответственно не ниже 3,3 P_{oc} и 3,9 P_{oc} (P_{oc} — усилие осадки).

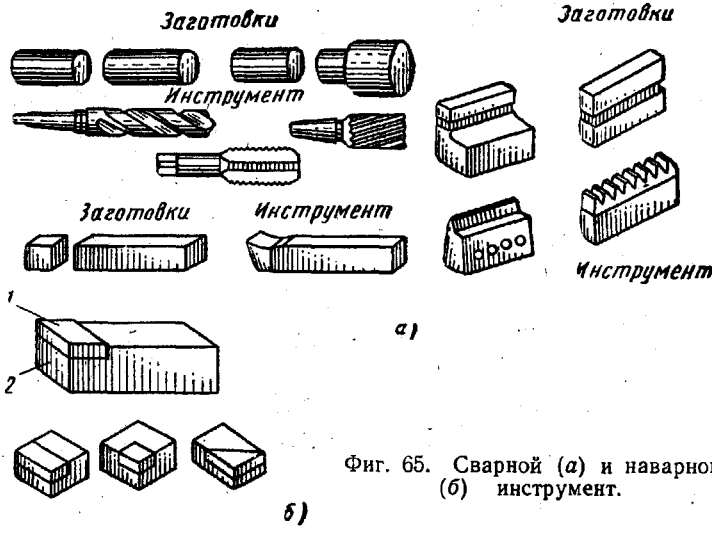
Грат срезается в специальных машинах многорезцовыми головками, перемещающимися вдоль неподвижного стыка (фиг. 64, *а*) или неподвижными косыми ножами *1*, между которыми протягивается лист *2* (фиг. 64, *б*). Для уменьшения наклепа в стыке, затрудняющего последующую холодную прокатку, желательно срезать грат вгорячую немедленно после сварки. При сварке интенсивно закаливающихся сталей (например, инструментальных) стык термически обрабатывается. Отпуск с нагревом т. в. ч. в петлевом индукторе до 750° С в течение 15 сек. стыков ленты из сталей, содержащих 0,7—1,2% С, уже обеспечивает возможность последующего удаления грата резцами и холодной прокатки.

Звенья цепей диаметром до 19 *мм* обычно сваривают сопротивлением с одним стыком на специальных автоматах, производящих отрезку заготовок, их гибку и сварку с производительностью до 200 звеньев в час. Цепи большего калибра сваривают оплавлением, обеспечивающим лучшее качество соединений из полузвеньев (см. фиг. 41, *б*). Наиболее однородное качество стыков по-

лучается при сварке непрерывным оплавлением на автоматических машинах. При этом возможна сварка цепей диаметром 25—40 *мм* с производительностью 75—50 звеньев в час. Иногда на торцах полузвеньев большого диаметра предварительно высаживают выступы, облегчающие начало оплавления.

§ 7. СВАРКА ЗАГОТОВОК ИНСТРУМЕНТА

Для экономии быстрорежущей стали из нее обычно делается рабочая часть инструмента (сверла, развертки и др.), а хвостовая часть или державка выполняется из дешевой углеродистой или низколегированной стали. Составной инструмент бывает сварным и наварным. В первом случае применяют сварку оплавлением

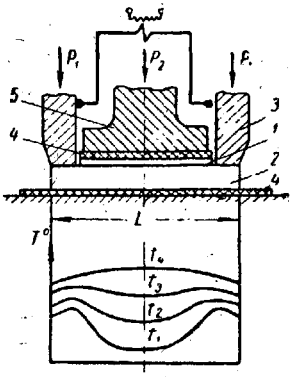


Фиг. 65. Сварной (*а*) и наварной (*б*) инструмент.

(обычно с подогревом). Несколько типов сварного инструмента показано на фиг. 65, *а*. В наварном инструменте пластинка *1* из быстрорежущей стали «наваривается» на державку *2* (фиг. 65, *б*). Такую конструкцию применяют для резцов, вставных зубьев фрез и т. п. Сварка оплавлением в этом случае нецелесообразна из-за относительно большой потери дорогого металла пластинки на оплавление и осадку и перегрева пластинки. Иногда применяют сварку по способу Игнатьева, а чаще — пайку. При сварке заготовок инструмента по способу Игнатьева (фиг. 66) пластинку *1* из инструментальной стали укладывают на державку *2*, ток к которой подводится электродами *3*. Для уменьшения потерь тепла служат асбестовые прокладки *4*. При медленном нагреве и выборе соответствующего усилия P_1, контролирующего тепловыделение в кон-

тактах с электродами и отвод тепла в них, температура почти одинакова по всей длине и сечению деталей. По достижению заданной температуры (около 1300°) пластинка и державка обжимаются прессом 5 (усилием P_2) и свариваются в пластическом состоянии.

При изготовлении сварного инструмента применяется быстрорежущая сталь Р18, содержащая 0,68—0,8% C; 17,5—18,5% W; 1,0—1,4% V и 3,8—4,8% Cr или ее заменители с меньшим содержанием дорогого вольфрама (например Р9, содержащая в среднем 0,9% C; 9% W; 2,3% V и 4,3% Cr). Технология сварки этих сталей определяется следующими их свойствами:



Фиг. 66. Схема сварки заготовок инструмента по способу Игнатьева и распределение температуры вдоль заготовок в различные моменты времени ($t_1 - t_4$).

а) низкой тепло- и электропроводностью: при $T = 20°$ для Р18 $\lambda = 0{,}055$ *кал/см · сек°* С, а для стали с 0,3% С $\lambda = 0{,}1$ *кал/см · сек* °С; соответственно $\rho_0 = 48 \cdot 10^{-6}$ *ом · см* и $18—22 \cdot 10^{-6}$ *ом · см*); это компенсируется при сварке большей (на 30—50%) установочной длиной заготовки из углеродистой стали;

б) способностью интенсивно закаливаться; для борьбы с возможным образованием трещин применяют подогрев и замедленное охлаждение после сварки (в печи, иногда в теплоизолирующей среде); сваренные заготовки обязательно отжигаются;

в) чувствительностью к перегреву (при нагреве стали Р18 выше 1320°, а стали Р9 выше 1270° границы зерен частично оплавляются с образованием после охлаждения чрезвычайно хрупкой ледебуритной эвтектики, не растворимой при нормальной термообработке этих сталей); для удаления из стыка перегретого металла должна применяться достаточно большая осадка.

Установочная длина заготовок из быстрорежущей стали диаметром D составляет $(0{,}5 \div 1{,}0)\ D$. Она не должна быть меньше 10 *мм* с тем, чтобы уменьшить теплоотвод в электроды и избежать чрезмерной закалки.

Заготовки подогреваются до 1100—1200° на участке длиной 5—10 *мм* и оплавляются со скоростью не менее 1—1,5 *мм/сек*. При хорошем прогреве давление осадки составляет 3—4 *кГ/мм²*. В табл. 3 приведены параметры режима стыковой сварки с минимальными припусками, разработанные Всесоюзным инструментальным институтом (ВНИИ) .В заводской практике припуски иногда несколько выше (на 30—40%).

После сварки горячие заготовки помещают на 8—12 час. в печь с $T = 740 \div 760°$, затем их медленно охлаждают до 400°, выдер-

Таблица 3

Основные параметры режима стыковой сварки заготовок инструмента

Диаметр заготовок в *мм*	Удельная мощность в *ква/см²*	Вторичное напряжение холостого хода в *в*	Установочная длина для стали в *мм*		Припуски на сварку для стали в *мм*		Распределение общего припуска на сварку в *мм*	
			инструментальной	углеродистой	инструментальной	углеродистой	на подогрев и оплавление	на осадку
12—18	10—8	3,8—4,0	12	20	4	2	3,5	2,5
19—25	8—7	4,0—4,3	15	20	4	2	3,5	2,5
26—30	7—6	4,3—4,5	15	20	4	3	4,5	2,5
31—40	6—7,5	4,5—5,5	20	25	5	3	5,0	3,0
41—50	4,5—3,5	5,5—6,5	25	30	5	4	5,5	3,5

живают при этой температуре около 6 час. и охлаждают на воздухе. После этого твердость в зоне сварки не превышает 25 *RC* и производится правка и предварительная механическая обработка заготовок. Затем после закалки и отпуска их шлифуют для придания окончательной формы.

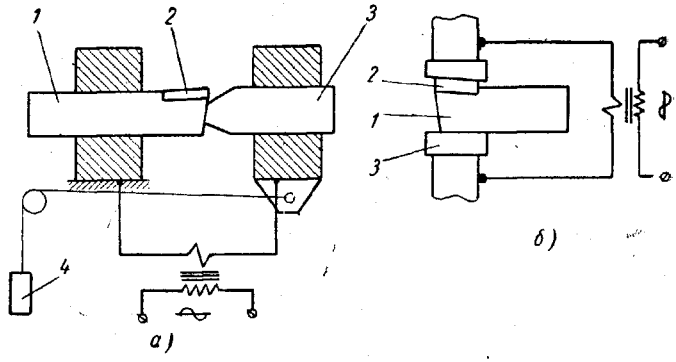
При отсутствии печи рядом со стыковой машиной сваренные заготовки медленно охлаждают, например, в хлопьях слюды. Это позволяет избежать трещин, но не исключает закалки в зоне стыка. Перед механической обработкой такие заготовки отжигают.

Исходная длина заготовок назначается с припусками на сварку (см. табл. 3) и механическую обработку (1,5—3 *мм* для заготовок диаметром 6—60 *мм*). Кроме того, заготовка из инструментальной стали удлиняется на величину зоны перегрева (4—10 *мм*), в которой понижаются режущие свойства.

Качество сварки инструмента обычно проверяется обмером, осмотром и так называемой отбойкой ударами заготовки о край наковальни. Место удара находится на углеродистой стали рядом со стыком. После каждого удара заготовку поворачивают вокруг своей оси. При таком испытании заготовки с непроваром, трещинами и значительным перегревом обычно разрушаются.

Пайка инструмента иногда производится нагревом в стыковой или точечной машине (чаще в печах или соляных ваннах). Державка *1* с пластинкой *2* и припоем (фиг. 67, *а*) закрепляется на одном электроде стыковой машины; к торцу державки подводится ток медной колодкой *3*, закрепленной во втором электроде. Интенсивность нагрева зависит от усилия прижатия колодки. Его постоянство достигается применением груза *4*. Иногда державка *1* с пластинкой *2* непосредственно зажимается между электродами *3* точечной машины (фиг. 67, *б*). При этом между пластинкой и державкой

насыпается тонкий слой порошка (припоя с флюсом), состоящего из ферромарганца, иногда с добавкой меди (для понижения температуры плавления) и буры. Заготовки нагреваются импульсами



Фиг. 67. Напайка пластинок:
а — на стыковой машине и *б* — на точечной.

тока до появления капелек расплавленного порошка, температура плавления которого (в пределах 1200—1290°) подбирается по составу инструментальной стали так, чтобы избежать ее перегрева.

§ 8. СВАРКА ОПЛАВЛЕНИЕМ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Сварка оплавлением меди затруднительна из-за ее высокой теплопроводности: не удается создать на торцах необходимый слой расплавленного металла и поддерживать устойчивое оплавление.

Сварка латуни вследствие опасности выгорания цинка и высокой тепло- и электропроводности должна производиться без подогрева с большой скоростью оплавления (средняя скорость 6—8 *мм/сек*) и осадки (55—65 *мм/сек*) при значительной удельной мощности (до 2,5 *ква/мм*^{2}). Для удаления из стыка загрязненного металла осадка прутков диаметром 6—12 *мм* производится на 9—13 *мм* при $p_{oc} \approx 25$ *кГ/мм*^{2}. При этом стыки деталей из однофазной α-латуни (Л62) равнопрочны основному металлу и допускают волочение. В стыках α + β-латуни (ЛС59-1) в результате быстрого охлаждения наблюдается закалка, повышающая твердость *НВ* (со 130 до 170 *кГ/мм*^{2}). Пластичность стыка обеспечивается отпуском при 600—650°.

Латунь и медь хорошо свариваются со сталью. При этом стальная заготовка оплавляется на (1÷1,5) *D*, а медная или латунная — незначительно. Поэтому при сварке стальной заготовки с медной установочная длина первой значительно больше, чем второй (соответственно 3,5 *D* и 1,5 *D*).

Алюминиевые сплавы хорошо свариваются при условии интенсивного, непрерывного оплавления и значительной осадки с большой скоростью. Эти требования связаны со склонностью алюминия к образованию тугоплавкой пленки Al_2O_3. Состав сплава может существенно влиять на условия его сварки (табл. 4). Напри-

Таблица 4

Параметры режима сварки оплавлением алюминиевых сплавов (деталь толщиной 6 *мм*)

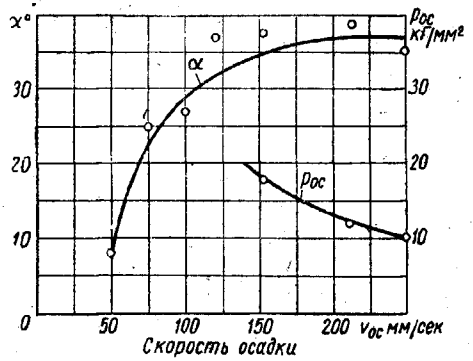
Параметр	АМг6	АК6
Установочная длина в *мм*	18+18	14+1
Оплавление:		
припуск в *мм*	14	10
средняя скорость в *мм/сек*	2,8	7
конечная скорость в *мм/сек*	6	15
напряжение в *в*	8—10	7—8
удельная мощность в *ква/мм²*	0,4	0,4
Осадка:		
припуск в *мм*	12	8,5
скорость в *мм/сек*	200—250	>100
удельное давление в *кГ/мм²*	13	20

мер, сплав АМг6 (6% Mg; 0,6% Mn и 0,10% Ti) удовлетворительно сваривался уже при скорости оплавления перед осадкой $v_{max} = 6$ *мм/сек*, в то время как сплав АК6 (2,2% Cu; 0,6% Mg; 0,6% Mn; 1% Si) — только при $v_{max} = 15$ *мм/сек*. По-видимому, это связано с меньшим поверхностным натяжением жидкого сплава АМг6, в результате чего легче разрушаются перемычки и уменьшается глубина кратеров на оплавленных торцах, быстрее закрываемых при осадке, а также с испарением магния, ведущим к механическому разрушению окисной пленки.

Увеличение скорости осадки при сварке алюминиевых сплавов не только облегчает борьбу с окислением, но и уменьшает необходимое давление осадки (фиг. 68) вследствие ее завершения при более высокой температуре. При сварке оплавлением как термически упрочненного сплава АК6, так и наклепанного сплава АМг6, прочность соединения превышает 80—85% прочности основного металла. Наблюдается значительное искривление волокон, при строчечной структуре иногда приводящее к расслоению (см. фиг. 18, *г*). При $p_{oc} \approx 60$ *кГ/мм²* и применении стальных электродов с режущей кромкой удается во время осадки срезать грат заподлицо с поверхностью свариваемых деталей. Алюминий удовлетвори-

тельно сваривается оплавлением с медью по режимам сварки алюминия.

Никель хорошо сваривается оплавлением благодаря малой склонности к окислению и умеренной электропроводности. Условия сварки его сплавов определяются их жаропрочностью и наличием легко окисляемых элементов. Необходимое давление осадки при сварке непрерывным оплавлением жаропрочных никелевых сплавов достигает 35—50 *кГ/мм²*. Наличие в них большого количества хрома и в особенности алюминия затрудняет получение стыков без окислов.



Фиг. 68. Зависимость угла загиба (α) соединений пластин из сплава АМг6, сваренных оплавлением, и необходимого давления осадки (p_{oc}) от скорости осадки.

Титан и его сплавы при интенсивном процессе могут свариваться непрерывным оплавлением без газовой защиты. При малой скорости оплавления и осадки, а также при сварке с подогревом, без защиты, стык получается твердым (фиг. 69) и хрупким из-за поглощения титаном газов из воздуха. Это явление устраняется при сварке в аргоне. Режимы сварки титана ВТ1Д и сплава титана ВТ6 (6% Al; 4% V) приведены в табл. 5.

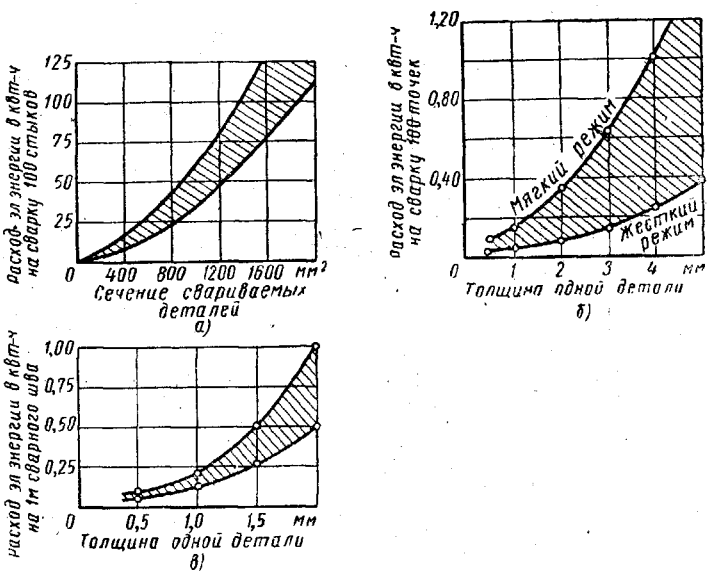
Таблица 5

Основные параметры стыковой сварки титана ВТ1Д и сплава титана ВТ6

Марка материала	Способ сварки	Конечная скорость оплавления в *мм/сек*	Давление осадки в *кГ/мм²*	Удельная мощность в *ква/мм²*
ВТ1Д	Непрерывным оплавлением (при сечении до 800 *мм²*)	6	3—4	0,12
	Оплавлением с подогревом (до 1100°)	2,5—4	2—5	0,05
ВТ6	Непрерывным оплавлением (при сечении до 800 *мм²*)	6	10	0,12
	Оплавлением с подогревом (до 1100°)	2,5—4	4—10	0,05

Припуски на оплавление и осадку приблизительно такие же, как при сварке стали.

Фиг. 69. Микротвердость газонасыщенного слоя при стыковой сварке титана без защиты.



Фиг. 70. Расход электроэнергии при контактной сварке конструкционной стали:

а — стыковой; *б* — точечной; *в* — роликовой.

§ 9. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

Для стыковой сварки характерно большое отношение вспомогательного времени B (времени на установку и закрепление деталей, удаление грата и др.) к машинному времени T (времени на подогрев, оплавление и осадку). Например, при сварке тонкой полосы $T=6\div9$ сек., а $B=30\div40$ сек.; при сварке котельных змеевиков $T=8\div10$ сек. и $B=45\div60$ сек. Применение точных заготовок, быстродействующих пневматических зажимов и выделение вспомогательных операций (удаление грата) на самостоятельные станки понижает отношение $\frac{B}{T}$. Например, сварка непрерывным оплавлением (без удаления грата) обода автомобильного колеса при $T=7\div8$ сек. занимает менее 15 сек. и в час сваривается 200—250 изделий. С уменьшением веса детали производительность обычно растет; легкая кольцевая накладка колеса сваривается приблизительно за 6 сек. с производительностью около 600 шт/час. Вспомогательное время резко понижается при автоматической подаче заготовок в сварочную машину. Например, при автоматической бункерной подаче стержней в электроды стыковой машины производительность сварки заготовок клапанов повысилась более чем вдвое (до 300—400 шт/час).

Экономичность стыковой сварки зависит и от затрат на электроэнергию и электроды. Расход энергии в *квт-ч* на 100 стыков при сварке деталей из конструкционных сталей показан на фиг. 70, *а*. Большие значения соответствуют сварке с подогревом.

Стойкость электродов зависит от условий сварки (при сварке с подогревом она ниже, чем при непрерывном оплавлении) и от применяемого материала (см. гл. VIII, § 6). При изготовлении электродов из твердой бронзы (например, кремнистоникелевой бронзы Бр. КН 0,6-2,5) их стойкость до полного износа достигает 20 000—100 000 стыков и в 4—6 раз превышает стойкость медных электродов.

ГЛАВА IV

ТОЧЕЧНАЯ И РЕЛЬЕФНАЯ СВАРКА

§ 1. ПРИМЕНЕНИЕ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Точечная сварка широко применяется в штампосварных конструкциях, в которых две или более деталей, штампованные из листа, свариваются в жесткий узел (например, пол легкового автомобиля, кабину грузовика и др.). Точками часто свариваются каркасные конструкции (например, боковины и крыша пассажирского вагона, бункер комбайна, узлы самолета и др.).

Широко применяется точечная сварка пересекающихся стержней диаметром до 25 *мм* и выше при изготовлении арматуры железобетона в виде сеток и каркасов.

Точечная сварка дает лучшие результаты при изготовлении узлов из относительно тонкого металла (в стальных конструкциях большого размера обычно до 2,5—4 *мм;* в небольших узлах, легко подаваемых к мощным стационарным машинам, до 5—6 *мм*); специальные машины позволяют сваривать сталь и значительно большей толщины. Практически освоена точечная сварка деталей из легких сплавов толщиной до 6—7 *мм*. Важная область точечной сварки — соединение очень тонких деталей в электровакуумной технике, приборостроении и др. При сварке компактных узлов обычно применяют стационарные точечные машины мощностью от нескольких сот ватт до 1000 *ква*. При сварке в массовом производстве с большим количеством точек (арматурных сеток, узлов автомобиля и др.) успешно применяются многоточечные машины. Общая мощность такой машины нередко превышает 1000 *ква*.

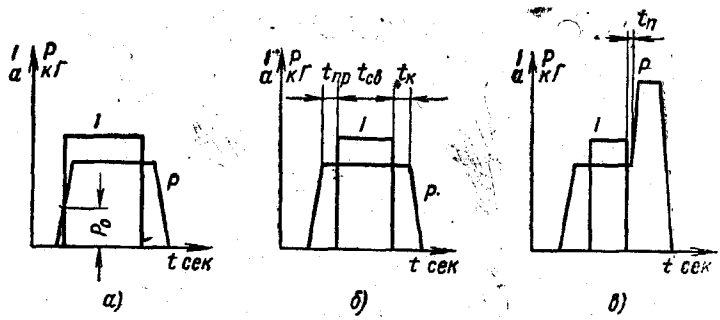
Современные машины осуществляют сварку по автоматизированному циклу. Машины средней и большей мощности имеют пневматический, реже гидравлический привод механизма сжатия электродов, иногда развивающий усилие в несколько тонн. Применяется и электропривод в сочетании с кулачковым механизмом; в неавтоматических машинах — педальный привод.

§ 2. ПРОЦЕСС ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Точечная сварка всегда начинается с предварительного сжатия деталей для обеспечения хорошего контакта. Если при включении тока усилие P_0, развиваемое электродами, недостаточно (фиг. 71,*а*),

то контактные сопротивления велики и на них почти мгновенно выделяется очень много тепла; металл в контактах быстро плавится и выбрасывается в виде искр; происходит так называемый начальный выплеск. При малом усилии возможен прожог деталей и обгорание электродов.

Как указывалось выше, детали нагреваются теплом, выделяемым током на их контактном и собственном сопротивлениях (см.



Фиг. 71. Графики тока и усилия на электродах при точечной сварке:

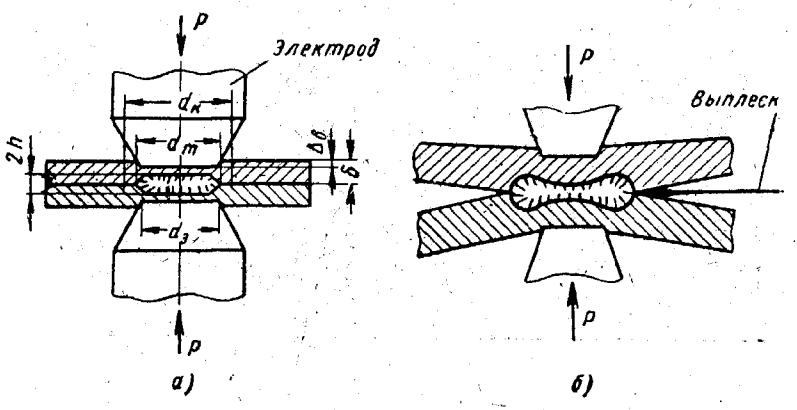
а — с преждевременным включением тока; *б* — с нормальным включением тока при постоянном усилии; *в* — с применением ковочного давления.

гл. II, §1). Нагрев при точечной сварке характеризуется малой продолжительностью (от тысячных долей секунды до несколько секунд) и значительной неравномерностью. Наиболее интенсивно нагревается центральный столбик диаметром $d_э$ (см. фиг. 11, *б*), в пределах которого плотность тока j (см. фиг. 31, *б*) наибольшая (интенсивность тепловыделения в любом элементарном объеме пропорциональна $\rho_T j^2$, где ρ_T — удельное сопротивление). Окружающий металл нагревается медленнее протекающим в нем током малой плотности и за счет теплопередачи. В начале нагрева ток имеет наибольшую плотность в области, прилегающей к контакту между свариваемыми деталями (из-за его ситового характера), а в дальнейшем интенсивное тепловыделение поддерживается здесь из-за роста ρ_T при нагреве. Поэтому наиболее быстро нагревается центральная зона точки — ее чечевицеобразное ядро, показанное в сечении на фиг. 72, *а*. Образованию ядра такой формы способствует интенсивный отвод тепла в охлаждаемые электроды.

При нагреве до некоторой температуры T в контакте между деталями под действием силы P начинают образовываться общие зерна — начинается сварка без расплавления. Дальнейший нагрев ведет к расплавлению ядра, образующего после кристаллизации прочное соединение между деталями.

В современной практике всегда применяется сварка с расплавлением ядра, так как только в этом случае получаются точки стабильной прочности.

Расплавленный металл удерживается в ядре окружающим его кольцом (диаметром $d_к$) плотно сжатого, пластичного металла. При нарушении плотности этого кольца жидкий металл, сдавленный в ядре, частично выбрасывается — происходит выплеск. Выплеск наблюдается в начале процесса при слишком быстром нагреве и недостаточном P (металл плавится до образования уплотняющего кольца) или к концу чрезмерного нагрева, когда из-за значительно-



Фиг. 72. Схематический разрез сварной точки:
а — при сварке с нормальным нагревом; *б* — при сварке с перегревом.

го увеличения диаметра ядра его тонкая оболочка прогибается (фиг. 72, *б*), растет гидростатическое давление в ядре и кольцо прорывается.

Размеры ядра (его диаметр d_m и проплавление h), определяющие прочность соединения, ограничиваются изотермой температуры плавления в конце сварочного нагрева и полностью зависят, таким образом, от технологических параметров процесса. Диаметр электрода $d_э$ является только одним из параметров этого процесса. При рациональной технологии диаметр ядра растет с увеличением толщины деталей по приближенной зависимости (при $\delta \geqslant 0{,}5$ *мм*)

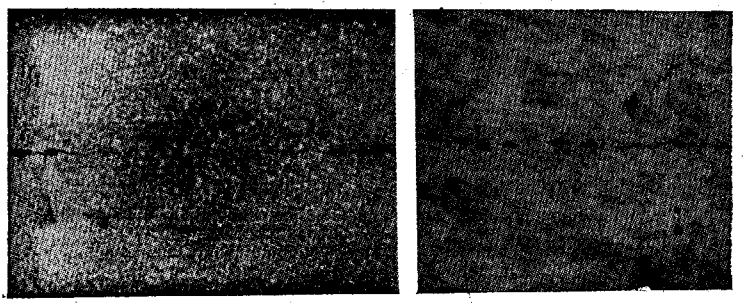
$$d_m = 2\delta + 3 \text{ мм}, \qquad (40)$$

где δ — толщина в *мм* более тонкой из свариваемых деталей.

Под действием усилия P на поверхности деталей образуется вмятие обычно глубиной до $\Delta_в = (0{,}1 \div 0{,}15)\delta$. При больших выплесках глубина вмятия растет.

Если выключить ток при нагреве до $T < T_{плав}$, то в структуре сварной точки отсутствуют раковины и поры. Крупное зерно (фиг. 73, *а*) и в особенности цепочки неметаллических включений (фиг. 73, *б*) приводят в этом случае к хрупкости соединения. Такая структура характерна для непровара. При сварке с расплавлением ядра кристаллизация металла в нем сопровождается усадкой с возмож-

ным образованием раковин и пор (см. фиг. 16, *а*). Обжатие кристаллизующего металла способствует его уплотнению. Поэтому снятие давления с электродов должно запаздывать относительно момента выключения тока на время $t_к$ (см. фиг. 71, *б*), достаточное для завершения кристаллизации ядра. С увеличением толщины деталей охлаждение и кристаллизация ядра замедляются, а следовательно, $t_к$ растет (например, при увеличении толщины стали от 1 до 8 *мм* $t_к$ растет с 0,1—0,2 сек. до 1,5—2,5 сек.).



Фиг. 73. Макро- (*а*, ×5) и микроструктура (*б*, ×100) при точечной сварке без расплавления ядра малоуглеродистой стали.

При простейшем, наиболее распространенном графике сжатия электродов и включения тока (см. фиг. 71, *б*) усилие P прилагается до включения тока ($t_{пр}$ — время предварительного сжатия), остается постоянным в течение всего процесса и снимается с запаздыванием на $t_к$.

Относительно толстый материал (дуралюмин толщиной более 1,5—2 *мм*, сталь толщиной более 5—6 *мм*) для борьбы с усадочными дефектами в ядре сваривают с проковкой, увеличивая усилие на электродах во время кристаллизации ядра (см. фиг. 71, *в*). Ковочное усилие $P_к$ должно следовать за выключением тока через небольшой интервал времени $t_п$. При большом запаздывании ($t_п \geqslant 0{,}2$ сек.) оно бесполезно, а при $t_п \leqslant 0$ возможно выдавливание расплавленного металла из ядра — происходит выплеск, сопровождаемый глубоким вмятием на поверхности деталей.

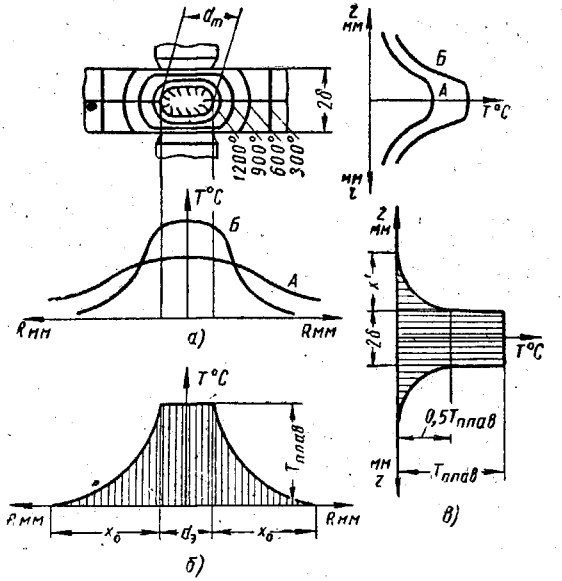
Условия охлаждения сварной точки могут существенно влиять на ее механические свойства. Охлаждение всегда начинается между электродами и заканчивается, как правило, на воздухе. Из-за интенсивного отвода тепла скорость охлаждения в электродах значительно выше скорости охлаждения на воздухе. Это особенно заметно при сварке тонкого материала (например, стали толщиной 1—2 *мм*). Поэтому затягивание ковочного давления может приводить к хрупкости точек из-за их закалки. Например, при увеличении $t_к$ с 0,1 до 1,5 сек. (сварка стали, содержащей 0,2% С, толщиной 1,5 *мм*)

разрушение точки при испытании вместо пластичного становилось хрупким.

Таким образом, размеры, структура и свойства сварной точки определяются условиями нагрева, охлаждения и пластической деформации в зоне сварки. Основными параметрами режима точечной сварки являются: а) сварочный ток и продолжительность его включения, влияющие на тепловые процессы, и б) усилие на электродах и размеры их контактной поверхности. Два последних параметра одновременно влияют как на условия пластической деформации зоны сварки, так и на нагрев этой зоны, поскольку они существенно сказываются на ее электрическом сопротивлении.

§ 3. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

Если пренебречь ограниченными размерами свариваемых деталей, то температурное поле (зависимость $T=f(x, y, z)$ при точечной сварке электродами с контактной поверхностью в виде круга долж-

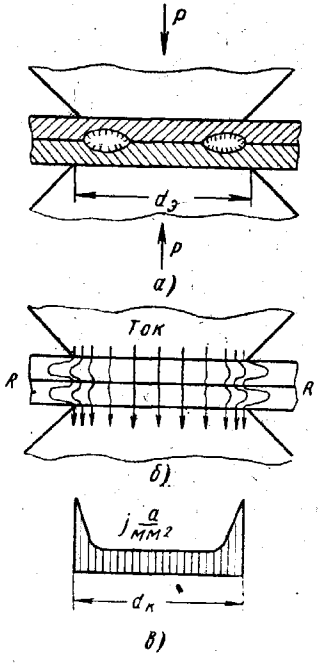


Фиг. 74. Распределение температуры при точечной сварке:

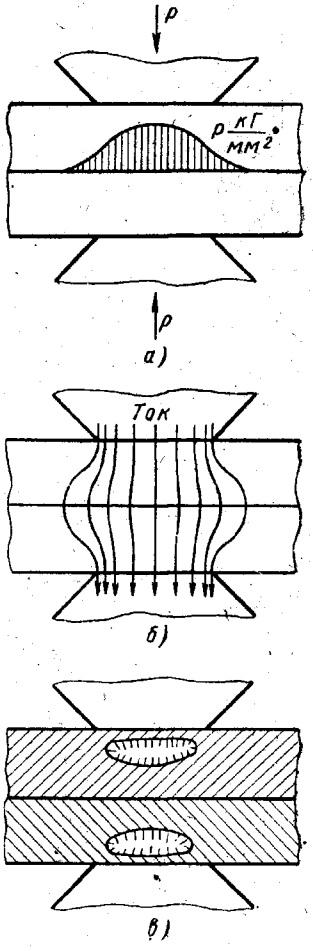
а — типовое температурное поле к концу сварки материала с высокой (*А*) и низкой (*Б*) температуропроводностью; *б* и *в* — расчетные схемы.

но быть симметрично относительно оси электродов $[T=f(r, z)]$. В этом случае изотермы представляют собой тела вращения с осью $Z—Z$ (фиг. 74, *а*), а их сечение любой плоскостью, проходящей че-

рез эту ось, дает наглядное изображение температурного поля. Температурное поле во время сварки непрерывно изменяется. Оно определяется двумя одновременно протекающими процессами: тепловыделением и теплопередачей. Из-за быстрого нагрева температурное поле при точечной сварке сильно зависит от интенсивности и распределения источников тепла — поля источников. Например, при сварке тонких листов с очень быстрым нагревом разрядом конденсатора можно получить тороидальное литое ядро



Фиг. 75. Тороидальное ядро (*а*), поле тока (*б*) и распределение тока в плоскости $R-R$ (*в*) при быстром сварочном нагреве тонких деталей.



Фиг. 76. Особенности нагрева толстого материала:
а — распределение давления в контакте между деталями; *б* — поле тока; *в* — образование двух литых ядер.

(фиг. 75, *а*) вследствие концентрации тока по периметру контакта между деталями (фиг. 75, *б*), размер которого ($d_к$) при тонком металле ограничен диаметром $d_э$ контактной поверхности электродов (фиг. 75, *в*). При удлинении процесса постепенно расплавляется средняя зона с образованием нормального чечевицеобразного ядра.

При сварке толстого материала с большим P контакт между деталями распространяется на большую площадь (фиг. 76, *а*) и контактное сопротивление относительно мало. При этом поле тока не имеет концентраторов (фиг. 76, *б*) в зоне контакта; наибольшая плотность тока наблюдается у электродов, где и начинается расплавление, иногда с образованием двух ядер (фиг. 76, *в*).

Обычно к концу точечной сварки всех материалов, теплопроводность которых ниже, чем у электродов (исключение составляет практически не применяемая сварка меди электродами из вольфрама или молибдена), температурное поле имеет вид, схематически показанный на фиг. 74. Температура в ядре может превышать температуру плавления свариваемого материала (на 300—500°). Например, наблюдалось оплавление медной проволочки ($T_{плав}=1085°$), введенной в зону образования ядра при точечной сварке дуралюмина ($T_{плав}=650°$). Дальнейшее повышение температуры ядра ограничивается интенсивным перемешиванием металла электромагнитными силами, вызываемыми сварочным током.

Из-за интенсивного отвода тепла в электроды температура быстро падает вдоль оси $Z—Z$ от границы ядра к наружной поверхности деталей, где она обычно не превосходит $(0{,}4 \div 0{,}6)\ T_{плав}$.

В радиальном направлении температура также быстро снижается с удалением от границы ядра. Чем выше температуропроводность материала, тем медленнее это снижение и меньше температурный градиент. На фиг. 74, *а* показано распределение температуры в осевом ($Z—Z$) и радиальном ($R—R$) направлениях при сварке алюминиевого сплава с высокой температуропроводностью (*А*) и стали с низкой (*Б*).

Задача о нагреве при точечной сварке в общем виде аналитически пока не решена из-за сложного характера поля источников тепла, непосредственно влияющего на распределение температуры в зоне сварки, и трудно учитываемых краевых условий (местного отвода тепла в электроды).

Количество тепла, необходимое для сварки отдельной точки, приближенно равно

$$Q = Q_{пол} + Q_1 + Q_2 + Q_3, \qquad (41)$$

где Q — общее количество тепла, выделяемого при сварке точки в деталях и их переходных контактах;

$Q_{пол}$ — тепло, расходуемое на нагрев условно выделенного центрального столбика металла диаметром $d_э$, зажатого между электродами;

Q_1 — тепло, затрачиваемое на нагрев деталей вне центрального столбика;

Q_2 — потери тепла в электроды;

Q_3 — потери тепла лучеиспусканием с поверхности свариваемых деталей.

Тепло $Q_{пол}$ практически не зависит от продолжительности на-

грева. С учетом скрытой теплоты плавления среднюю расчетную температуру неравномерно нагретого центрального столбика (см. фиг. 74) к концу сварки можно приближенно принимать равной $T_{плав}$. Тогда при сварке двух деталей толщиной δ

$$Q_{пол} = \frac{\pi d_э^2}{4} 2\delta c \gamma T_{плав}, \qquad (42)$$

где c — средняя теплоемкость при нагреве до $T_{плав}$;

γ — удельный вес.

В металле, окружающем центральный столбик, температура постепенно понижается от $T_{плав}$ до комнатной $T_0 \approx 0$. Уже на небольшом расстоянии от границы ядра температура почти не изменяется по толщине деталей (изотермы спрямляются). Средняя температура кольца приближается к 0,25 $T_{плав}$. При заданной толщине деталей и определенных свойствах металла Q_1 зависит от наружного диаметра кольца ($D_m = d_э + 2x_0$), в пределах которого к концу сварки имеется заметное повышение температуры. Область распространения тепла (расстояние x_0, фиг. 74, *б*) растет с увеличением продолжительности нагрева $t_{св}$ и с повышением температуропроводности a материала.

Приближенно

$$x_0 = 4\sqrt{at_{св}}. \qquad (43)$$

Для малоуглеродистой стали

$$x_0 = 1{,}2\sqrt{t_{св}};$$

для меди

$$x_0 = 3{,}6\sqrt{t_{св}};$$

для дуралюмина

$$x_0 = 3{,}1\sqrt{t_{св}}.$$

Тепло Q_1 при сварке двух деталей толщиной δ ориентировочно равно

$$Q_1 = k_1 \pi x_0 (d_э + x_0) 2\delta c \gamma \frac{T_{плав}}{4}, \qquad (44)$$

где $\pi x_0 (d_э + x_0) 2\delta$ — объем условного кольца;

k_1 — коэффициент, близкий к 0,8 и учитывающий, что средневзвешенная температура кольца, интенсивно нагретые участки которого располагаются у его внутренней поверхности, меньше средней температуры $\frac{T_{плав}}{4}$.

Потери тепла в электроды можно приближенно определить, принимая температуру на их контактной поверхности $T_э = 0{,}5\, T_{плав}$. При

этом средняя температура интенсивно нагреваемого участка электродов длиной x_0' (см. фиг. 74, *в*) равняется $T_э' = 0{,}25T_э$, и его объем составляет

$$V_1 = k_2 \frac{\pi d_э^2}{4} x_0', \qquad (45)$$

где k_2 — коэффициент, учитывающий форму электрода; при цилиндрическом электроде диаметром $d_э$ коэффициент $k_2 = 1$; при коническом $k_2 = 1{,}5$ при электроде со сферической поверхностью $k_2 = 2{,}0$.

Тогда суммарные потери тепла в два электрода

$$Q_2 = 2k_2 \frac{\pi d_э^2}{4} x_0' c' \gamma' \frac{T_{плав}}{8}, \qquad (46)$$

где c' и γ' — теплоемкость и удельный вес материала электродов.

При сварке электродами со сферической контактной поверхностью в расчетах вместо $d_э$ можно принимать заданный диаметр ядра точки d_m.

При точечной сварке величиной Q_3 можно пренебречь, и уравнение (41) принимает следующий вид (для сварки двух деталей):

$$Q = \frac{\pi d_э^2}{4} 2\delta c \gamma T_{плав} + k_1 \pi x_0 (d_э + x_0) 2\delta c \gamma \frac{T_{плав}}{4} + \\ + 2k_2 \frac{\pi d_э^2}{4} x_0' c' \gamma' \frac{T_{плав}}{8}. \qquad (47)$$

Соответствующее условное распределение температуры в деталях и электродах к концу сварки показано на фиг. 74, *б* и *в*.

Количество тепла Q по формуле (47) косвенно зависит от продолжительности нагрева $t_{св}$; с ее увеличением растут x_0 и x_0'.

При пользовании приведенными эмпирическими формулами необходимо помнить, что тепло Q и связанная с ним величина $q = \frac{Q}{t_{св}}$ характеризуют только энергию и мощность, потребляемые непосредственно между электродами, и не определяют расхода энергии, забираемой из сети, и общей мощности машины, так как при точечной сварке, как правило, значительная часть энергии расходуется на бесполезный нагрев самой машины.

Задаваясь технологически целесообразной продолжительностью сварки $t_{св}$, можно определить необходимое Q и рассчитать соответствующий сварочный ток. Для этого предварительно устанавливается по технологическим соображениям усилие сжатия электродов и рассчитывается соответствующее ему суммарное сопротивление участка сварочной цепи между электродами. Так как начальное сопротивление при нагреве быстро падает (см. фиг. 35) и отно-

сительно мало влияет на количество выделяемого при сварке тепла, в тепловых расчетах точечной сварки можно вводить конечное сопротивление горячих деталей $R_{гор}$ [см. уравнение (14)], умноженное на коэффициент m_3, учитывающий изменение сопротивления в процессе сварки и зависящий от свойств свариваемого материала (для стали $m_3 \approx 1{,}0 \div 1{,}1$; для легких сплавов $m_3 \approx 1{,}2 \div 1{,}4$). По закону Ленца — Джоуля сварочный ток

$$I_{св} = \sqrt{\frac{Q}{0{,}24 m_3 R_{гор} t_{св}}}. \qquad (48)$$

При выводе формулы (47) был сделан ряд допущений, в частности было принято, что материал, окружающий центральный столбик, нагревается только теплопередачей, тогда как его нагрев вызывается и непосредственным тепловыделением, и др.

Поэтому расчетный ток обычно уточняют опытным путем.

Анализ уравнения баланса тепла показывает, что потери тепла в электроды, как правило, велики и составляют 30—50% от общего количества тепла, затрачиваемого на сварку.

Расход тепла на нагрев центрального столбика при сварке стали может достигать 0,3 Q (и выше), а при сварке алюминиевых сплавов с высокой температуропроводностью он снижается до $(0{,}05 \div 0{,}1)\ Q$.

Структура и свойства точки зависят от термического цикла сварки. При сварке сталей очень важна скорость охлаждения в интервале температур распада аустенита (для конструкционных перлитных сталей 500—550°). Распределение температуры вдоль оси OR к концу нагрева (см. фиг. 74) приближается к так называемому нормальному распределению вероятностей Гаусса. Для этого случая наибольшая мгновенная скорость охлаждения (в точке O) тонких листов суммарной толщиной 2δ при температуре $T_{охл} < 0{,}5\ T_{пл}$, в предположении, что охлаждение идет вне электродов за счет теплопередачи только в радиальном направлении, равна

$$w = \frac{4\pi\lambda (T_{охл} - T_0)}{\frac{Q}{2\delta}}, \qquad (49)$$

где $Q = Q_{пол} + Q_1$ — количество тепла, введенное в металл листов при сварке, согласно формулам (40) и (42);

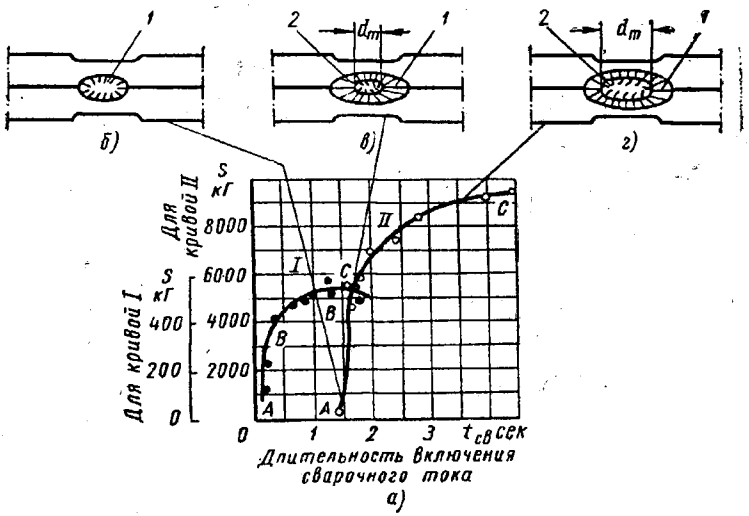
T_0 — начальная температура листов перед сваркой.

Скорость охлаждения обратно пропорциональна количеству тепла, отнесенному к толщине деталей. С увеличением «жесткости» режима Q уменьшается (вследствие уменьшения Q_1), а скорость охлаждения увеличивается.

Предельная скорость охлаждения, не вызывающая недопустимой закалки, зависит от состава свариваемой стали.

§ 4. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА НАГРЕВ И КАЧЕСТВО СВАРНОЙ ТОЧКИ

На фиг. 77, *а* дана зависимость прочности точки от продолжительности включения сварочного тока ($t_{св}$) для малоуглеродистой стали толщиной 1 *мм* и низколегированной стали толщиной 5 *мм*. Все параметры процесса, кроме $t_{св}$, не изменялись. Аналогичные зависимости дает сварка образцов с постепенным увеличением тока $I_{св}$ при $t_{св}$ =const. Они характерны для любого материала и имеют крутой участок *AB*, соответствующий, как показывают изломы образцов, сварке без расплавления (см. схематический разрез



Фиг. 77. Зависимость разрушающей нагрузки и макроструктуры сварной точки от длительности сварки:

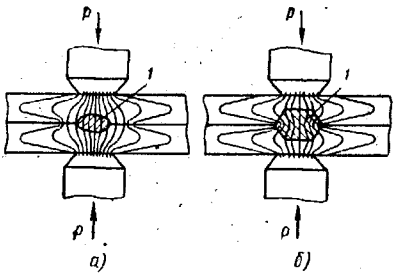
а — малоуглеродистой стали толщиной 1 *мм* (*I*) и низколегированной стали толщиной 5 *мм* (*II*); *б* — схематический разрез точки, сваренной без расплавления (полный непровар); *в* — разрез точки с литым ядром малого размера (частичный непровар); *г* — разрез точки с нормальным ядром (нормальный провар); *1* — зона крупного зерна; *2* — литое ядро.

точки на фиг. 77, *б*), и пологий участок *BC* при сварке с постепенно увеличивающимся расплавленным ядром (фиг. 77, *в* и *г*). В этих опытах литое ядро возникает в плоскости контакта свариваемых деталей на его оси. С удлинением нагрева ядро увеличивается. Такой процесс формирования ядра типичен при сварке стали на машинах переменного тока. Иной процесс иллюстрирован на фиг. 75 и 76.

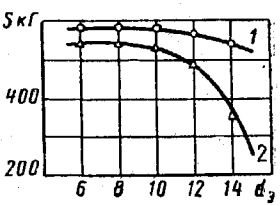
Максимальный диаметр ядра d_m, достигаемый в точке *C*, обычно связан с диаметром электрода $d_э$ зависимостью $d_m = (0{,}9 \div 1{,}4)\, d_э$. Дальнейший нагрев нецелесообразен из-за значительного выплеска и вмятия поверхности деталей, понижающих прочность соеди-

нения. Предельный диаметр ядра тем больше, чем толще свариваемый материал и чем «мягче» режим. Точки стабильной прочности (постоянного сечения) получают только при сварке с расплавлением, так как при сварке без расплавления из-за крутизны участка AB даже незначительные колебания $t_{св}$ или других параметров, влияющих на нагрев, неизбежные на производстве, значительно изменяют их прочность. Лучшие результаты дают режимы, близкие к точке C.

Состояние поверхности (контактное сопротивление) деталей существенно влияет на распределение тепла при сварке и, как след-



Фиг. 78. Схема линий тока:
а — при точечной сварке хорошо очищенных деталей; *б* — при сварке деталей, покрытых окислами; *1* — литое ядро, образующееся при одинаковой длительности нагрева.



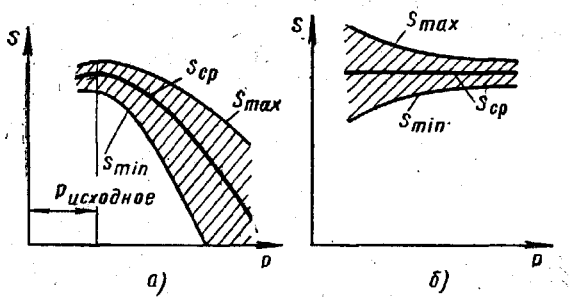
Фиг. 79. Зависимость прочности точки от диаметра контактной поверхности электрода (сварка малоуглеродистой стали толщиной 1 *мм*).

ствие, на размеры и прочность точек. Для получения точек стабильной прочности необходимо, чтобы это сопротивление сильно не колебалось. Для обеспечения постоянного контактного сопротивления детали перед сваркой обычно очищаются (травятся или обрабатываются механически) или покрываются (при травлении) тонкой пленкой окислов с небольшим и постоянным по величине сопротивлением. Кроме того, необходимо, чтобы усилие на электродах было постоянным.

Естественная пленка окислов (окалина и ржавчина на стали, Al_2O_3 — на алюминиевых сплавах) имеет непостоянную толщину. При большой толщине ее сопротивление настолько велико, что пленка становится изоляцией, препятствующей протеканию сварочного тока. Обычно под давлением электродов пленка местами разрушается и сварочная цепь замыкается. Из-за большого сопротивления при включении тока в контактах выделяется много тепла, что иногда используется практически. Например, при сварке деталей из алюминиевых сплавов с естественной пленкой Al_2O_3 удается применить машины небольшой мощности. В отличие от сварки очищенных деталей, когда ток свободно «растекается» вокруг ядра (фиг. 78, *а*), при сварке неочищенных деталей поле тока сжато в ядре (фиг. 78, *б*), окруженном зоной, в которой соприкасающиеся

поверхности покрыты окислами с высоким сопротивлением. Это также способствует более интенсивному нагреву при сварке неочищенных деталей.

Как правило, точечная сварка неочищенного материала нежелательна, так как при этом размеры и прочность точек нестабильны; значительное сопротивление контакта электрод — деталь вызывает перегрев и быстрый износ электродов; из-за наличия в некоторых пленках влаги (например, в ржавчине) в расплавленном ядре растворяется много водорода, который вследствие меньшей растворимости в твердой стали выделяется при кристаллизации. Выделяющиеся атомы водорода попадают в усадочные раковины и образуют



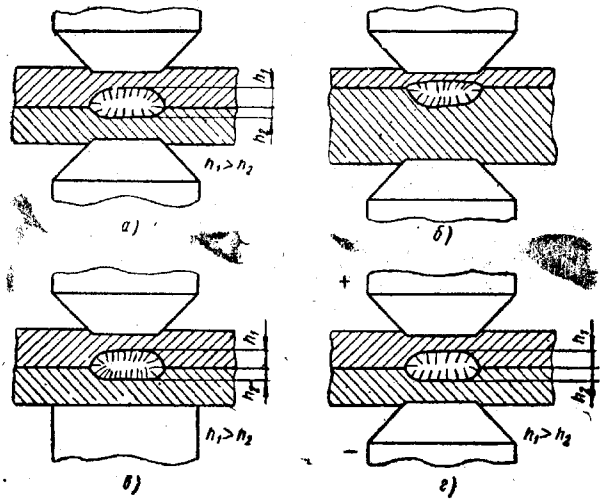
Фиг. 80. Типовая зависимость прочности сварной точки от усилия, приложенного к электродам.

в них молекулы H_2. Под высоким давлением H_2 раковины увеличиваются и возможно образование горячих трещин. Большое содержание газов в расплавленном ядре способствует появлению значительных выплесков. При наличии рельефов сварка неочищенной стали облегчается (см. § 9).

Постоянство собственного сопротивления деталей из материала заданного состава и толщины достигается при постоянстве размеров электродов (диаметра $d_э$) и приложенного к ним усилия P (см. гл. II, § 4). С увеличением $d_э$ (остальные параметры постоянны) уменьшаются сопротивление и плотность тока, в связи с чем размеры ядра и прочность точки понижаются вначале медленно, а затем быстро (фиг. 79). Кривая *1* получена при сварке по исходному режиму, обеспечивающему максимальную прочность соединения (см. точку *C* на фиг. 77, *а*), — *S* мало изменяется при изменении условий нагрева. Кривая *2* получена при сварке по режиму, дающему точки с относительно малым проваром.

Усилие P — один из важнейших параметров точечной сварки, оказывающий двоякое влияние на ее результаты: оно регулирует интенсивность нагрева в зоне сварки и определяет степень ее пластической деформации. С увеличением P уменьшаются контактные и собственное сопротивления деталей и снижается плотность тока в

них. Поэтому при постоянстве остальных параметров процесса ($t_{св}$, $I_{св}$ и $d_э$) увеличение P замедляет нагрев и приводит к уменьшению размеров и прочности точек S при одновременном понижении их стабильности (фиг. 80, *а*). В этом случае с ростом P уменьшается среднее значение разрушающей нагрузки сварной точки $S_{ср}$ и S_{min} становится намного меньше S_{max}. Однако, если увеличение P сопровождается таким увеличением $t_{св}$ или $I_{св}$, что средние размеры и прочность точек остаются без изменений, то с ростом P прочность точек становится более стабильной (фиг. 80, *б*). Это объясняется



Фиг. 81. Ядро точки:
а — при сварке материалов с разным удельным сопротивлением; *б* — при неодинаковой толщине деталей; *в* — при разном диаметре электродов; *г* — при сварке импульсом выпрямленного тока

тем, что почти всегда часть усилия P затрачивается на предварительное деформирование неплотно собранных деталей для образования между ними контакта. При этом усилие $P'_к$, передающееся непосредственно в контакте, меньше усилия P. Чем больше P, тем непостоянное по величине усилие, необходимое для деформирования деталей, меньше сказывается на усилии $P'_к$, развиваемом в контакте, и тем стабильнее условия сварки. Поэтому точечная сварка развивается по пути применения все бо́льших усилий P в сочетании с мощными машинами.

На температурное поле в зоне сварки и, как следствие, на размеры и форму ядра точки могут влиять следующие факторы:

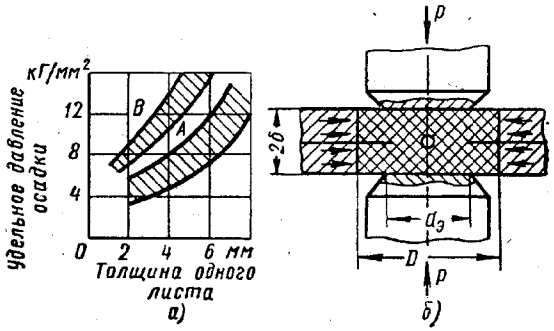
а) неодинаковое удельное сопротивление свариваемых деталей (верхняя деталь с большим сопротивлением, например, из аустенитной стали или термически упрочненного дуралюмина проплавляется на бо́льшую глубину, чем нижняя деталь из малоуглероди-

стой стали или отожженного дуралюмина — ядро смещается в сторону детали с большим ρ_T фиг. 81, *а*);

б) неодинаковая толщина деталей (при одинаковых электродах ядро смещается в деталь большей толщины, фиг. 81, *б*);

в) неодинаковые размеры и форма контактной поверхности электродов (ядро смещается к электроду с меньшей контактной поверхностью, где выше плотность тока, фиг. 81, *в*);

г) направление тока при сварке на импульсных машинах очищенных деталей из легких сплавов (ядро точки смещается в направлении, противоположном направлению тока, фиг. 81, *г*, из-за дополнительного выделения тепла в результате обратимого термо-



Фиг. 82. Зависимость давления осадки, необходимого для уплотнения ядра, от толщины деталей (малоуглеродистая сталь) для мягкого (*A*) и жесткого (*B*) режимов сварки (*а*) и схема сил, действующих в момент уплотнения ядра (*б*).

электрического эффекта в контакте при протекании тока от меди к алюминию и охлаждении контакта, в котором ток течет от алюминия к меди).

Кристаллизация ядра сопровождается усадкой, при которой в любых материалах возможно появление усадочных раковин, пор и трещин. Обычно размеры и количество этих пороков растут с увеличением объема ядра и, как следствие, с увеличением толщины свариваемых деталей.

Большие выплески могут увеличивать дефекты в ядре. Выше отмечалось, что загрязнение поверхности деталей также способствует образованию дефектов.

Удельное давление электродов, достаточное для уплотнения ядра при кристаллизации, зависит от свойств свариваемого материала, его толщины и режима сварки. Чем выше его сопротивление пластической деформации, тем больше это давление. Например, при сварке низколегированных сталей оно выше, что при сварке малоуглеродистой стали; при сварке нержавеющих сталей и жаропрочных сплавов оно еще больше.

Необходимое удельное давление быстро растет с увеличением толщины деталей (фиг. 82, *а*) вследствие удлинения процесса кристаллизации металла в ядре и увеличения толщины твердой оболочки между ядром и поверхностью деталей. При этом в центре ядра кристаллизация завершается при более низкой температуре поверхности деталей, что затрудняет пластическую деформацию. Это давление растет также с уменьшением $t_{св}$ (при сварке на «жестких» режимах). Интенсивно нагретый столбик диаметром $d_э$ (фиг. 82, *б*) деформируемый электродами, как бы окружен матрицей диаметром D из относительно холодного материала, вследствие чего ядро находится в объемно-напряженном состоянии, затрудняющем пластическую деформацию. Чем меньше $t_{св}$, тем меньше зона разогрева (меньше D) и жестче «матрица», тем труднее деформировать ядро. Если для уплотнения ядра требуется давление, затрудняющее нагрев свариваемых деталей из-за уменьшения контактных сопротивлений и плотности тока, то его создают только на время кристаллизации ядра (см. фиг. 71, *в*) в виде ковочного давления. Проковка приводит к наклепу в зоне точки, что заметно повышает усталостную прочность соединения.

§ 5. ШУНТИРОВАНИЕ ТОКА ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

Нередко часть тока протекает в свариваемых деталях вне зоны сварки — происходит шунтирование тока. Ток может шунтироваться через ранее сваренные точки (фиг. 83, *а*) или случайные контакты между деталями (например, у заусенцев по их краям). Общий ток в сварочной цепи I_2 равен геометрической сумме векторов сварочного тока $I_{св}$ и тока в шунте $I_ш$, не совпадающих по фазе:

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{св} + \bar{I}_ш.$$

По закону Ома для разветвленной цепи, эквивалентная схема которой показана на фиг. 83, *б*, имеем

$$I_ш = I_{св}\frac{R_{св}}{Z_ш}, \qquad (50)$$

где $R_{св}$ — активное сопротивление свариваемых деталей (их индуктивным сопротивлением, как правило, можно пренебречь);

$Z_ш$ — полное сопротивление шунта.

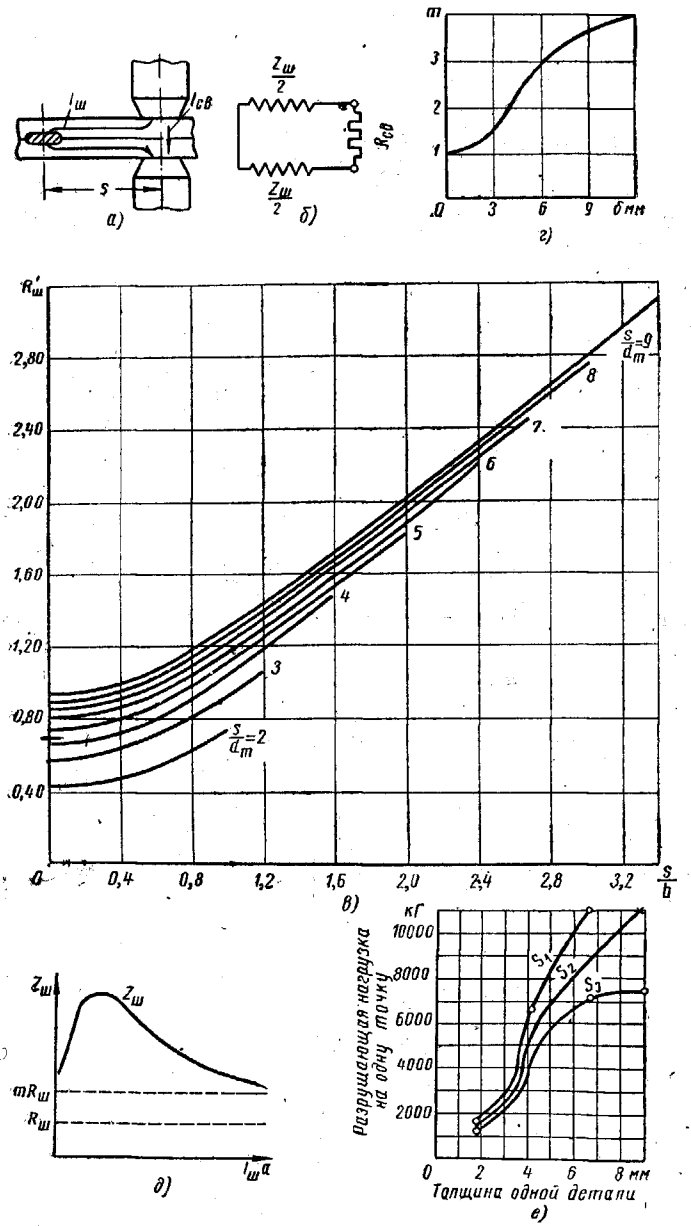
Таким образом, ток шунтирования тем меньше, чем больше сопротивление шунта, определяемое по формуле

$$Z_ш = \sqrt{(mR_ш)^2 + X_{Lш}^2}, \qquad (51)$$

где $R_ш$ и $X_{Lш}$ — омическое и индуктивное сопротивления шунта;

m — коэффициент поверхностного эффекта.

При шунтировании через смежную точку диаметром d_m, распо-



Фиг. 83. Шунтирование тока при точечной сварке:

а — шунтирование при двухсторонней точечной сварке; *б* — эквивалентная схема при шунтировании; *в* — график для расчета омического сопротивления шунта; *г* — зависимость коэффициента поверхностного эффекта сопротивления шунта от толщины детали при точечной сварке листов из малоуглеродистой стали и нормальном шаге точек; *д* — типовая зависимость сопротивления шунта от тока в нем; *е* — зависимость прочности точки от толщины свариваемых деталей (малоуглеродистая сталь).

ложенную с шагом s в деталях толщиной δ и шириной b с удельным сопротивлением ρ_T,

$$R_ш = 2R'_ш \frac{\rho_T}{\delta}. \quad (52)$$

Безразмерный параметр сопротивления $R'_ш$ зависит от безразмерных параметров $\frac{s}{d_m}$ и $\frac{s}{b}$. Он определяется по графику на фиг. 83, *в*. Сопротивление шунта уменьшается с уменьшением шага s и с увеличением ширины b и толщины δ деталей.

Коэффициент m быстро растет с увеличением толщины магнитной стали (фиг. 83, *г*). При сварке стали толщиной менее 2 *мм*, а также немагнитных материалов $m \approx 1$. Индуктивное сопротивление шунта зависит от плотности тока в нем. Общее сопротивление $Z_ш$ с увеличением плотности тока вначале быстро растет (за счет большого $X_{Lш}$), а затем постепенно снижается до $Z_ш = mR_ш$ (фиг. 83, *д*). Обычно плотность тока в шунте при точечной сварке так велика, что

$$X_{Lш} \approx 0 \text{ и } Z_ш \approx mR_ш. \quad (53)$$

Ток в шунте может достигать $(0{,}3 \div 0{,}4)\, I_{св}$. Он обычно меньше рассчитанного на основе формулы (52) из-за повышения $R_ш$ при нагреве и наличия индуктивной составляющей.

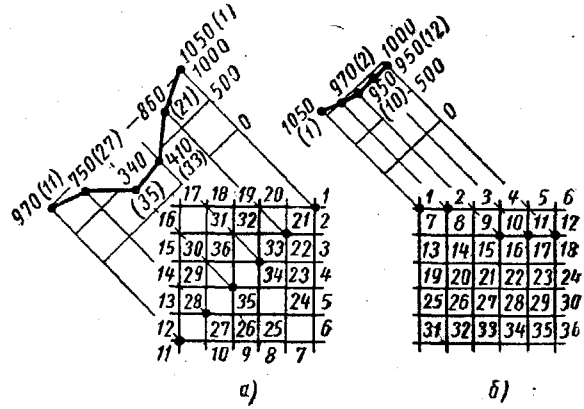
Шунтирование существенно влияет на результаты точечной сварки любых материалов и часто вызывает ее неудовлетворительное качество. Оно сопровождается не только ответвлением части тока, но и передачей части приложенного к электродам усилия P вне зоны сварки. В результате этого усилие $P''_к$, действующее в контакте между деталями, меньше P, а ток $I_{св}$ меньше I_2 (при наличии шунта общее сопротивление сварочной цепи машины уменьшается, однако связанное с этим незначительное увеличение суммарного тока I_2 не компенсирует уменьшения тока $I_{св}$ из-за ответвления тока $I_ш$). Так как при шунтировании и ток и усилие в месте сварки уменьшаются, причем степень этого уменьшения непостоянна, понижается стабильность качества сварки.

Неблагоприятное влияние шунтирования возрастает с ростом $I_ш$ при уменьшении шага точек и увеличении толщины деталей. Последнее иллюстрируется зависимостью прочности точки от толщины свариваемого материала (фиг. 83, *е*). На графике S_1 — средняя разрушающая нагрузка образца, сваренного одной точкой (без шунтирования); S_2 — средняя разрушающая нагрузка второй точки, сваренной с шагом $s = 3d_m$ (при испытании первая точка высверливалась); S_3 — минимальная прочность второй точки. Отношение $\frac{S_2}{S_1}$ показывает влияние шунтирования на прочность точки, а отношение $\frac{S_3}{S_2}$ — его влияние на стабильность этой характе-

ристики. При сварке малоуглеродистой стали с шагом $3d_m$ отношение $\frac{S_2}{S_1}=0{,}8\div0{,}9$ (оно уменьшается с ростом толщины деталей); $\frac{S_3}{S_2}$ заметно падает при $\delta>4$ *мм*.

Влияние шунтирования растет с увеличением числа одновременно свариваемых деталей. Например, при сварке двух деталей из малоуглеродистой стали толщиной 2 *мм* $\frac{S_3}{S_2}\approx0{,}85$, а при сварке трех таких же деталей в пакете это отношение падает до 0,70. Поэтому шаг точек при одновременной сварке трех деталей должен быть больше, чем при сварке двух деталей (см. табл. 6).

Снижение прочности точки из-за шунтирования особенно велико при близком ее соседстве с несколькими точками. Например,



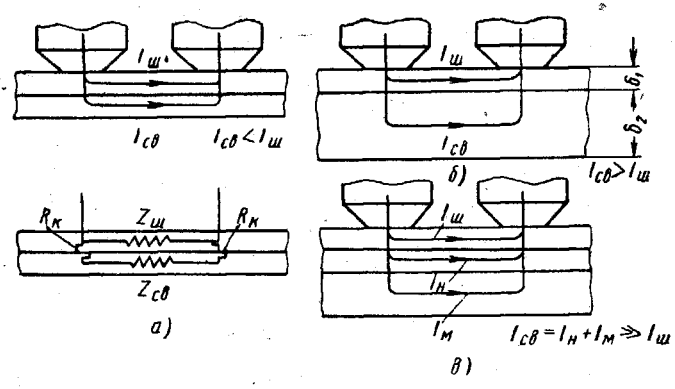
Фиг. 84. Влияние последовательности сварки на прочность точек:
а — при сварке сетки «по спирали»; *б* — при сварке сетки рядами.

при сварке вкрест прутков диаметром 6 *мм* в последовательности «по спирали» (фиг. 84, *а*) прочность 36-й точки, окруженной четырьмя сваренными точками, составляла всего 30% прочности первой точки. При сварке той же сетки рядами (фиг. 84, *б*) $\frac{S_2}{S_1}=0{,}90$. Это указывает на важность рациональной последовательности сварки точек, образующих соединение. Изменение режима сварки при переходе от первой точки ко второй и к последующим точкам (например, увеличение тока) в принципе позволяет добиться отношения $\frac{S_2}{S_1}=1{,}0$, однако и в этом случае рассеяние показателей прочности при неблагоприятных условиях шунтирования остается значительным.

Состояние поверхности деталей влияет на отношение сопротивлений зоны сварки и шунта и, как следствие, на степень шунтирования. Например, при сварке сетки из очищенных прутков $\frac{S_2}{S_1} = 0{,}85 \div 0{,}90$, а при сварке заржавленных прутков $\frac{S_2}{S_1} = 0{,}5 \div 0{,}6$.

Шунтирование особенно велико при сварке алюминиевых сплавов с малым удельным сопротивлением и высоким контактным сопротивлением пленки Al_2O_3. Поэтому минимальный шаг точек для этих сплавов больше, чем при сварке стали той же толщины.

Усилие, передаваемое непосредственно в контакте между свариваемыми деталями, $P'_к = P - P_д$, где $P_д$ — усилие, необходимое для сжатия деталей до их соприкосновения. При плохой заготовке и и сборке жестких деталей $P_д$ может оказаться больше P: контакта в месте сварки не будет, весь ток потечет через шунт и сварка будет невозможна.



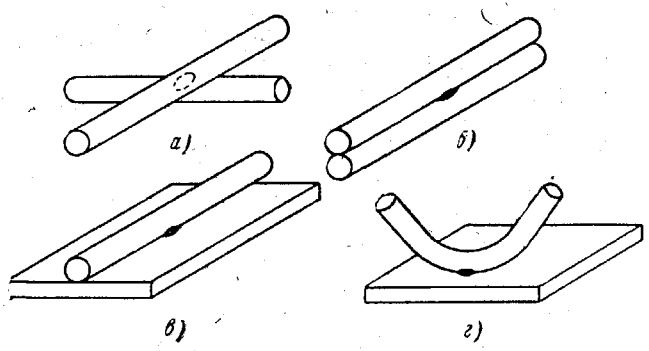
Фиг. 85. Распределение тока при односторонней двухточечной сварке: *а* — детали равной толщины; *б* — детали разной толщины; *в* — сварка на медной подкладке.

Усилие $P_д$ растет с увеличением предела текучести материала, с увеличением толщины и жесткости деталей, а также зазора между ними и с уменьшением шага точек. Особенно заметно влияет толщина деталей. При обычном качестве сборки деталей из малоуглеродистой стали $P_д$ увеличивается с 20—25 *кГ* при $\delta = 1 \div 1{,}5$ *мм* до 100—120 *кГ* при $\delta = 3$ *мм* и 350 — 400 *кГ* при $\delta = 6$ *мм*. Чем меньше $\frac{P_д}{P}$, тем меньше колеблется $P'_к$ и тем устойчивее результаты сварки. При $\delta = 2$ *мм* отношение $\frac{P_д}{P}$ обычно составляет 0,1—0,2; оно растет до 0,3—0,5 при $\delta = 6 \div 8$ *мм*, чем отчасти объясняется пониженная стабильность качества при сварке толстых деталей.

Шунтирование тока имеет особое значение при односторонней сварке. При сварке деталей одинаковой толщины без подкладки (фиг. 85, *а*) ток $I_ш$ значительно больше $I_{св}$, так как сопротивление $Z_ш$ меньше сопротивления $Z_{св} + 2R_к$ (очевидно, $Z_{св} \approx Z_ш$). Неизбежные колебания $R_к$ приводят к изменениям $I_{св}$ и нестабильности режима — односторонняя сварка без подкладки деталей из одинакового материала, близких по толщине, неприменима. При отношении $\frac{r_2}{\delta_1} \geqslant 3$ (фиг. 85, *б*) или в случае приварки детали с высоким сопротивлением (например, из аустенитной стали) к нижнему листу с низким ρ_0 (из малоуглеродистой стали) соотношение сопротивлений сварочной цепи и шунта обеспечивает относительно устойчивый режим односторонней сварки. Еще благоприятнее условия сварки на медной подкладке (фиг. 85, *в*), через которую протекает большой ток $I_м$. При этом $I_{св} = I_н + I_м$ многократно превышает $I_ш$. Для расчета сопротивлений шунта и сварочной цепи могут быть использованы формулы (50)—(53) (последняя без коэффициента 2).

§ 6. КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ УЗЛОВ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

Число одновременно свариваемых деталей в ответственных соединениях по возможности не должно превышать двух, так как с увеличением их числа в пакете сильнее влияет



Фиг. 86. Точечная сварка стержней между собой и с листами.

шунтирование и прочность точек становится менее стабильной. При односторонней сварке всегда свариваются две детали.

Детали неодинаковой толщины свариваются легко при отношении их толщины до 1 : 3.

Сварка стержней вкрест (фиг. 86, *а*) дает прекрасные результаты, так как место протекания тока локализовано и действующее в контакте усилие постоянно. Из-за ограниченной площади

контакта велика плотность тока и сварка вкрест стержней большого диаметра осуществляется при относительно малой мощности. Сварка параллельных стержней (фиг. 86, *б*) и сварка прямого стержня с листом (фиг. 86, *в*) труднее, так как площадь контакта больше, чем при сварке вкрест, а его расположение менее определенно. Удобна сварка гнутого стержня с листом (фиг. 86, *г*).

Размещение сварных точек определяется условиями шунтирования и беспрепятственной пластической деформации. С увеличением толщины деталей увеличивается минимальный допустимый шаг точек и их наименьшее расстояние до элементов, затрудняющих деформацию деталей (табл. 6). Дальнейшее уменьшение шага заметно понижает стабильность прочности. При сварке аустенитных сталей и сплавов с высоким сопротивлением предельный шаг точек на 15—20% меньше, а при сварке алюминиевых

Таблица 6

Данные по размещению точек при сварке деталей из конструкционных сталей

Толщина одной детали в *мм*	Минимальный рекомендуемый шаг в *мм*		Минимальное расстояние от центра точки до ребер и отбортовок	Толщина одной детали в *мм*	Минимальный рекомендуемый шаг в *мм*		Минимальное расстояние от центра точки до ребер и отбортовок
	при сварке двух деталей в пакете	при сварке трех деталей в пакете			при сварке двух деталей в пакете	при сварке трех деталей в пакете	
1	12	20	8	4	36	50	25
2	18	30	12	6	50	80	30
3	26	40	18	—	—	—	—

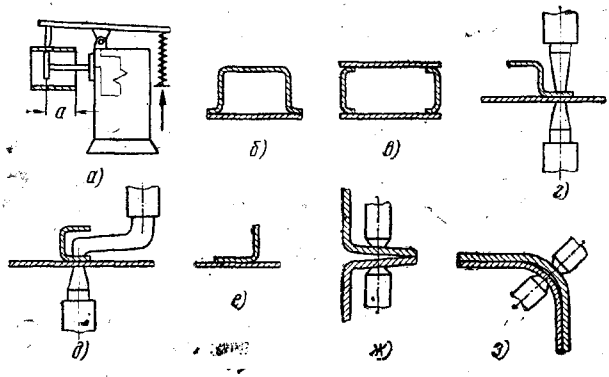
сплавов на 25—30% больше, чем при сварке конструкционных сталей.

Конструктивные требования к узлам определяются технологическим процессом сварки и применяемым оборудованием. Специальное оборудование и приспособления позволяют сваривать изделия очень сложной формы. При использовании универсального оборудования и простейших приспособлений желательно учитывать следующее:

а) сечение деталей и приспособлений из магнитной стали, вводимых в контур машины (фиг. 87, *а*), должно быть минимальным, так как магнитная сталь, введенная в контур, увеличивает его сопротивление и понижает сварочный ток (см. гл. VIII, § 5); с изменением *а* изменяются условия сварки, что ведет к нестабильности ее результатов; поэтому конструкция из магнитной стали с внешней отбортовкой (фиг. 87, *б*) целесообразнее коробчатого узла (фиг. 87, *в*), надеваемого при сварке на хобот машины;

б) все точки по возможности должны допускать применение нормальных интенсивно охлаждаемых электродов (соединение по фиг. 87, *г* поэтому целесообразнее соединения по фиг. 87, *д*);

в) желательно, чтобы все точки в узле можно было сварить в любой последовательности, что облегчает борьбу со сварочными деформациями;



Фиг. 87. К конструированию узлов, выполняемых точечной сваркой.

г) точки (диаметром d_m) не должны размещаться ближе, чем на 1,5 d_m от края детали во избежание выдавливания горячего металла у кромки;

д) точки не должны располагаться в трудно деформируемых местах (вблизи ребер, фиг. 87, *е*).

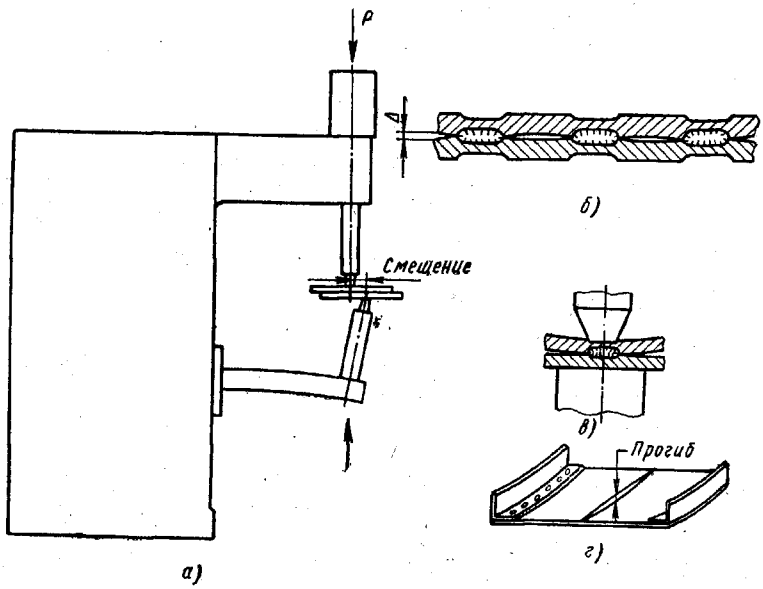
§ 7. ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

При точечной сварке необходимо обеспечить высокую и стабильную прочность соединений при минимальных сварочных деформациях и высокой производительности самой сварки и связанных с нею операций (подготовки деталей, их сборки, иногда также правки, термической и механической обработки).

Очистка деталей перед сваркой может быть общей или местной (в зоне расположения точек). Как правило, очищаются обе поверхности деталей. Способы очистки зависят от свариваемого материала и рассмотрены ниже.

Точность сваренного узла обеспечивается точной заготовкой и сборкой деталей, отсутствием их взаимного смещения и больших деформаций при сварке. Неточная заготовка и плохая сборка искажают форму изделия и часто снижают производительность труда (из-за дополнительной правки при сборке и после сварки). Большие зазоры между деталями ухудшают сварку

(см. § 5) и увеличивают деформации. Обычно они не должны превышать 0,5—0,8 *мм*, а при сборке небольших, но жестких штампованных деталей—0,1—0,2 *мм*. Частые причины недопустимых зазоров — неперпендикулярность отбортовки (фиг. 87, *ж*) и несовпадение радиусов на закруглениях (фиг. 87, *з*). Точность сборки повышается в приспособлениях. Смещение деталей при сварке иногда вызывается взаимным смещением электродов при малой жесткости машины под действием усилия P (фиг. 88, *а*). Поэтому часть точек, фиксирующую взаимное положение деталей, желательно сваривать в приспособлении, препятствующем их смещению.



Фиг. 88. Деформация при точечной сварке:

а — взаимное смещение деталей из-за малой жесткости машины; *б* — местная деформация в зоне сварки; *в* — сварка с гладкой лицевой поверхностью; *г* — общая деформация обшивки с приваренным каркасом.

Деформации при точечной сварке бывают местными и общими. Первые происходят рядом со свариваемой точкой и обычно связаны с перегревом зоны сварки — между деталями появляется зазор Δ, а поверхность деталей из-за глубоких вмятин приобретает вид стеганого одеяла (фиг. 88, *б*). Если на лицевой поверхности изделия не допускаются вмятины («бесследная» сварка), то с этой стороны применяется электрод большого диаметра (фиг. 88, *в*) в сочетании с «жестким» режимом сварки, при котором ограничивается зона нагрева.

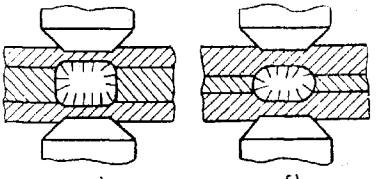
Общие деформации обычно вызываются неодинаковым нагревом деталей. Например, при сварке листа с небольшими угольниками последние прогреваются сильнее, и при остывании узел замет-

но деформируется (фиг. 88, *г*). При сварке крупных и нежестких узлов (например, обшивки вагона) возможны большие деформации и борьба с ними — одна из главных задач технолога. Деформации уменьшаются при «жестких» режимах сварки, ее рациональной последовательности, надежном закреплении деталей при сварке (например, при одновременном их зажатии большим количеством электродов в многоточечной машине) и искусственном охлаждении зоны сварки (например, сжатым воздухом с распыленной водой по способу МВТУ им. Баумана).

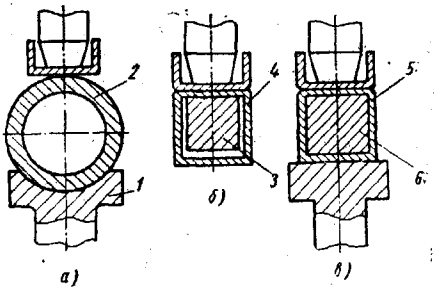
Последовательность сварки точек в узле устанавливается так, чтобы сварить все точки при минимальном шунтировании тока; начиная сварку с прихваток (точками), размещают их в наиболее трудно свариваемых местах (вблизи ребер, на закруглениях и т. д.). После прихватки остальные точки желательно сваривать подряд. Длинное соединение сваривается от середины к концам.

При сварке двух деталей неодинаковой толщины режим в основном определяется толщиной более тонкой детали (а не средней их толщиной) обычно с небольшим увеличением тока.

При сварке трех деталей неодинаковой толщины возможны два типовых случая: в середине размещается толстая деталь (фиг. 89, *а*) — режим подбирается по тонкой детали с некоторым увеличением тока, или тонкая деталь зажата между толстыми (фиг. 89, *б*) — режим подбирается по толстой детали со значительным уменьшением тока или *I* .



Фиг. 89. Сечение точки при сварке трех деталей неодинаковой толщины:
а — средняя деталь большой толщины; *б* — средняя деталь малой толщины.



Фиг. 90. Сварка листовой детали с трубчатой:
а — при двухстороннем подводе тока; *б* — на оправке; *в* — с временным заполнением полой детали легкоплавким металлом.

Сварка листовых деталей с трубчатыми возможна в трех вариантах: на подкладном электроде *1*, фиг. 90, *а* (при достаточной жесткости трубки *2*); на медной оправке *3*, фиг. 90, *б* (при достаточно большом внутреннем отверстии и небольшой длине детали *4*) или на подкладном электроде с заполнением нежесткой детали *5* (фиг. 90, *в*) легкоплавким металлом *6* алюминием, цинком), вы-

плавляемым после сварки, а при большой ее жесткости песком или парафином.

В ряде случаев для уменьшения коррозии внутренняя поверхность деталей в зоне соединения покрывается перед сваркой специальным электропроводным грунтом (например, сталь иногда грунтуется электродным лаком № 119, допускающим сварку и после высыхания). Сварка по грунту производится при несколько увеличенном усилии сжатия электродов (приблизительно на 20%).

Узлы из алюминиевых сплавов иногда свариваются по слою специального клея, который после полимеризации затвердевает и предупреждает попадание в зазор реактивов, применяемых при антикоррозионной обработке (анодировании) сварного узла. В некоторых случаях клей можно наносить и после сварки (до анодирования). При этом он проникает в зазоры вследствие эффекта капиллярности. Некоторые клеи заметно повышают прочность получаемого клее-сварного соединения, в особенности при вибрационной нагрузке.

§ 8. СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

На серийных машинах переменного тока обычно сваривается холоднокатаная или горячекатаная сталь толщиной от 0,25—0,5 до 6 *мм*.

Холоднокатаная сталь не имеет окалины и не требует очистки перед сваркой (если при хранении она не проржавела). Чистая масляная пленка выдавливается электродами и не мешает сварке. Все же в массовом производстве ответственных изделий детали предварительно промывают (например, в горячем растворе кальцинированной соды и затем в горячей воде). Горячекатаная сталь покрыта окалиной (а иногда и ржавчиной). Обычно перед сваркой она очищается травлением (в нагретой 20%-ной серной кислоте с нейтрализацией в растворе NaOH и промывкой в горячей воде) или механически (наждачным кругом, напильником, шкуркой). Лучшие результаты дает травление. Следует отметить, что очистка стальной щеткой не полностью удаляет окалину и не является полноценной. Разработаны некоторые приемы точечной сварки неочищенной горячекатаной стали (см. § 9). Сначала рассмотрим сварку очищенной стали. Малоуглеродистая сталь толщиной до 6 *мм* обычно сваривается по простейшему циклу (см. фиг. 71, *б*), ток протекает непрерывно при постоянном усилии сжатия электродов.

Малоуглеродистая сталь относительно мало чувствительна к термическому циклу сварки и при толщине до 6 *мм* хорошо сваривается как при большой, так и при малой скорости нагрева (на «жестком» и «мягком» режимах). В массовом производстве на автоматических машинах (табл. 7) обычно применяются «жесткие» режимы [$t_{св} = (0{,}1 \div 0{,}3)\ \delta$, где δ — толщина детали в *мм*], при которых выше производительность, меньше расход энергии и сварочные дефор-

мации. При сварке деталей неодинаковой толщины режим устанавливается по тонкой детали с увеличением тока на 10—20%. Так же поступают при одновременной сварке трех деталей одинаковой толщины в пакете. При значительном шунтировании, например при сварке запрессованных друг в друге деталей, сварочный ток и, как следствие, мощность резко увеличиваются, иногда в 2—3 раза против значений, приведенных в табл. 7.

Таблица 7

Ориентировочные режимы точечной сварки малоуглеродистой стали на автоматических машинах

Толщина каждой детали в *мм*	Диаметр контактной поверхности электрода в *мм*	Усилие, приложенное к электродам, в *кГ*	Продолжительность включения сварочного тока в сек.	Ориентировочный ток в *а*	Ориентировочная мощность в *ква*
0,5	4	50—100	0,1—0,2	4 000—5 000	10—20
1,0	5	100—200	0,2—0,4	6 000—8 000	20—50
1,5	6	150—350	0,25—0,5	8 000—12 000	40—60
2,0	8	250—500	0,35—0,6	9 000—14 000	50—75
3,0	10	500—800	0,6—1,0	14 000—18 000	75—100
4,0	11	600—900	0,8—1,2	15 000—20 000	100—150
5,0	13	800—1000	0,9—1,5	17 000—24 000	150—200
6,0	15	1000—1400	1,2—2,0	20 000—26 000	200—250

Интенсивность нагрева растет с увеличением j^2, где плотность тока

$$j = \frac{I_{св}}{F_э}, \qquad (54)$$

где $F_э$ — площадь контакта электрод — деталь.

Необходимая плотность тока растет с уменьшением $t_{св}$ и с увеличением усилия сжатия электродов P. Чрезмерное увеличение j ведет к выплескам и быстрому износу электродов. При сварке малоуглеродистой стали на «жестких» режимах $j = 200 \div 400$ *а/мм²*, при сварке на «мягких» режимах ($t_{св} = 1 \div 3$ сек. при $\delta = 1 \div 3$ *мм*) $j = 80 \div 160$ *а/мм²*. Необходимое усилие P растет с увеличением толщины деталей δ. Для малоуглеродистой стали $P = (60 \div 20)\,\delta$ (δ в *мм*). Отношение P/δ ниже при «мягких» режимах и малых δ.

Удельное давление $p = \frac{P}{F_э}$ равно 3—6 *кГ/мм²* при сварке горячекатаной малоуглеродистой стали на «мягком» режиме и 5—12 *кГ/мм²* при ее сварке на «жестком» режиме. При сварке наклепанной стали p повышается на 20—30%.

Сталь обычно сваривают электродами с конической рабочей частью и плоским контактом (см. фиг. 128, *а*) диаметром $d_э \approx 2\delta +$,

+3 *мм*, где δ — толщина одной из деталей в *мм* (для δ ≥ 0,5 *мм*). Увеличение $d_э$ в результате износа электрода нормально не должно превышать 15—20%. При сварке конструкционных сталей электроды желательно изготовлять из медных сплавов повышенной твердости с электропроводностью не ниже 80% проводимости меди (см. гл. VIII, § 6).

Точечная сварка стали толщиной до 1,5—2 *мм* возможна и на роликовых машинах дисковыми электродами. При роликоточечной сварке короткие импульсы сварочного тока чередуются с паузами, определяющими шаг точек. Непрерывная подача деталей и полная автоматизация процесса обеспечивают его высокую производительность, особенно при длинных швах.

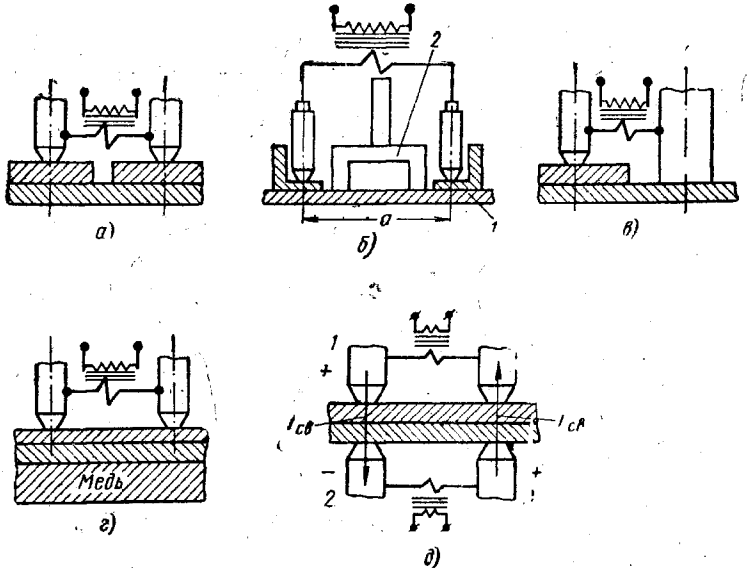
Макроструктура точки имеет три зоны: литое ядро *1* дендритного строения (см. фиг. 16, *б*), окружающую ядро-оболочку крупного зерна *2* и зону нормализованного мелкого зерна *3*, переходящую к структуре основного металла *4*. Чем мягче режим, тем шире зона крупного зерна. В этой зоне возможна видманштедтова структура, снижающая пластичность соединения.

Часто приходится сваривать малоуглеродистую сталь с защитными покрытиями (цинком, оловом, свинцом, никелем, хромом, кадмием, и др.). Она сваривается на «жестких» режимах с тем, чтобы меньше повредить покрытие. Продолжительность сварки листов толщиной 0,8—1,0 *мм* приближается к 0,1 сек., а $I_{св}$ и P увеличиваются на 20—50% по сравнению с соответствующими параметрами сварки стали без покрытия. С лицевой стороны деталей с декоративным покрытием (хромированных, никелированных) располагается электрод большого диаметра для «бесследной» сварки. При сварке деталей с легкоплавким покрытием (олово, цинк и др.) увеличивается время их выдержки в электродах после выключения тока с тем, чтобы слой покрытия, расплавившийся в окружающей точку зоне, успел затвердеть до снятия давления. Следует отметить, что защитная роль покрытия в условиях электрохимической коррозии сохраняется и при местном его повреждении.

При изготовлении крупных узлов вагона, автомобиля и др. часто применяется одно- или двухсторонняя двухточечная сварка. При односторонней сварке без шунтирования (фиг. 91, *а—в*) весь ток за исключением части, ответвляющейся через смежные точки и случайные контакты, протекает в зоне сварки. Односторонняя сварка с шунтированием (фиг. 91, *г*) осуществляется током, протекающим через нижнюю деталь и медную подкладку (если она применяется). Сварка без шунтирования дает более стабильные результаты. При большом расстоянии a (фиг. 91, *б*) во избежание нагрева и коробления листа *1* и для уменьшения необходимой мощности иногда применяют медную перемычку *2*, опускаемую вместе с электродами. Односторонняя сварка с шунтированием применима при толщине верхней детали не более 1,5—2 *мм* и осуществляется по режимам одноточечной сварки деталей той же толщины.

Детали большей толщины (до 4—5 *мм*) можно сваривать по двухсторонней двухточечной схеме (фиг. 91, *д*), при которой электроды соединяются с двумя трансформаторами, расположенными по обе стороны от изделия. Ток протекает от электрода *1* к электроду *2* и далее от электрода *3* к электроду *4* без большого шунтирования в свариваемых деталях.

Двухточечная сварка обладает по сравнению с одноточечной рядом преимуществ: изделие не охватывается контуром машины, что позволяет сваривать большие изделия при умеренной мощно-



Фиг. 91. Варианты односторонней и двухсторонней двухточечной сварки.

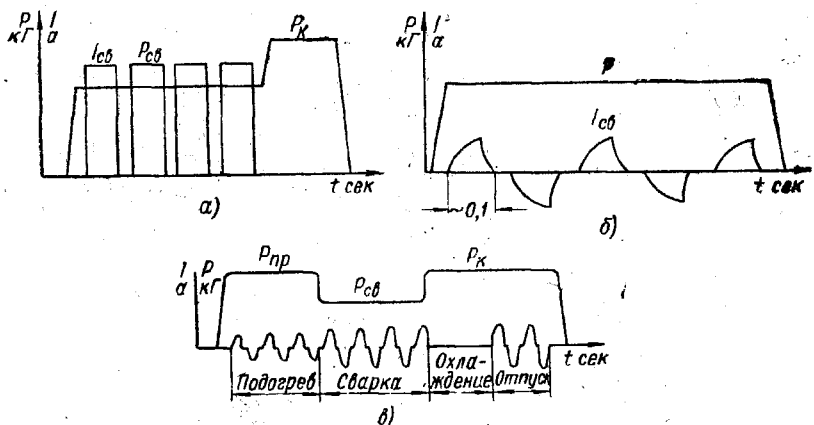
сти; повышается производительность процесса и облегчается применение многоэлектродных машин, как правило построенных по двухточечной схеме.

При толщине стали более 6 *мм* из-за жесткости деталей для их сжатия в месте сварки требуются очень большие усилия на электродах; резко растет ковочное давление, необходимое для уплотнения ядра точки; из-за большого давления и длительного нагрева быстро изнашиваются электроды; введение в контур машин тяжелых стальных элементов понижает стабильность сварки; велико шунтирование тока, и требуется большая мощность.

Одноточечная сварка стали толщиной 6—8 *мм* возможна импульсами тока (фиг. 92, *а*) на обычных машинах мощностью 150 *ква* и выше, снабженных пульсационным регулятором времени и устройством для повышения ковочного давления (например, малоуг-

леродистая сталь толщиной 8 *мм* сваривается 12—15 импульсами тока продолжительностью 0,25—0,35 сек. каждый с паузами 0,08—0,12 сек.). Импульсное включение тока улучшает охлаждение электродов и уменьшает их износ.

Сталь большой толщины целесообразнее сваривать током низкой частоты 3—5 *гц* (фиг. 92, б). Для его получения через сварочный трансформатор пропускаются импульсы выпрямленного трехфазного тока промышленной частоты (см. гл. XI, § 4). При низкой частоте пропорциональное ей индуктивное сопротивление ма-

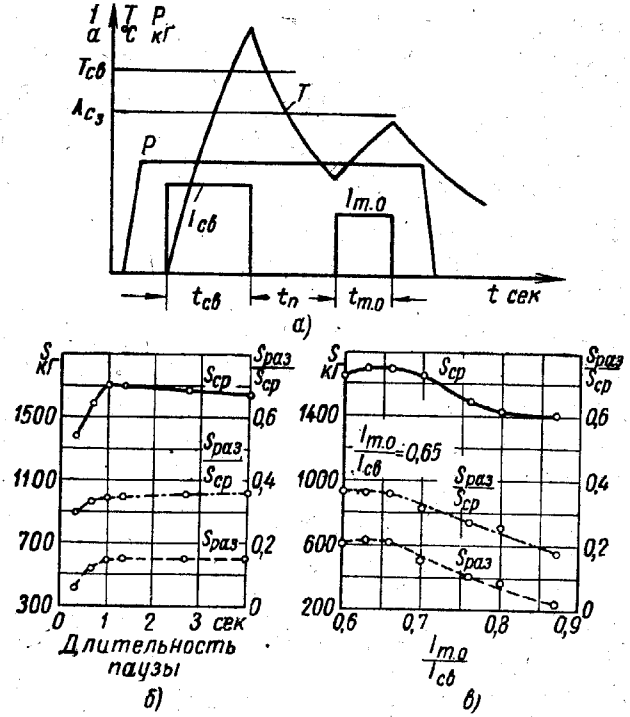


Фиг. 92. Специальные циклы точечной сварки стали большой толщины: *а* — **серией импульсов;** *б* — **током низкой частоты;** *в* — **то же, с подогревом.**

шины очень мало, и поэтому снижается потребляемая мощность. Введение в контур такой машины стальных элементов практически не влияет на величину тока. Плавное нарастание тока в каждом импульсе уменьшает перегрев и износ электродов. В низкочастотных машинах применяется ковочное давление $P_к$, а иногда и высокое предварительное давление с подогревом небольшим током, разрушающее окалину на неочищенной стали (фиг. 92, *в*). Сталь толщиной 12 *мм* на низкочастотных машинах может свариваться при следующих параметрах: $t_{св} = 10—16$ сек.; $P = 5000$ *кГ*; $P_к = 7500$ *кГ*; подогрев 3 сек.; проковка 3 сек.; сварочный ток $I_{св} = 40\,000$ *а*; мощность — около 200 *ква*; общая продолжительность сварки одной точки 20—25 сек. При этом $d_т \approx 30$ *мм*, а прочность точки достигается 20 000 *кГ*.

Стали, закаливающиеся при точечной сварке (углеродистая сталь с содержанием более 0,20% С и низколегированные стали с С $\geqslant$ 0,12%), свариваются по трем вариантам технологии, уменьшающим хрупкость и опасность появления трещин: на «мягком» режиме, предупреждающем образование трещин, с последующей общей термообработкой узла; на очень «мягком» режиме без

последующей термообработки и на «жестком» режиме импульсом тока $I_{св}$ (фиг. 93, *а*) с непосредственно следующей за ним электротермической обработкой точки импульсом тока $I_{т.о}$.



Фиг. 93. Сварка с электротермообработкой:
а — цикл сварки; *б* — влияние длительности паузы на механические свойства точки; *в* — влияние отношения $\frac{I_{т.о}}{I_{св}}$ на свойства точки.

Общая термообработка дает наибольшую однородность структуры и свойств, но, как правило, понижает усталостную прочность из-за снятия наклепа в зоне сварных точек. Ее применение ограничивается небольшими жесткими узлами. Недостаток «мягких» режимов — пониженная производительность и большие сварочные деформации. Лучшие результаты обеспечивает сварка с электротермической обработкой.

Чем выше отношение $\frac{S_{раз}}{S_{ср}}$, где $S_{раз}$ — усилие, разрушающее сварную точку при ее испытании на разрыв, а $S_{ср}$ — соответствующее усилие при испытании на срез (см. фиг. 100, *а* и *в*), тем меньше хрупкость точки. При сварке интенсивно закаливающейся стали 30ХГСА толщиной 2 *мм* без термообработки

$\frac{S_{раз}}{S_{ср}} = 0{,}10 \div 0{,}14$. Электротермическая обработка существенно повышает $\frac{S_{раз.}}{S_{ср}}$ при соблюдении двух условий: пауза $t_п$, достаточна для охлаждения ядра точки ниже температуры мартенситного превращения (в описываемых опытах 1,0 сек., фиг. 93, *б*), и повторный импульс тока достаточен для отпуска, но не вызывает повторного нагрева выше точки Ac_3, вновь сопровождаемого закалкой (фиг. 93, *в*). При оптимальном режиме ($t_п = 1{,}02$ сек., $t_{т.о} = 1{,}26$ сек. и $I_{т.о} = 0{,}65\ I_{св}$) термообработка повысила $\frac{S_{раз}}{S_{ср}}$ с 0,1 до 0,38 при росте $S_{ср}$ с 1040 до 1120 *кГ*. Эффективное применение электротермической обработки возможно только при автоматическом процессе.

Режимы точечной сварки низколегированных и углеродистых сталей отличаются от режимов сварки малоуглеродистой стали в основном повышенным усилием сжатия электродов (на 15—30%).

Если точечная сварка листов толщиной $\delta \geqslant 6$ *мм* уже затруднена, то сварка стержней вкрест легко осуществима при $d = 30$ *мм* и выше (табл. 8). При толщине листа, равной диаметру стержня

Таблица 8

Сравнительные режимы точечной сварки стержней и листов

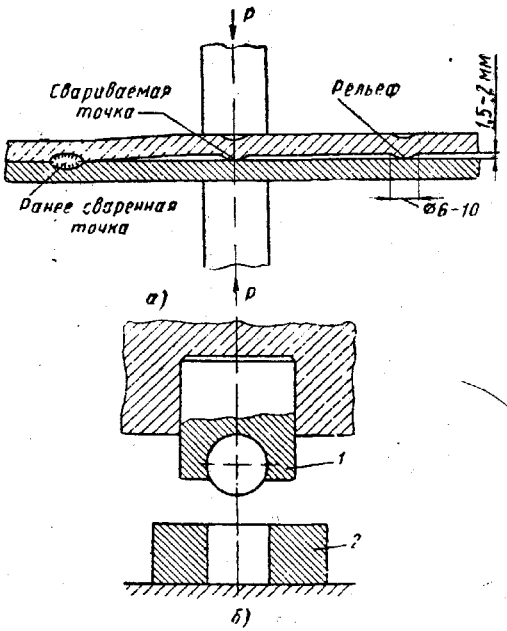
Тип соединения	Толщина листа или диаметр прутка в *мм*	Усилие сжатия электродов в *кГ*	Сварочный ток в *а*	Продолжительность включения тока в сек.
Сварка листов внахлестку	12	5000—7500	40 000—45 000	10—16
Сварка стержней вкрест	12	500	12 000—14 000	1,0—1,5
	20	1000	18 000—21 000	3,5—4,5
	40	3500	30 000—32 000	14—18

(12 *мм*), усилие на электродах и время сварки для листов приблизительно в 10 раз больше, чем для прутков, а ток увеличивается более, чем в три раза. Прутки диаметром до 30 *мм* можно сваривать вкрест на машинах мощностью до 200 *ква*.

§ 9. РЕЛЬЕФНОТОЧЕЧНАЯ СВАРКА НЕОЧИЩЕННОЙ СТАЛИ

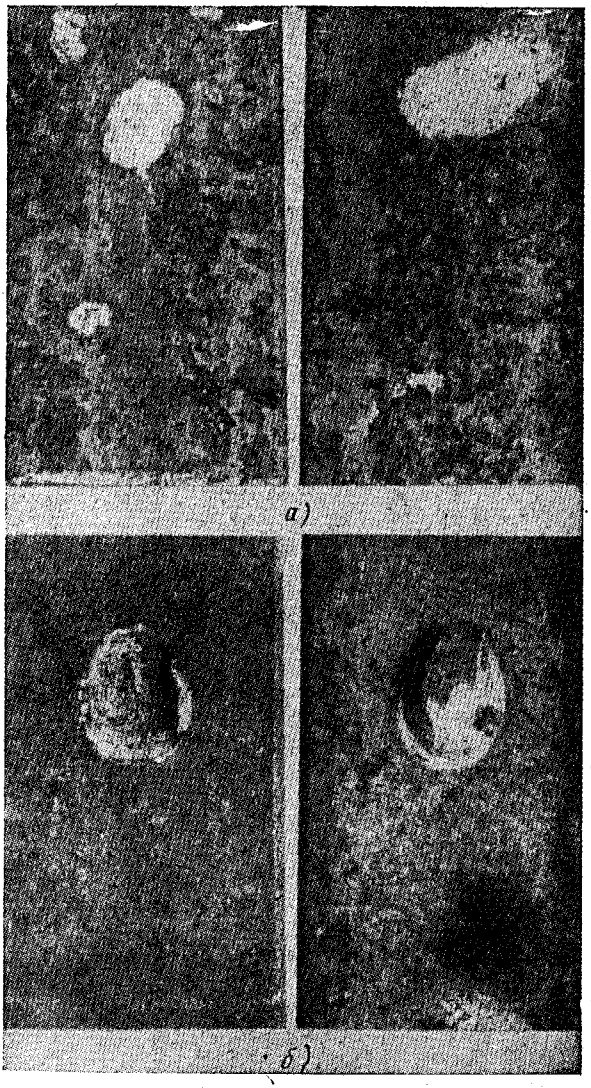
При этом способе сварки в одной из деталей в местах постановки точек предварительно выштамповываются выступы-рельефы. От обычной рельефной сварки рельефно-точечная сварка отличается тем, что она осуществляется не одновременно во всех точках,

а последовательно (фиг. 94, *а*). Рельефы облегчают точечную сварку, так как они приводят к местному разрушению окалины на неочищенной стали; локализуют места протекания сварочного тока и приложения давления, что обеспечивает правильное формирование ядра точки (фиг. 95) и повышает стабильность качества сварки (табл. 9); позволяют применить электроды с большой контактной поверхностью, что повышает их стойкость. При этом смещение электрода с оси рельефа (до 5 *мм*) не влияет на результаты сварки. Стабильность результатов рельефно-точечной сварки неочищенной стали и точечной сварки очищенной стали практически одинакова (см. табл. 9). Рельефы штампуются без затруднений одновременно с основной операцией штамповки (если детали штампуются) или самостоятельно. Удобен шариковый пуансон с матрицей в виде втулки (см. фиг. 94, *б*). При этом образуется рельеф диаметром около 6 *мм* и высотой 1,5—2 *мм*. Практически освоена рельефно-точечная сварка неочищенной горячекатаной стали толщиной 2 *мм* и выше.



Фиг. 94. Рельефно-точечная сварка:
а — схема процесса; *б* — пуансон *1* и матрица *2* для выштамповки рельефов.

Разработан также способ (НИИТРАКТОРСЕЛЬХОЗМАШ) обычной точечной сварки без рельефов стали, не очищенной от окалины. Для этого в первичную цепь сварочной машины включается дроссель. Сварка производится при относительно высоком напряжении холостого хода трансформатора (около 6 *в*), достаточном для пробития слоя окалины. При этом дроссель ограничивает величину сварочного тока, который при отсутствии такого ограничения и высоком напряжении холостого хода приводил бы к перегреву и прожогу свариваемых деталей. Преимущество сварки с дросселем — его простота; недостатки — понижение коэффициента мощности (из-за введения в первичную цепь машины большого индуктивного сопротивления) и относительно быстрый износ электродов.



Фиг. 95. Излом точек на неочищенной горячекатаной стали:
а — при обычной точечной сварке и *б*—при рельефно-точечной сварке.

Таблица 9

Прочность точек при точечной и рельефно-точечной сварке малоуглеродистой стали

Толщина одной из деталей в *мм*	Усилие на электродах в *кГ*	Продолжительность сварки в сек.	Состояние поверхности	Средняя разрушающая нагрузка на точку в *кГ*	Рассеяние результатов испытания в %
2	600	0,78	С окалиной, рельеф диаметром 6 *мм*	2100	—12,9 +14,8
2	600	0,78	С окалиной без рельефа .	1750	—29,8 +10,3
3	820	1,02	С окалиной, рельеф диаметром 6 *мм*	3250	—3,8 +11,2
3	820	1,02	С окалиной без рельефа .	2720	—27,5 +25,1
3	820	1,02	Без окалины с рельефом диаметром 6 *мм*	3290	—8,5 +8,0
3	820	1,02	Без окалины, без рельефа .	2850	—7,2 +10,5

§ 10. СВАРКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ, ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ И ТИТАНА

Точечная сварка аустенитных сталей, а также жаропрочных никелевых сплавов (нихромов, содержащих около 75% Ni и 15% Cr) широко применяется в химическом машиностроении, самолетостроении и др. Холоднокатаные материалы подвергаются местной очистке (стальной щеткой), а при особенно высоких требованиях к состоянию поверхности — электрополированию. Горячекатаные стали и сплавы травятся в растворе серной (110 *г*), соляной (130 *г*) и азотной кислоты (10 *г*) на 0,75 *л* воды при $T = 50 \div 70°$ с последующей нейтрализацией в щелочном растворе. Иногда после этого производится электрополирование.

Нержавеющая сталь типа Х18Н9 (18% Cr и 9% Ni) лучше сваривается на «жестких» режимах ($t_{св}$ приблизительно вдвое меньше, чем при сварке конструкционной стали, см. табл. 10 и 7). Кратковременный нагрев затрудняет выпадение карбидов в стали, не стабилизированной титаном или ниобием, что предупреждает появление чувствительности к межкристаллитной коррозии, а при сварке холоднокатаной наклепанной стали уменьшает ее разупрочнение в зоне сварки. Вследствие жаропрочности сталь сваривается

Таблица 10

Ориентировочные режимы точечной сварки стали типа Х18Н9 на автоматических машинах

Толщина каждой детали в *мм*	Диаметр контактной поверхности электрода в *мм*	Усилие, приложенное к электродам, в *кГ*	Продолжительность включения сварочного тока в сек.	Ориентировочный ток в *а*
0,2	2,5	45—90	0,02—0,06	2 000—3 000
0,5	4	90—180	0,04—0,08	3 000—4 000
1,0	5	200—400	0,10—0,16	4 500—6 000
1,5	7	350—600	0,16—0,24	5 500—8 000
2,0	8	450—700	0,20—0,28	6 000—10 000
2,5	8	600—800	0,20—0,30	8 000—11 000

Примечание. Большие значения тока соответствуют меньшим $t_{св}$ и большим $P_э$.

при большом удельном давлении на электродах (до 16 *кГ/мм*^{2}). Из-за низкой электропроводности ток при сварке аустенитных сталей на 30—40% ниже, чем при сварке обычных конструкционных сталей той же толщины.

Точечная сварка аустенитной стали с повышенным содержанием хрома и никеля (например, стали типа Х23Н18) производится на относительно «мягких» режимах ($t_{св} = 0{,}8 \div 1{,}5$ сек.) во избежание образования в ядре горячих трещин (см. гл. I, § 2), но при высоких удельных давлениях. Особенно высокое давление (18—22 *кГ/мм*^{2}) необходимо при сварке жаропрочных нихромов. Во избежание разупрочнения наклепанного нихрома предпочтительны очень «жесткие» режимы (табл. 11).

Изредка применяются двухимпульсные режимы (второй импульс тока замедляет кристаллизацию ядра и способствует его уплотнению). Обычно сварка производится при постоянном усилии на электродах. Сварные точки обладают высокой пластичностью $\left(\frac{S_{раз}}{S_{ср}} = 0{,}7 \div 1{,}0\right)$.

Иногда для повышения стабильности качества соединений при изготовлении жестких сварных узлов ответственного назначения из аустенитных сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе применяются режимы с усилиями сжатия электродов, на 40—80% превышающими их значения, приведенные в табл. 10 и 11. При этом несколько увеличиваются сварочный ток и продолжительность его включения. Широкое использование таких режимов часто лимитируется усилиями, развиваемыми точечными машинами серийного выпуска.

Таблица 11

Ориентировочные режимы точечной сварки нихромов

Толщина каждой детали в *мм*	Диаметр контактной поверхности электродов в *мм*	Усилие, приложенное к электродам, в *кГ*	Продолжительность включения сварочного тока в сек.	Ориентировочный ток в *а*
0,5	4	200—300	0,04—0,08	3500— 4500
1,0	5	350—450	0,06—0,10	6000— 7000
1,5	6	500—650	0,10—0,16	8000—10000
2,0	7	700—900	0,14—0,20	10000—12000

Из-за высокого давления на электроды они должны изготовляться из сплава с твердостью не ниже $HB=125—140$ *кГ/мм*^{2} (см. гл. VIII, § 6). Его электропроводность может не превышать 75—80% проводимости меди, так как плотность тока при сварке жаропрочных сталей и сплавов относительно невелика. Нечувствительность к закалке этих материалов позволяет применять наружное водяное охлаждение зоны сварки, что повышает стойкость электродов и уменьшает сварочные деформации.

Аустенитные стали хорошо свариваются с конструкционными. При этом ядро точки смещается в аустенитную сталь (см. фиг. 81, *а*), имеющую большее удельное сопротивление и более низкую температуру плавления.

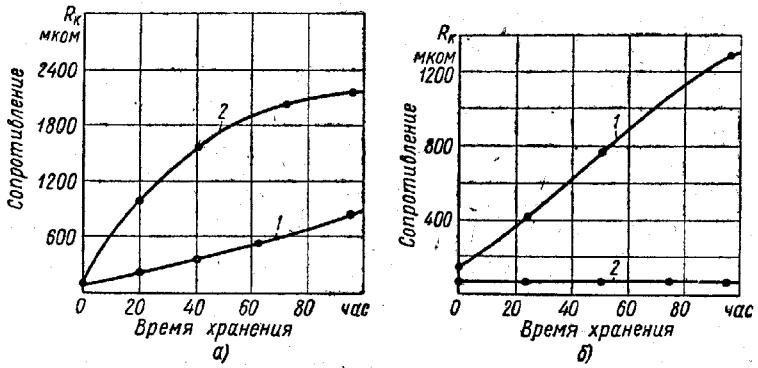
Титан очень активно взаимодействует с кислородом, азотом и водородом, однако при его точечной (и роликовой) сварке обычно не требуется специальной защиты, так как металл ядра не имеет прямого контакта с воздухом. Технический титан по своим физическим свойствам близок к стали 1Х18Н9, хотя его электро- и температуропроводность несколько выше. Точечную сварку титана толщиной 1—2,5 *мм* производят при $t_{св}=0{,}2 \div 0{,}30$ сек. электродами со сферической контактной поверхностью ($R=50 \div 100$ *мм*). При этом ток на 5—10% выше, чем при сварке стали 1Х18Н9 (см. табл. 10), а усилие на электродах приблизительно такое же.

§ 11. СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ, МАГНИЕВЫХ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Чистый алюминий из-за высокой электропроводности трудно поддается точечной сварке, которая сопровождается частичным привариванием электрода к детали из-за перегрева их контакта. Это увеличивает износ электродов и портит поверхность деталей. Сваривать алюминий легче, если между электродами и деталями ввести теплоизолирующие прокладки из нержавеющей стали толщиной 0,1—0,2 *мм*. Эти прокладки не привариваются ни к электро-

дам, ни к алюминию. Они позволяют сварить алюминий при сравнительно небольшой плотности тока. Недостаток этого приема заключается в сквозном проплавлении, при котором повреждается лицевая поверхность деталей и часто нарушается плотность соединения из-за сквозных усадочных пороков ядра.

Точечная сварка алюминиевых сплавов широко применяется в промышленности. При сварке важно, чтобы пленка окислов на деталях имела умеренное и по возможности постоянное сопро-



Фиг. 96. Зависимость контактного сопротивления при $P = 250$ *кг* от времени хранения после очистки:

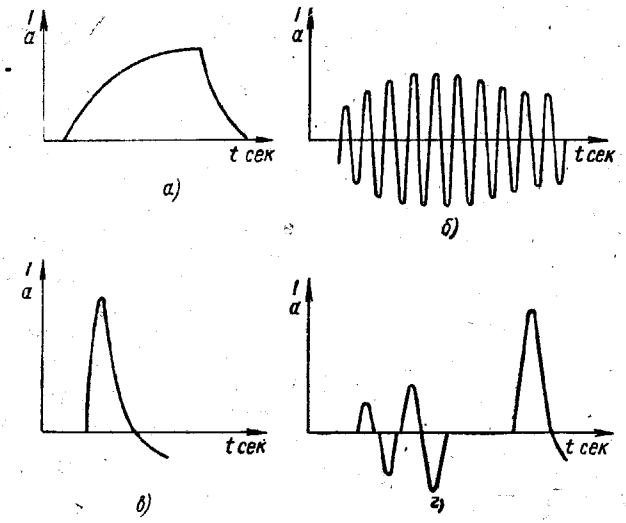
а — дуралюмина толщиной 1 *мм*; *1* — травление, *2* — механическая очистка; *б* — магниевого сплава МА-8; *1*—механическая очистка; *2* — травление.

тивление (порядка 100—500 *мком*). Поэтому перед сваркой детали обычно подвергаются механической или химической очистке. В первом случае производится местная очистка быстровращающейся стальной щеткой (с проволочками диаметром до 0,1 *мм*) или мелкой наждачной бумагой. Недостатки механической очистки: большая трудоемкость, возможность повреждения тонкого слоя чистого алюминия, защищающего сплав от коррозии (при плакированных сплавах), и очень быстрое повторное окисление очищенной поверхности. Переходное сопротивление свежеочищенных деталей (порядка 10 *мком*) уже через 20—30 час. растет до 1000 *мком* и выше (фиг. 96). Это понижает стабильность сварки, так как трудно всегда проводить ее сразу после очистки.

В крупносерийном производстве используется химическая очистка, состоящая из предварительной промывки для удаления грязи, маркировочной краски (бензином, ацетоном), обезжиривания (в щелочных ваннах), промывки, травления, промывки после травления и сушки. Травление можно проводить в растворе ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) 300—350 *г* на 1 *л* воды и хромпика ($K_2Cr_2O_7$) — 0,1—1 *г*. Травление продолжается в зависимости от состава сплава и температуры ванны от 12 до 36 мин. При такой

обработке на поверхности деталей образуется тонкая фосфатно-хромовая пленка, сопротивление которой медленно изменяется в течение трех суток (см. фиг. 96). Качество очистки контролируется измерением переходного сопротивления микроомметром (см. гл. X, § 7).

Для уменьшения зоны местного разупрочнения термически или механически упрочненных сплавов их сваривают на относительно «жестких» режимах ($t_{св}$ =0,15÷0,4 сек. при δ=1÷3 *мм*). Даль-



Фиг. 97. Кривая тока при сварке:
а — импульсом выпрямленного тока; *б* — модулированным током промышленной частоты; *в* — разрядом конденсаторов; *г* — разрядом конденсатора с подогревом переменным током.

нейшее сокращение $t_{св}$ не улучшает качества соединений, но ведет к увеличению потребляемой мощности. Из-за высокой электропроводности алюминиевые сплавы свариваются при очень больших плотностях тока (1000—1500 *а/мм*^{2}). Для уменьшения перегрева контакта электрод — деталь, способствующего износу электродов и повреждению деталей (потемнению поверхности точки и потере ее коррозионной стойкости из-за обогащения наружного слоя алюминия медью), желательно постепенное нарастание тока. Это обеспечивается при сварке импульсом выпрямленного тока (фиг. 97, *а*). На обычных машинах переменного тока применяется его модулирование (фиг. 97, *б*) Очень быстрое нарастание тока при сварке разрядом конденсатора (фиг. 97, *в*) менее благоприятно.

Применяются электроды со сферической поверхностью (см. фиг. 128, *б*), уменьшающие начальное сопротивление электрод — деталь и обеспечивающие хороший теплоотвод. Они изготовляются

из сплавов твердостью *НВ* 90—100 *кГ/мм²* с электропроводностью не ниже 90% проводимости меди (например, из меди, содержащей 1,0% кадмия). Электроды должны обильно охлаждаться и очищаться от появляющегося при сварке налета, увеличивающего контактное сопротивление. Очистка производится мелкой наждачной бумагой после сварки каждых 20—50 точек. Схема с постепенным нарастанием тока позволяет реже зачищать электроды.

При сварке деталей толщиной до 1,5 *мм* удается уплотнить ядро без повышенного ковочного давления. Удельное давление составляет при этом 16—22 *кГ/мм²*. При большей их толщине применяют ковочное давление $P_к = (3 \div 4)\ P$. Ковочное давление повышает усталостную прочность соединения. Режимы точечной сварки дуралюмина на машинах переменного тока и импульсных машинах приведены в табл. 12 и 13.

Быстрые изменения толщины деталей при их нагреве и пластической деформации во время сварки не должны изменять давления электродов. Поэтому механизм сжатия машины должен обладать малым трением и незначительной инерцией (подвижную головку машины с электродом делают легкой и она ходит в направляющих на шариках).

При сварке дуралюмина в центре ядра *1* (фиг. 98, *а*) наблюдается равноосное мелкозернистое строение (фиг. 98, *б*); наружная часть ядра *2* имеет столбчатую структуру (фиг. 98, *в*); ядро окружено узкой зоной частично оплавленных зерен *3* с участками хрупкой эвтектики (см. фиг. 18, *б*). В зоне отжига *4* растет зерно

Таблица 12

Ориентировочные режимы точечной сварки дуралюмина на машинах переменного тока с модулированием (фиг. 97,*б*)

Толщина каждой детали в *мм*	Радиус сферы электрода в *мм*	Усилие на электродах в *кГ*	Продолжительность в сек.			Сварочный ток в *а*	Ориентировочный диаметр ядра точки в *мм*
			Подогрев (нарастание тока)	Нагрев при неизменном токе	Охлаждение (спад тока)		
0,8	75	400	0,04	0,10	0,14	24 000	4
1,2	75	500	0,06	0,14	0,18	27 000	5
1,5	100	600	0,06	0,18	0,22	29 000	6

и выпадают частицы упрочняющих фаз (фиг. 98, *г*), что сопровождается местным разупрочнением; зона отжига переходит в основной металл *5* с деформированными зернами твердого раствора и отдельными темными включениями нерастворимых интерметаллидов, содержащих железо (фиг. 98, *д*). При сварке алюминиевых сплавов точки относительно хрупки $\left(\frac{S_{раз}}{S_{ср}} = 0{,}4 \div 0{,}5\right)$.

Таблица 13

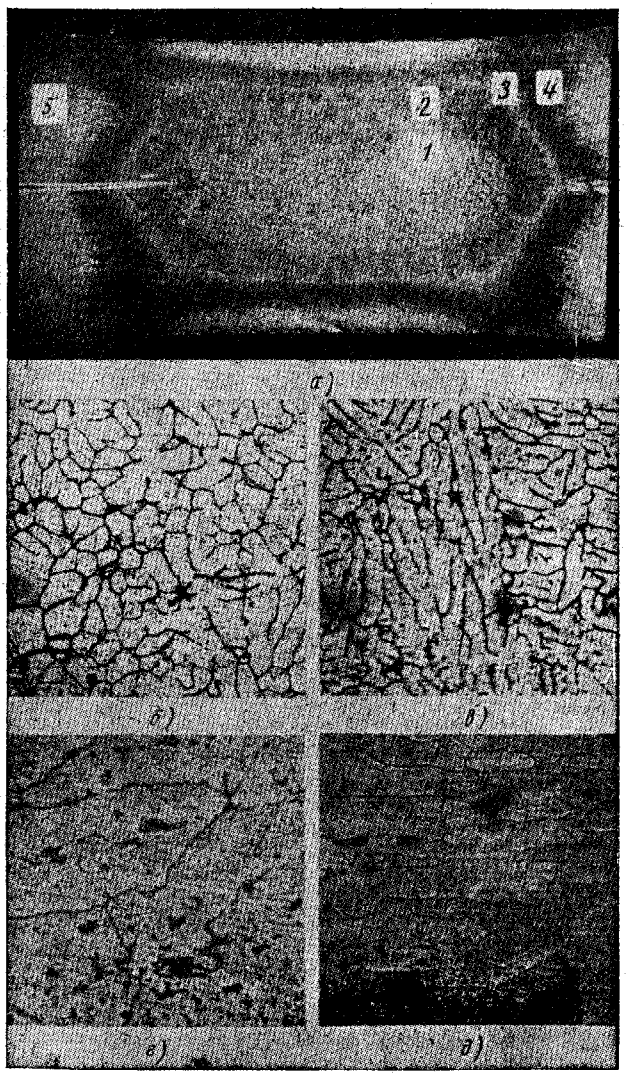
Ориентировочные режимы точечной сварки дуралюмина на импульсных машинах (МТПТ-600)

Толщина каждой детали в *мм*	Радиус сферы электрода в *мм*	Усилие на электродах в *кГ*		Продолжительность импульса сварочного тока в сек.	Сварочный ток в *а*	Ориентировочный диаметр ядра в *мм*
		сварочное	ковочное			
1,5	75	600	2000	0,16	38000	5,5
2,0	75	700	2400	0,22	47000	7,0
3,0	100	800	2800	0,30	56000	9,0
4,0	150	1100	4200	0,35	75000	13,0

Тепло- и электропроводность высокопрочных магниевых сплавов (например, сплава МА8, содержащего около 2% Mn и 0,35% Ce) ниже, чем у алюминиевых сплавов (см. табл. 1). Поэтому сварка магниевых сплавов проводится при несколько меньшей плотности тока. Перед сваркой с магниевых сплавов должна быть удалена естественная окисная пленка и антикоррозионные покрытия. Рекомендуют после обезжиривания сначала травление в водном растворе едкого натра (300—600 *г/л*), азотнокислого натрия (40—70 *г/л*) и азотистокислого натрия (150—250 *г/л*) в течение 10—90 сек., при 30—100°, затем после тщательной промывки травление в течение 10—15 мин. при комнатной температуре в растворе хромового ангидрида (150—200 *г/л*) с последующей промывкой. При травлении в первой ванне удаляются защитное покрытие и окислы, а после травления во второй ванне с поверхности удаляется гидроокисная пленка, образовавшаяся при первом травлении, и создается тонкая, прочная оксидная пленка, обладающая небольшим сопротивлением (при $P = 250$ *кГ* $R_к = 60 \div 80$ *мком*), почти не изменяющимся в течение 10 суток (см. фиг. 96, *б*). Это способствует улучшению качества сварки. Например, при сварке образцов из протравленного сплава МА8 толщиной 1,5 + 1,5 *мм* рассеяние результатов испытания точек на срез лежало в пределах 10%, в то время как при сварке механически зачищенных образцов оно достигало 19%.

Точечная сварка меди возможна молибденовыми и вольфрамовыми электродами или с применением теплоизолирующих прокладок из нержавеющей стали, располагаемых между медными электродами и свариваемыми деталями. Качество такой сварки невысокое из-за повреждения поверхности деталей и она не применяется в промышленности.

Условия сварки медных сплавов определяются их физическими свойствами и составом. Чем выше электропроводность сплава, тем обычно труднее его точечная сварка. Очень хорошо свариваются



Фиг. 98. Структура точки при сварке дуралюмина:
а — макроструктура (× 10); *б* — *г* — микроструктура зон *1*, *2* и *4* (× 300); *д* — микроструктура основного металла (× 300).

например, мельхиор (80% Cu, 20% Ni; электропроводность около 8% проводимости меди), кремнистая бронза (3% Si; электропроводность 9%). Труднее сваривается латунь (электропроводность латуни Л62 составляет около 25%). Латунь сваривается на жестких режимах ($t_{св} = 0{,}2 \div 0{,}4$ сек.) при относительно высокой плотности тока (ток увеличивается приблизительно на 50%, а мощность на 100% по сравнению со сваркой малоуглеродистой стали той же толщины). Латунь удовлетворительно сваривается со сталью.

§ 12. ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА ДЕТАЛЕЙ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ

В производстве ламп, приборов и др. в большом количестве свариваются детали очень малой толщины (от 0,005 *мм*) и сечения из различных металлов и сплавов (сталей, алюминиевых, медных и никелевых сплавов и др.). Для получения соединений стабильного качества без повреждения деталей необходимы:

а) строгое дозирование количества энергии, расходуемой на каждую сварку (во избежание непровара или прожога) в сочетании с небольшим, но точно контролируемым усилием P на электродах; малое P необходимо для того, чтобы тепло выделялось в основном в зоне контакта между деталями за счет относительно большого сопротивления $R_к$, а постоянство P требуется в связи с тем, что при малых усилиях $R_к$ изменяется очень резко (см. фиг. 27);

б) малая продолжительность импульса тока, способствующая концентрации тепловыделения в зоне соединения деталей, уменьшающая их общий нагрев, что облегчает сварку разноименных материалов.

Этим условиям наиболее полно отвечают конденсаторные машины, осуществляющие сварку импульсом тока (см. фиг 97, *в*), получаемым во вторичной обмотке сварочного трансформатора при разряде конденсаторов на его первичную обмотку. Некоторые данные по режимам конденсаторной сварки тонкого материала приведены в табл. 14. Продолжительность импульса сварочного тока измеряется тысячными долями секунды. С увеличением коэффициента трансформации сварочного трансформатора сварочный ток уменьшается, а длительность импульса соответственно растет. Этим способом регулируется жесткость режима конденсаторной сварки. На конденсаторных машинах успешно свариваются разноименные материалы, например, никель с молибденом, вольфрамом и платинитом; медь с латунью и бронзой; титан с молибденом и вольфрамом и многие другие.

Для особых случаев сварки, когда недопустимы выплески, дающие налет металлической пыли, загрязняющей внутреннюю полость вакуумных приборов, предложены схемы конденсаторной сварки с предварительным подогревом импульсом постепенно нарастающего переменного тока (см. фиг. 97, *г*). При этом защита деталей от окисления и охлаждение электродов достигается автоматическим

Таблица 14

Ориентировочные режимы точечной сварки стали 10, бронзы Бр.0Ф 6,5-0,4 и латуни Л62 на конденсаторной машине ТКМ-4

Свариваемый материал	Толщина каждой детали в *мм*	Емкость конденсаторов в *мкф*	Напряжение заряда конденсаторов в *в*	Энергия, накапливаемая в конденсаторах, в *вт. сек*	Коэффициент трансформации	Усилие сжатия электродов в *кГ*	Диаметр контактной поверхности электрода в *мм*
Сталь 10	0,1	50	600	9,0	75—100	10	2
	0,2	90	600	15,2	75—100	10	2
	0,3	150	600	27,0	75—100	12	2
Бр. ОФ 6,5-0,4	0,05	30	600	5,4	100	7	2
	0,2	100	600	18	100	10	2
	0,3	160	600	28,8	100	10	2
Л62	0,02	30	600	5,4	100—125	5	2
	0,1	90	600	15,2	100—125	5	2
	0,2	130	600	23,4	100—125	7	2

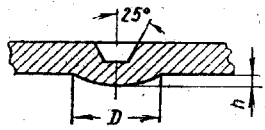
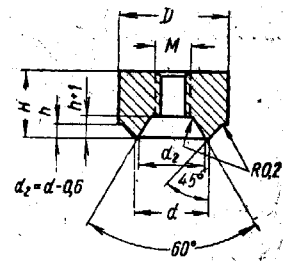
впрыскиванием в зону сварки при каждой операции капли спирта. Машина и рабочее место сварщика располагаются под прозрачным колпаком, куда подается под небольшим давлением очищенный воздух.

§ 13. РЕЛЬЕФНАЯ СВАРКА

Рельефная сварка эффективно применяется в массовом производстве. Около 10% точечных соединений в конструкции легковых автомобилей ГАЗа выполняются этим способом. Рельефная сварка, по существу, является многоточечной сваркой, при которой расположение точек определяется выступами (рельефами), заранее сделанными в одной из свариваемых деталей. Эти выступы могут иметь различную форму и получаться холодной штамповкой в виде круглых рельефов (табл. 15), высадкой при изготовлении болтов, гаек, шпилек и т. п. (фиг. 99, *а*) или, наконец, механической обработкой (фиг. 99, *б* и табл. 15). Локализованный контакт, характерный для рельефной сварки, получается также при сварке развальцованной трубы (фиг. 99, *в*) или штуцера (фиг. 99, *г*) с листом при их сопряжении по кромке отверстия. Такие соединения могут быть прочноплотными.

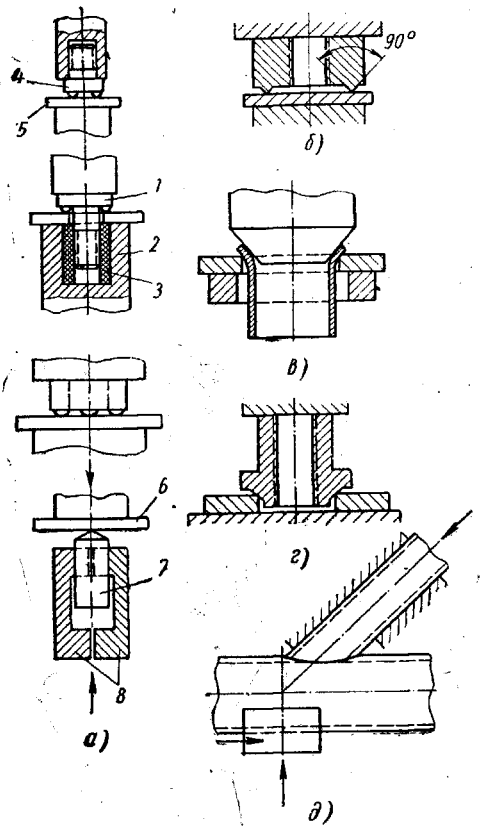
Таблица 15

Размеры рельефов и бобышек в *мм*

Толщина листа				
	D	Допуск	*h*	Допуск
0,5	1,8	±0,1	0,5	±0,05
1,0	3,0		0,7	
2,0	5,0		1,0	
3,0	7,0	±0,15	1,5	±0,12
4,0	9,0		1,8	
5,0	11,0		2,3	
Резьба М				
	D	*H*	*d*	*h*
5×0,8	10	6	7	1,2
6×1	12	7	8	1,5
8×1,25	16	10	11	2
10×1,5	18	11	13	2
12×1,5	20	12	15	2

Одинаковый провар во всех рельефах достигается только при равномерном распределении между ними тока и усилия сжатия электродов. Для этого требуется тщательная очистка деталей и точная штамповка самих деталей и рельефов. При загрязненной по-

верхности или неплотном прилегании деталей в начале сварки контактное сопротивление отдельных рельефов резко различно и ток распределяется между ними неравномерно. Лучшие результаты дает рельефная сварка деталей из мягкой декапированной стали.



Фиг. 99. Типы соединений при рельефной сварке.

Рельефы при сварке не должны преждевременно расплющиваться. Если это произойдет до расплавления ядра (из-за малой жесткости рельефа или неправильного режима сварки), то дальнейший локализованный нагрев в зоне рельефа прекратится и соединение останется непроваренным, так как детали придут в соприкосновение между собой и с электродами по всей их поверхности и ток устремится, минуя места рельефов, через более холодные участки с меньшим сопротивлением. В связи с этим шаг рельефов диаметром D и расстояние от их оси до кромки детали не должно быть меньше $2{,}5\,D$.

В зависимости от толщины стали для сварки каждого рельефа требуется от 40—50 *ква* (при $\delta = 1{,}0$ *мм*) до 80—100 *ква* (при $\delta = 3{,}0 \div 3{,}5$ *мм*). Усилие сжатия на один рельеф также изменяется в широких пределах ($P = 180$ *кГ* при $\delta = 1{,}0$ *мм* и 600 *кГ* при $\delta = 3{,}0$ *мм*).

При рельефной сварке деталей толщиной более 2,5—3 *мм* полезен импульсный нагрев (3—5 импульсов тока продолжительностью 0,2—0,4 сек. с паузами $t_п = 0{,}06 \div 0{,}12$ сек.), способствующий постепенной пластической деформации рельефов в начале сварки и более равномерному распределению между ними тока и давления. Для устранения выплесков целесообразно постепенное нарастание тока. Иногда применяется ковочное давление. При сварке больших деталей распределение тока между отдельными рельефами зависит от их расположения относительно сварочного трансформатора; сопротивление ветви цепи, проходящей через

ближе расположенные рельефы, меньше, а следовательно, ток в этих рельефах больше. Для лучшего распределения тока в этих случаях применяют питание сварочной цепи двумя трансформаторами, соединенными параллельно, или одним кольцевым трансформатором (см. гл. XI, § 2).

При рельефной сварке применяют электроды из сплавов высокой твердости (не ниже *НВ* 140—160 *кГ/мм*^{2}) обычно с впаянными вставками из еще более твердого металлокерамического сплава (60% W, 40% Cu) в местах рельефов. Эти вставки многократно повышают стойкость электродов. При приварке болтов и шпилек в электроде делается отверстие. Во избежание шунтирования тока через болт *1* в электрод *2* вставляется изоляционная втулка *3* (см. фиг. 99, *а*). Если болт *4* не проходит в отверстие листа *5*, к которому он приваривается, то шунт невозможен и необходимость в изоляции отпадает. При приварке к листу *6* стержня *7* ток к нему должен подводиться вблизи места сварки (разжимным электродом *8*), а не с торца во избежание прогрева стержня по всей длине, что ведет к его изгибу и к непровару.

Разновидностью рельефной сварки является сварка втавр трубок (см. фиг. 99, *д*) неодинакового диаметра, например, в производстве велосипедных рам. Для обеспечения провара по всему периметру торец привариваемой трубки должен быть точно профрезерован, а сварочный нагрев должен осуществляться очень быстро и концентрироваться в месте соединения. Положительные результаты дает конденсаторная сварка. Например, узлы велорамы могут свариваться разрядом конденсаторов емкостью 7000 *мкф* при зарядном напряжении 3000—4000 *в*. Энергия, расходуемая на одну сварку, достигает 50 *квт. сек*.

§ 14. ДЕФЕКТЫ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

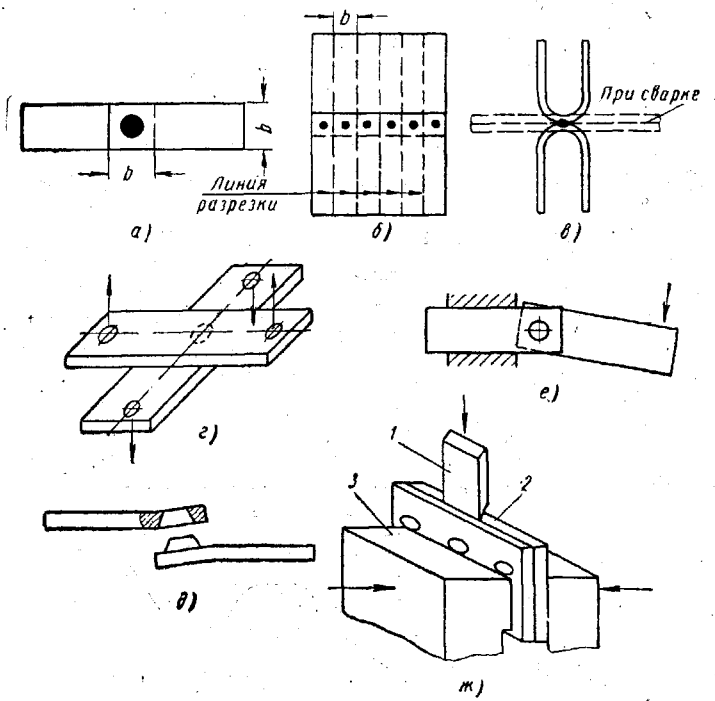
Дефекты при точечной сварке бывают внешние (выплески, глубокие вмятины, подплавление поверхности деталей, выходящие на поверхность трещины) и внутренние (непровар, рыхлость, трещины в ядре). Внешние дефекты обнаруживаются осмотром; внутренние выявить значительно сложнее. Самый опасный дефект точечной сварки, резко понижающий прочность соединений, — непровар (отсутствие или малые размеры литого ядра).

Непровар вызывается недостаточным нагревом деталей при сварке и обычно связан с нарушением ее режима вследствие:

а) уменьшения тока из-за падения напряжения в питающей машину сети, введения в контур машины магнитной стали (см. фиг. 133) или ослабления затяжки и окисления контактов первичной и в особенности сварочной цепи машины; большого шунтирования тока из-за малого шага точек, плохой очистки и сборки деталей, случайного касания свариваемых деталей с токоведущими частями машины вне зоны сварки;

б) изменения электрического сопротивления зоны сварки из-за резкого увеличения контактной поверхности электродов или изменения величины приложенного к электродам усилия;

в) уменьшения продолжительности нагрева из-за нечеткой работы аппаратуры управления сварочным циклом (на автоматических машинах) или недостаточной квалификации сварщика (при неавтоматическом оборудовании);



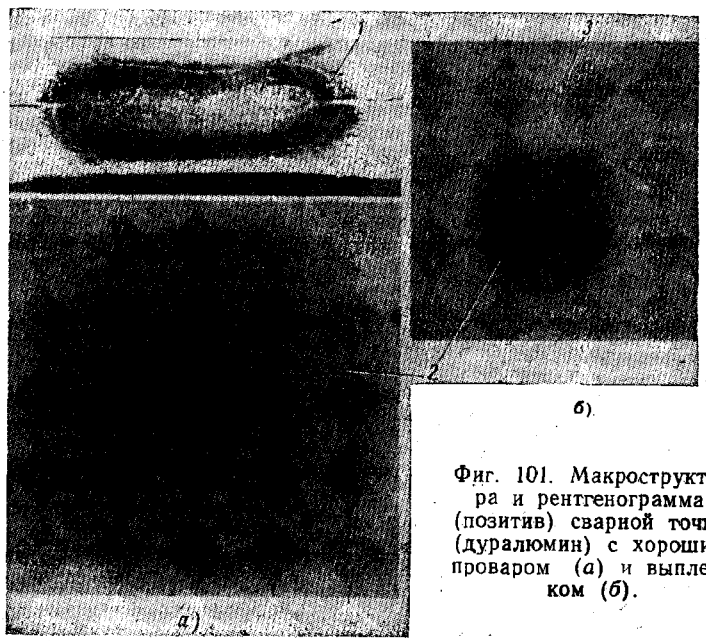
Фиг. 100. Испытание точечных соединений.

г) случайного увеличения толщины свариваемых деталей при использовании некондиционного материала.

Борьба с непроваром ведется путем автоматизации процесса сварки, обеспечивающей строгое соблюдение заданных его параметров (так называемый активный контроль), и путем контроля качества сварных точек.

При активном контроле (наиболее целесообразном для точечной сварки) первоначально устанавливается режим сварки тех или иных деталей на образцах или опытных изделиях. В дальнейшем периодически, не реже одного-двух раз в смену, свариваются и испытываются контрольные образцы для подтверждения стабильности принятого процесса. Испытания сварных точек обычно произ-

водятся на срез или растяжение. На срез испытывается образец шириной $b=5\delta+15$ *мм* (ширина образца влияет на результаты испытания), сваренный одной точкой (фиг. 100, *а*) или серией точек (фиг. 100, *б*), если необходимо оценить влияние шунтирования. В последнем случае шаг точек соответствует их шагу в контроли-



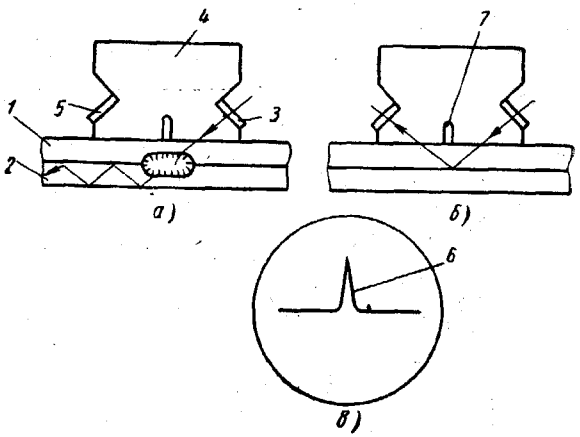
Фиг. 101. Макроструктура и рентгенограмма (позитив) сварной точки (дуралюмин) с хорошим проваром (*а*) и выплеском (*б*).

руемом изделии. Длинный образец (с 20—25 точками) разрезается, и раздельно испытывается каждая точка. Точки испытываются на растяжение при толщине материала до 3—4 *мм* на U-образных образцах (фиг. 100, *в*), концы которых после сварки отгибаются; при большей толщине испытываются крестообразные образцы (фиг. 100, *г*). При тонком материале образцы разрушаются с вырывом по периметру ядра (фиг. 100, *д*). При подборе режимов сварки часто применяются простые технологические пробы: испытание на скручивание (фиг. 100, *е*); разрушение зубилом *1* образца *2*, зажатого в тисках *3* (фиг. 100, *ж*) для выявления степени провара.

При сварке ответственных изделий механические испытания дополняются металлографическим исследованием сечения точек. Иногда шлифы приготовляются и просматриваются контролером непосредственно на сварочном участке.

На некоторых алюминиевых и магниевых сплавах величину ядра точки можно определить без ее разрушения рентгенопросвечиванием. Например, в сплавах типа дуралюмина ограничивающая

ядро зона обедняется медью вследствие ликвации в расплаве. Обогащенная алюминием оболочка ядра *1* обладает большей проницаемостью для рентгеновских лучей, чем основной металл. Поэтому на рентгенограмме образуется темное кольцо *2* (фиг. 101, *б*). Его отсутствие указывает на непровар. При сварке сплавов магния с марганцем по границе ядра иногда выделяются частицы Mn, поглощающие рентгеновские лучи больше, чем Mg, и на снимке ядро ограничивается светлым кольцом. Рентгенопросвечивание одновременно позволяет выявить поры, трещины и внутренние выплески *3* (фиг. 101, *б*) и др. Рентгеноконтроль дорог и трудоемок. Он применяется только в наиболее ответственных изделиях.



Фиг. 102. Ультразвуковой контроль сварных точек.

В МВТУ им. Баумана разработан более дешевый ультразвуковой контроль сварных точек. При наличии провара между деталями *1* и *2* (фиг. 102, *а*) ультразвуковые упругие колебания, введенные щупом *3* (пьезокристаллом кварца или титаната бария, изменяющим свои размеры под воздействием электрического тока), проходят через плексигласовый корпус *4*, тонкий слой масла, деталь *1* и ядро точки в нижнюю деталь *2*, где рассеиваются, не попадая в приемный щуп *5*. При отсутствии провара (фиг. 102, *б*) колебания отражаются от поверхности раздела деталей и попадают в щуп *5*; на экране прибора появляется сигнал *6* (фиг. 102, *в*). Прорез *7* предупреждает прямое попадание в щуп *5* ультразвуковых колебаний, частично отражаемых от верхней плоскости детали *1*. Перемещая щуп, можно заметить момент появления и исчезновения сигнала и, таким образом, определить размер литого ядра. Ультразвук может иногда проходить через соединения, сваренные без расплавления, указывая на наличие провара там, где его нет. Применимость ультразвукового контроля в конкретных условиях устанавливается экспериментально.

§ 15. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Трудоемкость точечной сварки слагается из трех основных элементов: машинного времени, затрачиваемого непосредственно на сварку; вспомогательного времени на установку свариваемого узла на машине, иногда связанную с частичной или полной его сборкой, и времени на уход за электродами. Современные точечные машины с пневматическим приводом делают 70—80 ходов в минуту. При этом машинное время сварки одной точки (на стали толщиной до 2 *мм*) не превышает $T = 0{,}75$—$0{,}85$ сек. На ГАЗе удалось путем несложной модернизации увеличить число ходов этих машин до 130 и уменьшить T до 0,40—0,45 сек. (при сварке стали толщиной до 1,5 *мм*). Эффективность этого мероприятия тем выше, чем больше доля T в общем балансе времени. При обычной производительности точечной сварки в массовом производстве (1500—3000 точек в час) отмеченная интенсификация процесса повышает производительность всего на 12—25%.

Наибольший рост производительности дает комплексная механизация точечной сварки, при которой одновременно сокращается машинное и вспомогательное время. Например, на ГАЗе при сварке штампованной чашки с лопатками гидромуфты механический оператор, поворачивающий собранную в приспособлении полумуфту на шаг лопаток и последовательно сваривающий все точки, вдвое повысил производительность. Еще выше производительность при совмещении в одной машине операций сборки и сварки. Трудоемкость сборочно-сварочных работ снижается в несколько раз при многоточечной сварке в поточных или автоматизированных линиях, в которых механизированы сборка и подача свариваемых узлов в машины, их съем и передача с одного рабочего места на другое. Применение таких линий быстро окупается в массовом производстве.

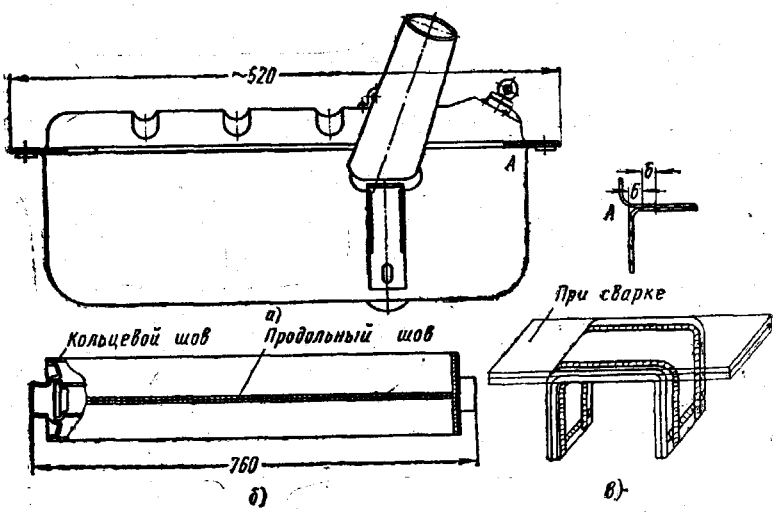
Уход за электродами занимает 3—8% от общего времени точечной сварки. Замена меди специальными сплавами не только снижает расход цветного металла и времени на изготовление электродов (стойкость которых растет в 3—5 раз), но и повышает производительность труда при сварке на 2—5% вследствие уменьшения времени на уход за электродами. Парой хорошо охлаждаемых электродов из сплавов высокой твердости до полного износа можно сварить на холоднокатаной стали толщиной 1—1,5 *мм* 30 000—100 000 точек. При этом расход сплава на 1000 точек составляет 5—20 *г*. Расход электроэнергии уменьшается при сварке на «жестких» режимах (см. фиг. 70, б).

ГЛАВА V

РОЛИКОВАЯ И РОЛИКОСТЫКОВАЯ СВАРКА

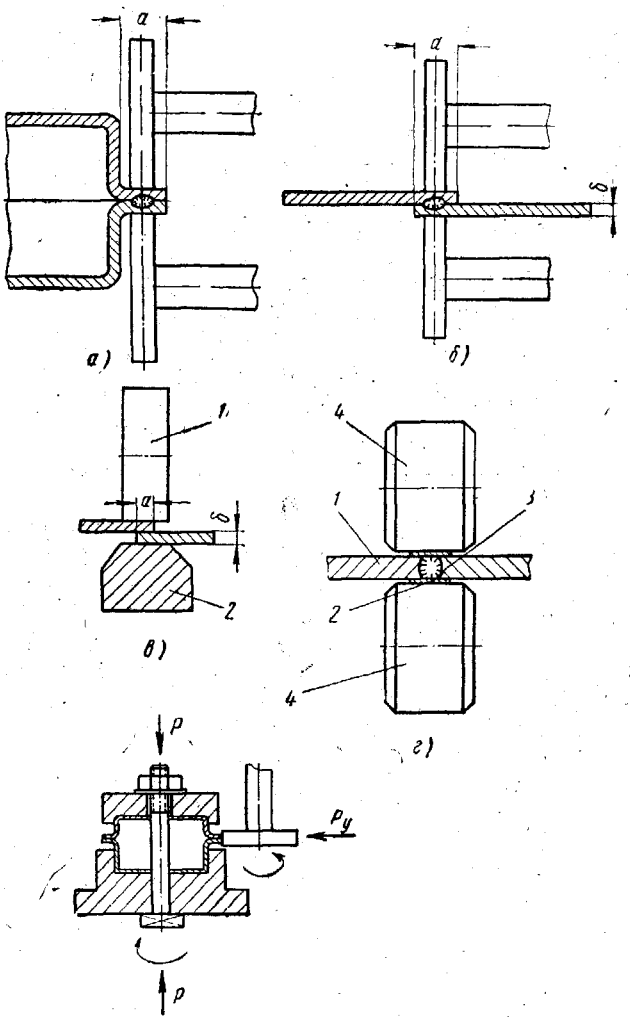
§ 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ И ТИПОВЫЕ УЗЛЫ

Роликовая сварка дает прочные или прочно-плотные (герметичные) соединения на изделиях из малоуглеродистой, нержавеющих и жаропрочных сталей, сплавов никеля, алюминия, магния, титана, медных сплавов и др.



Фиг. 103. Типы узлов, выполняемых роликовой сваркой.

Роликовая сварка широко используется в автомобилестроении (в бензиновом баке, фиг. 103, *а*, свариваются по контуру две штампованные детали из освинцованной стали; в глушителе, фиг. 103, *б*, свариваются продольный шов корпуса и его соединения с донышками; корпус глушителя малолитражного автомобиля сваривают из двух штампованных половин); в производстве электрохолодильников (изготовление шкафов, испарителей, фиг. 103, *в*, свариваемых по контуру из двух заготовок, загибаемых в П-образную форму после сварки); при изготовлении бидонов огнетушителей, в самолетостроении и др.



Фиг. 104. Типы соединений при роликовой сварке.

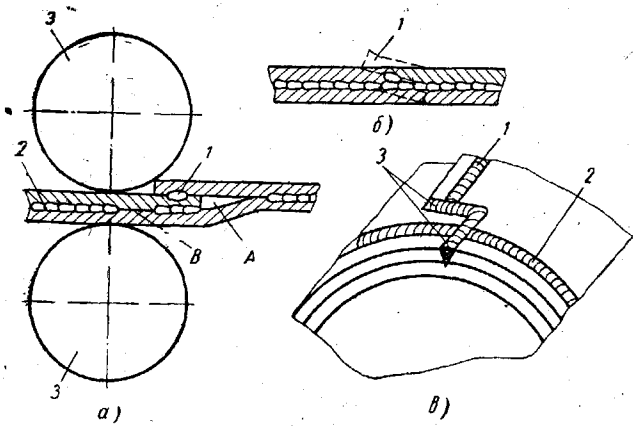
Наибольшее распространение при роликовой сварке получили соединения с отбортовкой (фиг. 104, *а*) и внахлестку (фиг. 104, *б*). Преимущества первого: размещение изделия, например, бензобака, вне контура сварочной машины и отсутствие пересекающихся швов. Это обеспечивает постоянство условий сварки и, как следствие, одинаковое качество шва по всему периметру соединения. Применение такой конструкции ограничивается необходимостью штамповки деталей с глубокой вытяжкой, что окупается только в массовом производстве. Ширина отбортовки a во избежание выдавливания нагретого металла, местного утонения деталей и понижения прочности соединения не должна быть меньше 12 *мм* при толщине стали $\delta = 1$ *мм*, 16 *мм* при $\delta = 1{,}5$ *мм* и 18 *мм* при $\delta = 2$ *мм*. Наиболее широко применяется соединение внахлестку, минимальная ширина которой $a = 12 \div 18$ *мм*. Обычно внахлестку и с отбортовкой сваривается материал толщиной до (в *мм*):

Мягкая декапированная сталь . . .	3+3
Горячекатаная малоуглеродистая сталь	1,5+2,5
Латунь и кремнистая бронза	1,5+1,5
Алюминиевые сплавы	3+3
Титан	2+2

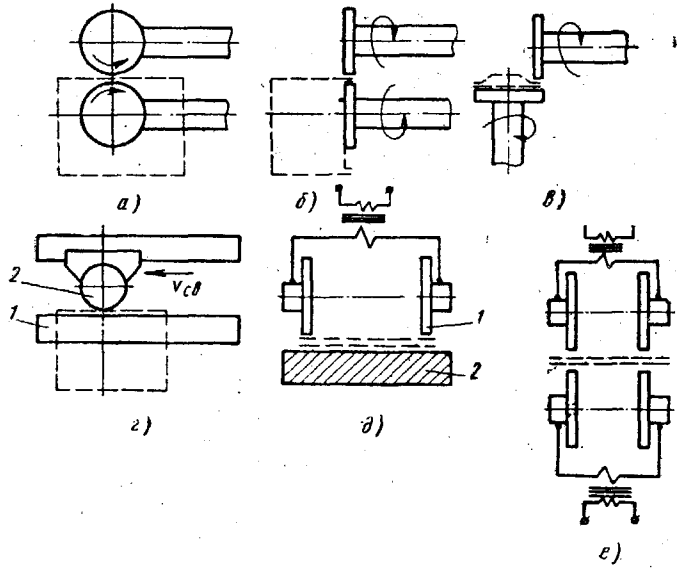
Следует отметить, что при большой толщине материала роликовая сварка часто менее рентабельна, чем дуговая.

Иногда требуется, чтобы после роликовой сварки на поверхности изделия не было уступа. В этих случаях возможна сварка с раздавливанием кромок. Соединение собирается с узкой нахлесткой $a = (1{,}5 \div 2)\delta$ и сваривается широким роликом *1* на оправке *2* (фиг. 104, *в*). Этот способ использован, в частности, при изготовлении шкафов электрохолодильников, проходящих последующее горячее эмалирование. Его основной недостаток — быстрый износ электродов и относительно невысокая прочность соединения. Прочный стык без уступа достигается и при сварке с накладками (фиг. 104, *г*), при которой свариваемые детали *1* собираются впритык между двумя узкими тонкими ленточками *2*, служащими как бы теплоизоляцией зоны сварки *3* от дисковых электродов *4*. При протекании тока металл в этой зоне плавится и образуется сварное соединение с вдавленными заподлицо ленточками фольги.

Мелкие неответственные детали из тонкой стали иногда свариваются по узкой отбортовке (фиг. 104, *д*). Обжатие силой P способствует образованию сварного соединения в пластическом состоянии. Роликовая сварка часто применяется на изделиях, состоящих из обечайки и донышек (см. фиг. 103, *б*). Обечайка сваривается по образующей продольным швом (продольная сварка) и с донышками — кольцевыми швами (поперечная сварка). Переход от продольной сварки к поперечной требует поворота на 90° плоскости расположения электродов.



Фиг. 105. Сопряжение продольного и кольцевого швов.



Фиг. 106. Расположение и типы электродов при роликовой сварке.

Без специальной подготовки деталей в месте пересечения продольного шва *1* с кольцевым *2* образуется зазор *А* (фиг. 105, *а*), который при сварке кольцевого шва электродами *3* может вызвать прожог; участок *В* остается непроваренным. В связи с этим конец продольного шва (до установки донышек) сошлифовывается «на ус» до удаления выступающей части кромок *1* заподлицо с поверхностью листа (фиг. 105, *б*). Иногда в углу листа обечайки при заготовке делается небольшой прямоугольный вырез. После роликовой сварки продольного шва *1* приваривается донышко кольцевым швом *2* (фиг. 105, *в*), не пересекающимся с продольным швом. В последнюю очередь подваривается участок *3* (газовой или дуговой сваркой). Могут также свариваться фланцевые швы (фиг. 106, *в*).

Современные роликовые машины имеют мощность от нескольких киловольтампер (конденсаторные машины для сварки тонкого материала) до 300—1000 *ква*. Как правило, они снабжены автоматической аппаратурой управления. Обычно машины имеют два дисковых электрода-ролика для двухсторонней сварки продольного, поперечного, или реже фланцевого шва (фиг. 106, *а*—*в*). Иногда свариваемые детали закрепляются на электроде-оправке *1*, по которой катится электрод *2* (фиг. 106, *г*). При односторонней сварке двух швов электроды *1* (фиг. 106, *д*) катятся по неподвижным деталям, лежащим на плоском электроде *2*. Возможна и двухсторонняя двухшовная сварка четырьмя электродами (фиг. 106, *е*).

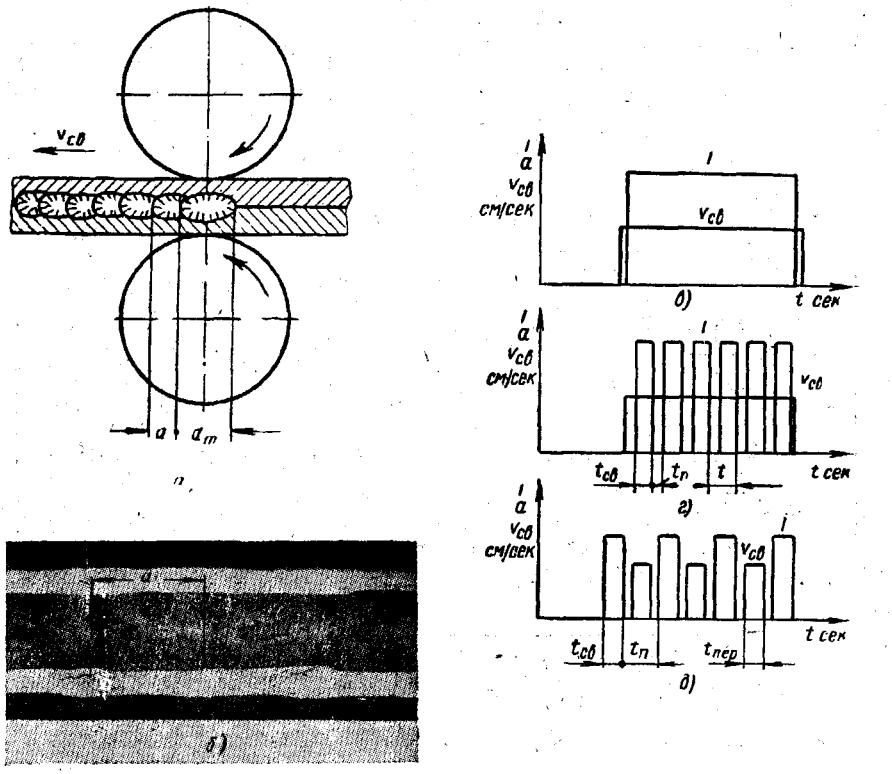
§ 2. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА И НАГРЕВ ПРИ РОЛИКОВОЙ СВАРКЕ

Роликовая сварка по существу является разновидностью точечной сварки, при которой отдельные точки диаметром $d_т$ частично перекрывают друг друга, образуя непрерывный шов (фиг. 107, *а*). Это хорошо видно на макрошлифе продольного разреза сварного шва (фиг. 107, *б*). Малый шаг точек способствует шунтированию тока, степень которого, однако, уменьшается вследствие высокого удельного сопротивления горячего металла ранее сваренной точки. Для получения плотного шва $a = (0{,}5 \div 0{,}6)\, d_т$. Если плотность шва необязательна, то a можно увеличить. При $a > d_т$ роликовая сварка переходит в высокопроизводительную роликоточечную сварку.

Роликовая сварка бывает непрерывной, прерывистой и шаговой. В первом случае свариваемые детали непрерывно перемещаются с постоянной скоростью $v_{св}$ при непрерывно включенном сварочном токе (фиг. 107, *в*). Во втором случае кратковременные импульсы тока $t_{св}$ (фиг. 107, *г*) чередуются с паузами $t_п$ при непрерывном движении деталей. При шаговой сварке (фиг. 107, *д*) в момент включения тока детали неподвижны.

Условия нагрева при роликовой и точечной сварке имеют много общего. Размеры литого ядра, определяющие при роликовой свар-

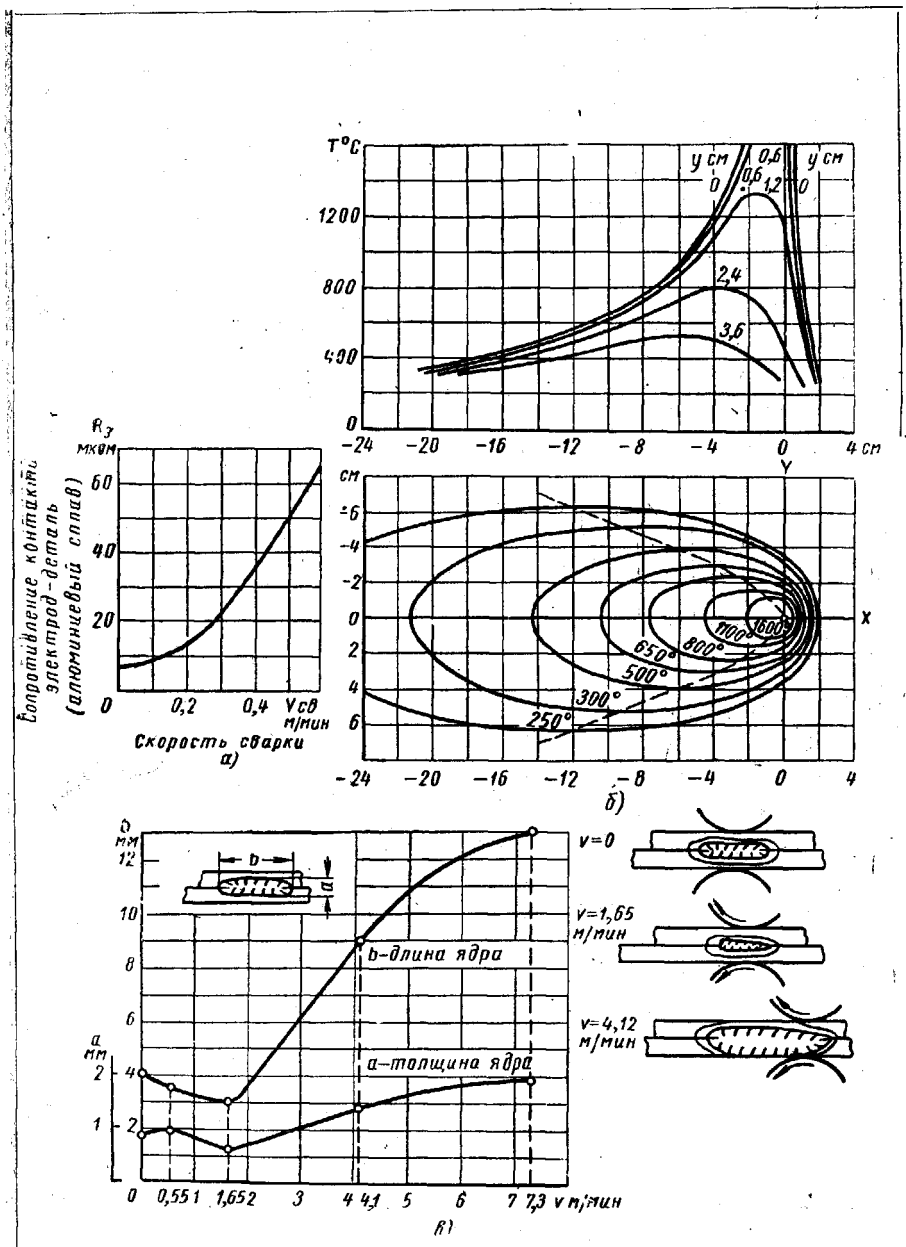
ке прочность и плотность шва, в обоих случаях зависят от положения изотермы температуры плавления свариваемого материала. Ток, продолжительность его включения и усилие сжатия электродов оказывают при роликовой сварке такое же влияние на размеры ядра (ширину шва и степень перекрытия смежных точек), как и при точечной сварке (фиг. 77 и 80). В то же время нагрев при роли-



Фиг. 107. Схема процесса роликовой сварки (*а*), макроструктура продольного разреза сварного шва (*б*), графики тока и скорости перемещения деталей при различных способах роликовой сварки (*в — д*).

ковой сварке имеет и существенные особенности, связанные с перемещением контакта электрод — деталь при включенном токе; подвижностью источника тепла и очень значительным шунтированием.

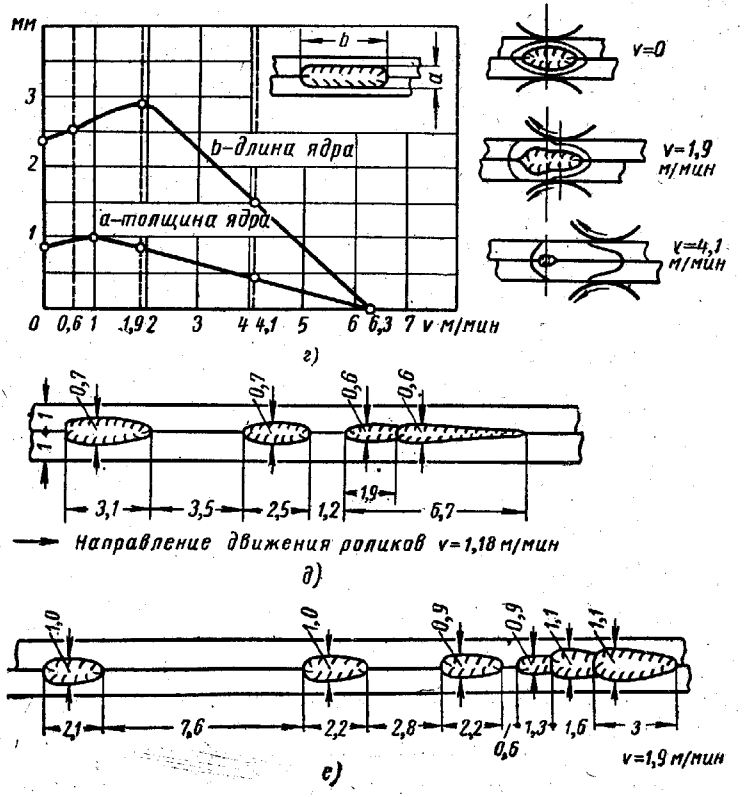
Сопротивление подвижного контакта выше, чем неподвижного (фиг. 108, *а*). Это приводит к интенсивному выделению тепла в подвижном контакте электрод — деталь, а при непрерывной сварке к его перегреву; поверхность деталей подплавляется, а на электрод налипают частицы свариваемого материала. Из-за пов-



Фиг. 108. Контактное сопротивление, распределение
а—зависимость сопротивления электрод—деталь от скорости сварки; *б* — квазистацио
плавления от скорости сварки дуралюмина и аустенитной стали; *д* и *е*—влияние шага

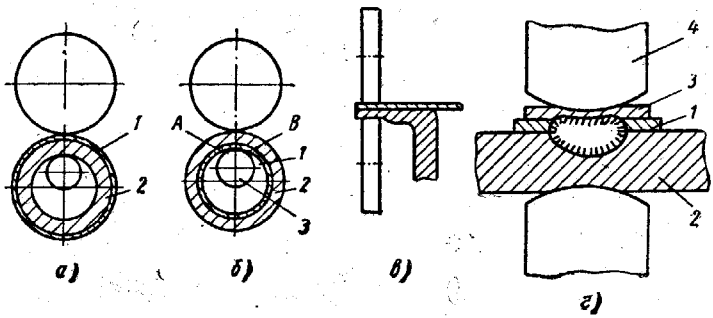
реждения деталей и быстрого износа электродов непрерывная роликовая сварка редко применяется. Паузы при наиболее распространенной прерывистой сварке улучшают охлаждение электродов и устраняют перегрев их контакта со свариваемыми деталями.

Скорость перемещения источника тепла (скорость сварки) существенно влияет на нагрев. Тепловые процессы при роликовой сварке вне непосредственной зоны проплавления можно рассматривать как нагрев тонкой пластины мощным быстродвижущимся линейным источником тепла. В предельном (квазистационарном) состоянии температурное поле (фиг. 108, *б*) перемещается вдоль шва со скоростью сварки. Характерен очень большой градиент температуры впереди источника. В предельном состоянии распределение температуры и скорость последующего охлаждения определяются погонной энергией (отношением $\frac{q}{v_{св}}$, где q — мощность в *кал/сек*, а $v_{св}$ — скорость в *см/сек*).



температуры, проплавление при роликовой сварке:
нарное температурное поле линейного подвижного источника; *в* и *г* — зависимости проточек на их форму при сварке дуралюмина и аустенитной стали.

При роликовой сварке мощность q растет почти линейно с увеличением $v_{св}$, поэтому погонная энергия мало зависит от скорости процесса и $v_{св}$ не должна сказываться на ширине зоны термического влияния и скорости охлаждения в ней. Однако $v_{св}$ очень сильно воздействует на тепловые процессы в непосредственной зоне сварки. Это влияние различно при сварке материалов с высокой и низкой тепло- и электропроводностью, что наглядно иллюстрируется размерами и формой литого ядра точки, свариваемой одним импульсом тока неизменной продолжительности при различной скорости вращения электродов. Например, при сварке дуралюмина ($\delta=1+1$ *мм*; $t_{св}=0{,}1$ сек.; $I_{св}=19000$ *а*; $P=250$ *кГ*) вначале с увеличением скорости от 0 до 1,65 *м/мин* (фиг. 108, *в*)



Фиг. 109. Роликовая сварка деталей неодинаковой толщины.

размеры ядра несколько уменьшаются, что объясняется вдавливанием вращающихся электродов в размягченный материал и улучшением теплоотвода. При большей скорости электроды все время приходят в контакт с холодным металлом; вдавливания почти нет и теплоотвод в электроды незначителен, поэтому ядро проплавляется на большую глубину и кристаллизуется без давления, что приводит к дефектам в ядре и сквозному проплавлению.

При сварке стали 1Х18Н9Т ($\delta=1+1$ *мм*; $t_{св}=0{,}1$ сек.; $I_{св}=9000$ *а*; $P=250$ *кГ*) вначале с ростом $v_{св}$ размер ядра несколько растет, а затем постепенно уменьшается из-за недостаточной погонной энергии (фиг. 108, *г*). При сварке материала с высокой тепло- и электропроводностью сильно влияет шунтирование тока. В этом случае с уменьшением шага точек уменьшается проплавление (фиг. 108, *д*). При сварке с высоким удельным сопротивлением (1Х18Н9Т) шунтирование незначительно, но существенно влияет подогрев материала впереди электродов, и поэтому с уменьшением шага точек проплавление увеличивается (фиг. 108, *е*). Вытянутая форма ядра с увеличенным проплавлением в его хвостовой части лимитирует скорость сварки. При максимальной практически при-

емлемой скорости кристаллизация расплавленного ядра должна заканчиваться между электродами.

При шаговой сварке сочетаются преимущества точечной сварки (нагрев и кристаллизация ядра при неподвижном контакте) с автоматическим образованием непрерывного шва. Этим способом удается хорошо сварить относительно толстые детали (3—4 *мм*) из алюминиевых сплавов.

Условия нагрева при роликовой сварке зависят от формы и толщины свариваемых деталей. Например, сварка кольцевого шва между тонкой и толстой деталями *1* и *2* легче выполняется при размещении тонкой детали снаружи (фиг. 109, *а*), чем внутри (фиг. 109, *б*). Для сварки необходимо, чтобы в контакте между деталями плотность тока была достаточно высокой. При внутреннем расположении тонкой детали из-за небольшой разницы в диаметрах детали и внутреннего электрода *3* их касание происходит по длинной дуге *AB*, что понижает плотность тока.

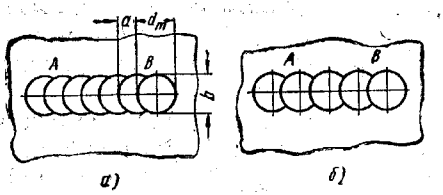
Желательно, чтобы соотношение толщины свариваемых деталей не превышало 2 : 1. Для улучшения условий нагрева возможно местное утонение одной из деталей (фиг. 109, *в*), а при большой разнице в толщине деталей *1* и *2* применение тонких теплоизолирующих прокладок *3* между тонкой деталью *1* и электродом *4* (фиг. 109, *г*). Иногда со стороны более тонкой детали *1* используют электрод из менее электропроводного материала, что способствует перемещению ядра в тонкую деталь и более равномерному проплавлению деталей неодинаковой толщины.

Режим роликовой сварки определяется шагом точек, усилием на электродах-роликах, их диаметром и профилем рабочей части, циклом сварки (длительностью каждого импульса тока и паузы при прерывистой сварке), скоростью сварки и величиной сварочного тока. На сварку заметно влияет также сопротивление деталей, зависящее от состояния их поверхности, точности заготовки и сборки.

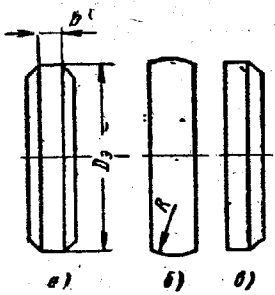
Шаг точек зависит от толщины материала и обычно лежит в пределах 1—5 *мм*. При сварке очень тонкого материала ($\delta = 0{,}03 \div 0{,}1$ *мм*) на конденсаторных машинах шаг $a = 0{,}2 \div 0{,}7$ *мм*. Чрезмерное перекрытие смежных точек ($a < 0{,}5\ d_m$) нежелательно. Оно приводит к уменьшению прочности соединения из-за спрямления границы шва *AB* (фиг. 110). Диаметр отдельных точек, определяющий ширину шва *b*, обычно лежит в пределах 2—8 *мм* (при $\delta \geqslant 0{,}5$ *мм*). Он зависит от толщины металла δ, от профиля рабочей части электродов и от режима сварки. Обычно шов несколько уже рабочей части электродов. Так же, как при точечной сварке, с увеличением усилия на электродах растет необходимый ток и мощность при повышении стабильности качества швов. В современной практике предпочитают большие усилия, ограничиваемые стойкостью электродов, которая повышается при: а) использовании электродных сплавов с высокой твердостью и электропроводностью; б) увеличении диаметра электродов; в) улучшении их охлаждения

(хорошие результаты дает наружное водяное охлаждение); г) применении прерывистой или шаговой сварки с оптимальным отношением длительности сварочных импульсов и пауз.

Если форма изделия допускает, то диаметр электродов должен быть не менее $D_э = 200 \div 250$ *мм*. При $D_э < 150$ *мм* увеличивается износ электродов. Электроды имеют цилиндрическую рабочую часть (фиг. 111, *а* и *в*) шириной b *мм* или сферическую рабочую часть радиусом R (фиг. 111, *б*).



Фиг. 110. Очертание роликового шва при малом (*а*) и большом (*б*) шаге образующих его точек.



Фиг. 111. Типовые профили дисковых электродов для роликовой сварки.

При прерывистой сварке продолжительность одного цикла $t = t_{св} + t_п$ в секундах (см. фиг. 107, *г*) определяется шагом точек a (*мм*) и скоростью сварки $v_{св}$ (*м/мин*) по формуле

$$t = \frac{a}{v_{св}\frac{1000}{60}} = \frac{0{,}06a}{v_{св}}. \qquad (55)$$

Отношение $\frac{t_{св}}{t}$ выбирается в зависимости от свойств свариваемого материала и обычно равно 0,30—0,70. С увеличением тепло- и электропроводности материала это отношение уменьшается, так как растет ток, необходимый для обеспечения провара. Включение значительного тока с малыми паузами $\left(\frac{t_{св}}{t} \approx 1\right)$ вызывает недопустимый перегрев поверхности свариваемых деталей и электродов.

Продолжительность цикла, а также $t_{св}$ и $t_п$ на машинах переменного тока всегда подбираются кратными периоду тока (0,02 сек.). Осуществление такого цикла обеспечивается аппаратурой управления (прерывателем) роликовых машин.

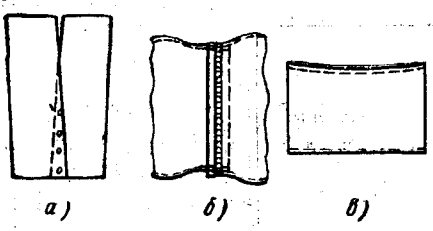
Обычно скорость прерывистой роликовой сварки равна 0,5—3,0 *м/мин*. Необходимый сварочный ток зависит от вида и толщины свариваемого материала и от скорости сварки. Как правило, ток при роликовой сварке на 20—50% выше, чем при точечной сварке аналогичных деталей.

При роликовой сварке очень важна тщательность заготовки, сборки и очистки деталей. Большие зазоры, затрудняющие точечную сварку, совершенно недопустимы при роликовой сварке. Значительное шунтирование приводит к резкому ухудшению качества швов при роликовой сварке плохо очищенного материала.

§ 3. ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

Детали перед сваркой подвергаются двухсторонней общей или местной (на ширине около 20 *мм*) очистке. Способы очистки такие же, как при точечной сварке.

Детали собираются в приспособлениях или на струбцинах и прихватываются точками с шагом 30—100 *мм*. Чем выше коэффициент теплового расширения материала и меньше его толщина, тем чаще располагаются прихватки. Нагрев кромок может их деформировать (фиг. 112, *а*), поэтому при прихватке надо следить за правильным взаимным положением деталей. Прихватки обычно располагаются по оси шва. Следует избегать (подбором режима) прихваток с глубоким вмятием, так как при последующей роликовой сварке они могут вызвать прожоги. Поверхность деталей в местах прихваток очищается после прихватки от окалины. Зазоры между собранными деталями равномерно распределяются по периметру соединения. Большие зазоры устраняются правкой.



Фиг. 112. Деформации при роликовой сварке.

Короткие швы свариваются от одного конца к другому; длинные — чаще от середины к концам. При роликовой сварке возникают заметные деформации (фиг. 112, *б* и *в*). Например, при сварке листов толщиной 0,8—1 *мм* из стали 1Х18Н9Т с высоким коэффициентом расширения поперечная усадка шва достигает 0,15—0,25 *мм*, а продольная 0,6—1,2 *мм/м*. Следует отметить, что при точечной сварке таких же листов с шагом 15 *мм* поперечная деформация меньше в 8—10, а продольная в 3—4 раза. Правка изделия по способу МВТУ им. Баумана обкаткой шва роликами вхолодную почти устраняет сварочные доформации.

§ 4. ТЕХНОЛОГИЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ И ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Эти материалы обычно свариваются на машинах переменного тока прерывистым способом. Малоуглеродистая и в особенности мягкая декапированная сталь с содержанием до 0,12% С благодаря пластичности и умеренной электропроводности очень хорошо под-

дается роликовой сварке. Холоднокатаную сталь перед сваркой желательно обезжиривать. Лучший способ очистки горячекатаной стали — травление.

При прерывистой сварке отношение $\frac{t_{св}}{t} = 0{,}5 \div 0{,}7$. При сварке стали дисковые электроды обычно имеют цилиндрическую рабочую поверхность (см. фиг. 111, *а*). Ориентировочные режимы сварки холоднокатаной малоуглеродистой стали приведены в табл. 16. При

Таблица 16

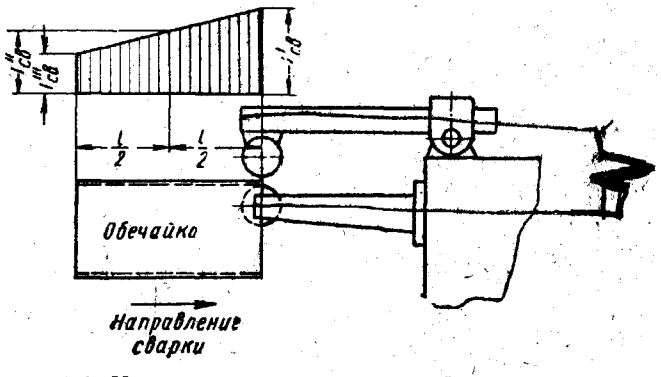
Ориентировочные режимы прочно-плотной роликовой сварки сталей и жаропрочных сплавов

Свариваемый материал	Толщина каждой детали в *мм*	Ориентировочный сварочный ток в *а*	Продолжительность в сек.		Усилие, приложенное к электродам, в *кГ*	Ширина рабочей части электродов в *мм*	Скорость сварки в *м/мин*	Коэффициент прочности шва при статической нагрузке
			импульса тока	паузы				
Отожженная холоднокатаная малоуглеродистая сталь	0,5	8 000—10 000	0,04	0,04	100—200	4,0	1,0—2,0	0,9—1,0
	1,0	12 000—15 000	0,08	0,12	300—500	5,0	1,0—1,5	
	1,5	14 000—18 000	0,10	0,14	400—600	7,0	0,6—1,0	
	2,0	16 000—20 000	0,14	0,16	500—700	9,0	0,5—0,6	
	3,0	20 000—24 000	0,18	0,18	750—900	11,0	0,5—0,6	
Низколегированная конструкционная сталь (30ХГСА)	1,0	10 000—12 000	0,14	0,10	300—600	6,0	0,5—0,7	0,8—0,9
	1,5	15 000—17 000	0,18	0,12	400—700	7,0	0,5—0,6	
	2,0	17 000—20 000	0,20	0,20	500—800	9,0	0,5—0,6	
Аустенитная сталь (1Х18Н9Т)	0,5	4 000— 8 000	0,06	0,06	150—400	4,0	1,0—1,5	0,9—1,0
	1,0	8 000—10 000	0,10	0,10	300—600	6,0	0,6—1,0	
	2,0	10 000—14 000	0,14	0,16	600—1000	9,0	0,5—0,7	
	3,0	15 000—17 500	0,16	0,18	1200—1300	11,0	0,5—0,6	
Жаропрочные сплавы типа нихрома (ХН75Т, ХН78Т)	1,0	10 000—13 000	0,12	0,12	500—600	6,0	0,7—1,0	0,8—0,9
	1,5	13 000—15 000	0,12	0,14	700—850	7,0	0,7—1,0	
	2,0	14 000—17 000	0,14	0,16	900—1000	9,0	0,6—0,7	

сварке горячекатаной стали целесообразно увеличивать усилие сжатия электродов (на 10—15%) и соответственно уменьшать скорость сварки. Большим скоростям и усилиям сжатия электродов соответствуют большие значения тока. При выборе конкретных параметров режима учитывается форма изделия, качество сборки и

очистки деталей, мощность имеющегося оборудования. Чем жестче детали (при данной их толщине), тем больше должно быть усилие сжатия электродов для получения швов стабильного качества.

Затруднения возникают при сварке продольных швов на изделиях (длиной l) из магнитной стали, вводимых в контур машины (фиг. 113). При этом непрерывно изменяется масса введенного в контур материала и, как следствие, изменяется сварочный ток. Ес-



Фиг. 113. Изменение тока при роликовой сварке продольного шва обечайки из ферромагнитной стали.

ли в начале сварки ток $I'_{св}$ обеспечивает хороший провар, то в середине шва ток $I''_{св}$ едва достаточен для сварки, а при токе $I'''_{св}$ конец шва не проваривается. Для борьбы с этим: а) длинные швы свариваются с двух сторон (длина вводимого в контур изделия уменьшается вдвое); б) шов разбивается на участки, свариваемые на различных режимах; в) в процессе сварки автоматически регулируется ток (плавно или ступенями). Последний способ требует специального оснащения, но наиболее удобен.

Малоуглеродистая сталь с защитными покрытиями сваривается на «жестких» режимах (для уменьшения зоны повреждения покрытия). При сварке оцинкованной стали рекомендуется применять $\frac{t_{св}}{t} = 0{,}80 \div 0{,}85$ с тем, чтобы цинк впереди зоны сварки поддерживался в расплавленном состоянии и вытеснялся из зазора между свариваемыми деталями. Это уменьшает выплески и улучшает качество соединения. При сварке стали с защитными покрытиями очень важна чистота электродов. При налипании на них частиц металла покрытия резко растет сопротивление электрод — деталь и в результате перегрева сильно повреждается покрытие деталей. Поэтому в машинах, предназначенных для сварки стали с покрытиями, электроды вращаются стальными шарошками с накаткой

(см. фиг. 202, *б*). При сварке накатка непрерывно снимает небольшую стружку с электродов и очищает их рабочую поверхность.

Закаливающиеся стали, например сталь 30ХГСА (см. табл. 16), для уменьшения скорости охлаждения сваривают на относительно «мягких» режимах ($t_{св}$ увеличивается приблизительно вдвое по сравнению со сваркой малоуглеродистой стали: максимальная скорость сварки не превышает 0,6—0,7 *м/мин*). Вследствие повышенной прочности легированной стали увеличивается усилие сжатия электродов. Даже сварка на «мягком» режиме дает хрупкие соединения (при «жестком» режиме в шве появляются трещины). Хрупкость устраняется последующей термообработкой.

Аустенитные стали хорошо свариваются роликовой сваркой. Немагнитность этих сталей облегчает сварку крупногабаритных изделий, так как при их введении в контур машины ток не изменяется. Из-за жаропрочности и низкой электропроводности аустенитных сталей усилие на электродах увеличивается на 30—100%, а ток уменьшается на 30—40% по сравнению с P и $I_{св}$ при сварке таких же деталей из малоуглеродистой стали (см. табл. 16). Отношение $\frac{t_{св}}{t} = 0{,}4 \div 0{,}6$. Обычно холоднокатаная сталь механически очищается в зоне шва. Лучший способ очистки горячекатаной аустенитной стали — травление. Если требуется особенно высокая коррозионная стойкость соединений и чистота поверхности, то детали подвергаются электрополированию, резко понижающему сопротивление контакта электрод-деталь и уменьшающему поверхностный перегрев стали (у шва почти нет цветов побежалости).

Аустенитные стали с небольшим содержанием феррита (например, 1Х18Н9Т) хорошо свариваются как на «жестких» (более предпочтительных), так и на «мягких» режимах. Чисто аустенитные стали (например, Х23Н18) из-за склонности к горячим трещинам свариваются на более «мягких» режимах.

Жаропрочные никелевые сплавы типа нихромов свариваются при еще бо́льших усилиях на электродах, чем аустенитные стали (табл. 16).

§ 5. РОЛИКОВАЯ СВАРКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Алюминиевые сплавы при толщине деталей до 1,5—2 *мм* можно сваривать на машинах переменного тока прерывистой сваркой $\left(\frac{t_{св}}{t} = 0{,}3\right)$. В связи с большим током (табл. 17) для их сварки требуются машины значительной мощности (250—350 *ква*). Для концентрации тока и уменьшения перегрева применяют электроды со сферической поверхностью (см. фиг. 111, *б*) при $R = 40 \div 150$ *мм*. Очень важна хорошая подготовка поверхности деталей (см. гл. IV, § 11). Необходимое усилие на электродах при сварке алюми-

Таблица 17

Ориентировочные режимы прерывистой роликовой сварки плотных швов алюминиевых сплавов

Толщина каждой детали в *мм*	Ориентировочный сварочный ток в *а*	Продолжительность в сек.		Усилие, приложенное к электродам, в *кГ*	Радиус сферы электрода в *мм*	Скорость сварки в *м/час*	Коэффициент прочности шва при статической нагрузке
		импульса	паузы				
0,5	21 000	0,02—0,04	0,06—0,08	250	40	0,8—1,2	Для АМг, АМц 0,8—1,0
1,0	29 000	0,04—0,06	0,06—0,10	350	50	0,8—1,2	Для Д16Т 0,5—0,6
1,5	38 000	0,06—0,10	0,10—0,14	500	100	0,8—1,2	Для В95Т 0,3—0,4

ниевых сплавов растет с увеличением прочности сплава и приближается к усилию P при сварке малоуглеродистой стали. Скорость сварки обычно меньше, чем при сварке стали по условиям нагрева (см. фиг. 108) и из-за потребления большой мощности. В околошовной зоне наблюдается некоторое разупрочнение сплава, что понижает коэффициент прочности соединения (как правило, в тем большей степени, чем выше исходная прочность материала).

Качество соединений улучшается и увеличивается возможная толщина свариваемого материала при шаговой сварке (см. фиг. 107, *д*). На машинах переменного тока с шаговой подачей свариваются детали из алюминиевых сплавов толщиной до 2 *мм*. На специальных машинах (типа МШШИ-400), использующих для сварки каждой точки импульс выпрямленного трехфазного тока, толщина материала увеличивается до 3—3,5 *мм* при скорости сварки 0,25—0,3 *м/мин* (табл. 18). Цикл сварки одной точки (0,3—1,2 сек.) состоит из перемещения деталей (15—25% общей длительности цикла); сжатия (0,04—0,2 сек.), сварки (0,06—0,07 сек.), кристаллизации ядра (0,16—0,75 сек.). С увеличением толщины материала удлиняется цикл прежде всего за счет увеличения времени кристаллизации. При сварке относительно мягких сплавов (АМг, АМц) с высокой электропроводностью ток несколько выше, а усилие на электродах значительно ниже, чем при сварке высокопрочных сплавов типа дуралюмина (Д16Т, В95Т).

Условия роликовой сварки медных сплавов определяются главным образом их электропроводностью. Сплавы с высоким удельным сопротивлением (кремнистая и фосфоритная бронза) свариваются хорошо. Латунь сваривается удовлетворительно при боль-

Таблица 18

Ориентировочные режимы шаговой сварки плотных швов алюминиевых сплавов на импульсных машинах

Толщина каждой детали в *мм*	Радиус сферы электродов в *мм*	Шаг точек в *мм*	Сплавы АМц, АМг				Сплавы Д16Т, В95Т			
			Ток в *а*	Импульсы тока в сек.	Усилие на электродах в *кГ*	Число импульсов в мин.	Ток в *а*	Импульсы тока в сек.	Усилие на электродах в *кГ*	Число импульсов в мин.
1,0	100	2,5	49 600	0,06	350	120—150	48 000	0,08	550	120—150
1,5	100	2,5	49 600	0,10	420	120—150	48 000	0,12	850	101—120
2,0	150	3,8	51 400	0,12	550	100—120	51 400	0,12	900	80—100
3,0	150	4,2	60 600	0,16	700	60—80	51 400	0,14	1000	60—80
3,5	150	4,2	—	—	—	—	51 400	0,16	1000	60—80

шом токе. Тонкий материал хорошо сваривается на конденсаторных машинах с шаговой подачей.

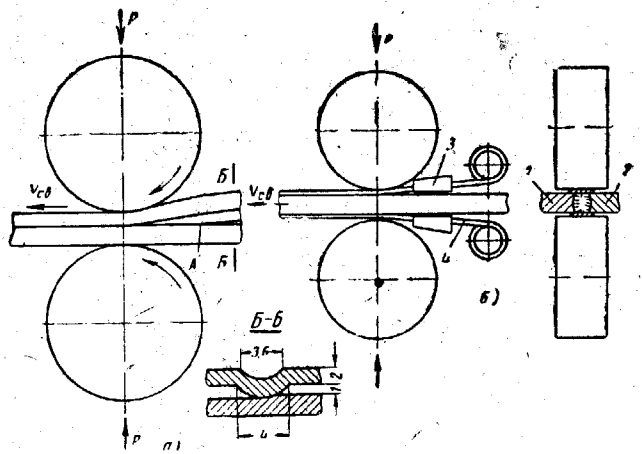
Титан и его сплавы, близкие по своим теплофизическим свойствам к аустенитным сталям, хорошо свариваются прерывистым способом на обычных машинах переменного тока.

§ 6. РЕЛЬЕФНО-РОЛИКОВАЯ СВАРКА И РОЛИКОВАЯ СВАРКА ВСТЫК С НАКЛАДКАМИ

Эти способы отличаются от обычной роликовой сварки условиями формирования соединения. Они расширяют технологические возможности процесса. При рельефно-роликовой сварке, предложенной Институтом электросварки им. Е. О. Патона, в одной из деталей перед сваркой вдоль шва выдавливается непрерывный рельеф (фиг. 114, *а*). Концентрация тока по рельефу локализует тепловыделение и надежная сварка достигается без глубокого проплавления. Благодаря этому кристаллизация в зоне сварки завершается очень быстро, что позволяет резко увеличить скорость сварки. Например, малоуглеродистая сталь толщиной 2 *мм* сваривается со скоростью 20 *м/мин* при $I_{св} = 70\,000$ *а*, $P = 1750$ *кГ*, диаметре электродов около 500 *мм* и $f = 50$ *гц*. Рельефно-роликовой сварке способствует то, что в точке *А*, где обжимаемые электродами детали приходят в соприкосновение, начинается оплавление их поверхности, разрушающее окисные пленки.

При сварке с накладками (фиг. 114, *б*) детали *1* и *2* собираются встык без зазора. С обеих сторон к стыку подаются через направляющие *3* стальные ленточки *4* шириной 4—6 *мм* и толщиной 0,3—0,4 *мм*. Благодаря теплоизолирующему действию накладок де-

тали в стыке проплавляются почти насквозь с образованием прочно-плотного соединения. Накладки обычно вдавливаются заподлицо с поверхностью деталей и образуется соединение, хорошо работающее как при статической, так и при циклической нагрузке. Например, при пределе выносливости соединения внахлестку листов из стали 20, равном 14 *кГ/мм²*, предел выносливости соединения с накладками достигал 18 *кГ/мм²* (предел выносливости стали



Фиг. 114. Схемы рельефно-роликовой сварки (*а*) и роликовой сварки с накладками (*б*).

22 *кГ/мм²*. Этим способом хорошо свариваются стали, никелевые сплавы, титан и его сплавы. Толщина свариваемого материала обычно не превышает 3—4 *мм*; скорость сварки 0,5—1,0 *м/мин*. Листы с такими стыками могут штамповаться и прокатываться вхолодную. Сварка с накладками возможна на обычных машинах, снабженных устройствами для подачи к стыку ленточных накладок. Менее удобна сварка стыков с предварительно прихваченными накладками.

§ 7. РОЛИКОСТЫКОВАЯ СВАРКА ТРУБ

При роликостыковой сварке плотный шов образуется между кромками трубной заготовки (см. фиг. 13, *б*), непрерывно движущейся под электродами сварочной машины. Сварочный ток пересекает контакт между кромками и нагревает их в основном теплом, выделяемым в этой зоне. Сопротивление контакта зависит от величины сжимающего усилия *P*, которое обеспечивает и необходимую для сварки пластическую деформацию (осадку) нагретых кромок. Этим способом могут свариваться как трубы малого диаметра

(от 6 *мм*) при толщине стенки менее 0,5 *мм*, так и большого диаметра. Известны случаи сварки труб диаметром до 660 *мм* при толщине стенки 20 *мм*. Наиболее распространена сварка труб диаметром 10—153 *мм* из малоуглеродистой стали.

Для получения трубной заготовки стальная лента, точно обрезанная по ширине и очищенная на участке, контактирующем с электродами (при горячекатаном металле), непрерывно пропускается через специальную формовочную машину с 5—12 клетями. В ее валках из ленты постепенно формуется круглая заготовка с расположенным вверху зазором (фиг. 115, *а* и *б*). Сформованная заготовка поступает в сварочную машину, где шов-сжимающие валки *1* и дисковые электроды *2* образуют замкнутый калибр (фиг. 115, *в*). Ширина ленты B связана с наружным диаметром трубы $D_н$ и толщиной ее стенки δ зависимостью

$$B = (D_н - \delta)\pi + \Delta B_1 + \Delta B_2, \qquad (56)$$

где ΔB_1 — припуск на величину осадки стыка ($\Delta B_1 = \delta$ при $\delta = 1$ *мм*; $\Delta B_1 = 0{,}7\,\delta$ при $\delta = 1$—4 *мм*; $\Delta B_1 = 0{,}5\,\delta$ при $\delta > 4$ *мм*);

ΔB_2 — припуск на уменьшение периметра трубы при ее обжатии в калибровочной машине, расположенной за сварочной установкой [$\Delta B_2 = (0{,}007 \div 0{,}01)\,B$].

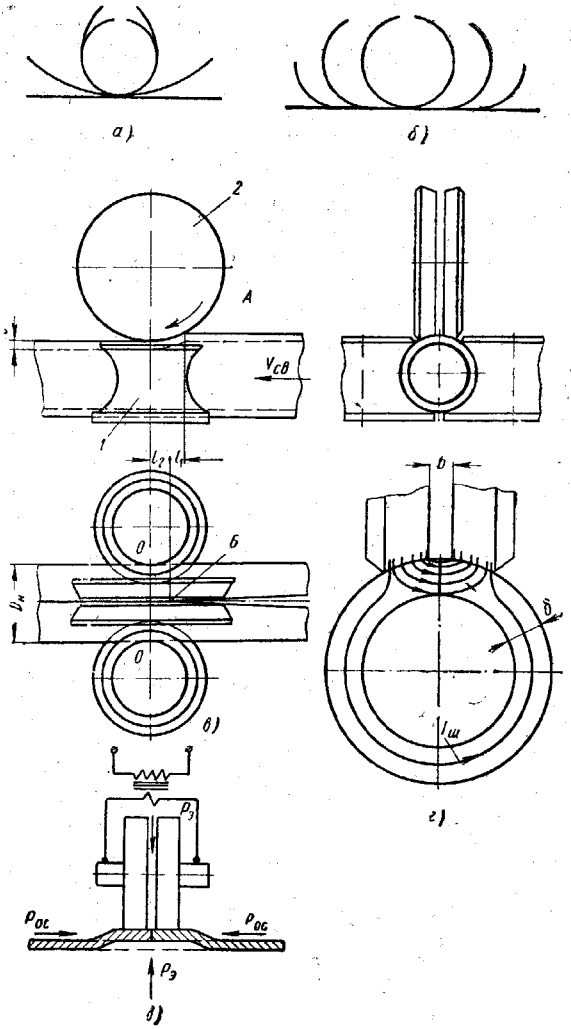
Обычно толщина стенки свариваемой трубы связана с ее диаметром соотношением

$$\delta = \left(\frac{1}{12} \div \frac{1}{50}\right) D_н. \qquad (57)$$

При меньшей толщине δ мала жесткость заготовки, и при обычных методах формовки трудно обеспечить совмещение кромок, без которого невозможна качественная сварка. При большей толщине не достигается равномерный прогрев кромок из-за повышенной плотности тока у наружной поверхности трубы (фиг. 115, *г*). Чем больше δ, тем больше неравномерность распределения тока по толщине металла. Для ее уменьшения расстояние между электродами b увеличивается с ростом δ ($b \approx 2\delta$).

Возможна и роликостыковая сварка листов. Для этого их кромки предварительно выгибаются (фиг. 115, *д*). Под действием $P_э$ возникают силы $P_{ос}$, осаживающие шов за счет спрямления листа, как показано пунктиром.

Трубная заготовка перемещается под электродами со скоростью сварки (обычно $v_{св} = 10 \div 60$ *м/мин*). Холодные кромки заготовки впервые приходят в контакт с электродами в точке A (фиг. 115, *в*). На участке $АБ$ длиной l_1 кромки еще не касаются друг друга, поэтому за время $t_1 = \frac{l_1}{v_{св}}$ они почти не нагреваются. От $Б$ до оси электродов $О - О$ кромки находятся в контакте между со-



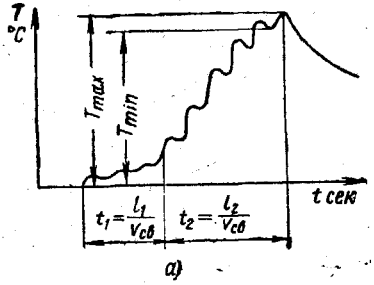
Фиг. 115. Роликостыковая сварка:

а и *б* — схемы постепенной формовки трубной заготовки из ленты при малом и большом диаметре трубы; *в* — образование очага сварки *ОБ*; *г* — неравномерное распределение тока и его шунтирование при сварке толстостенной трубы; *д* — схема ролико-стыковой сварки листов с предварительно выгнутыми кромками

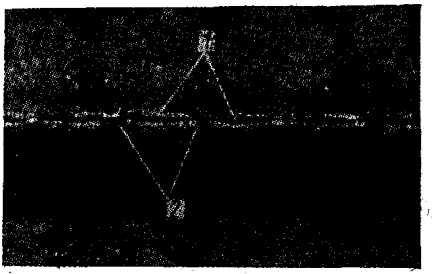
бой и с электродами. Здесь на участке $l_2 = ОБ$, называемом очагом сварки, в течение $t_2 = \frac{l_2}{v_{св}}$ кромки интенсивно нагреваются. Длина очага сварки определяется диаметром трубы и толщиной ее стенки. Обычно $l_2 = 15 \div 20$ *мм*. При нормальных скоростях процесса время нагрева в очаге сварки составляет 0,02—0,16 сек. При таком кратковременном нагреве синусоидальное изменение переменного тока 50 *гц* уже влияет на нагрев кромок. В момент максимума тока нагрев наиболее интенсивен, а при его нулевом значении возможно даже охлаждение кромок в результате теплопередачи в окружающий холодный металл. Это влияние растет с увеличением $v_{св}$. Если скорость сварки (или частота тока) такова, что очаг сварки проходится заготовкой в течение, например, шести периодов переменного тока, как это показано на фиг. 116, *а*, то разность между максимальной (T_{max}) и минимальной (T_{min}) температурами, возможными к концу нагрева, относительно невелика. Если же очаг сварки проходится за один-два периода, то $T_{max} - T_{min}$ растет настолько, что качественное соединение исключается. Практически трубы из малоуглеродистой стали могут иметь плотные швы при $T_{max} \approx T_{плав}$ и $T_{min} \geqslant 1100°$ $\left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \leqslant 1{,}5\right)$. При этом в шве чередуются участки, сваренные с расплавлением и без расплавления (фиг. 116, *б*). Температурный интервал сварки труб из легированных сталей значительно уже, поэтому скорость сварки таких труб на 25—50% меньше. При токе 50 *гц* трубы из малоуглеродистой стали свариваются со скоростью до 20—32 *м/мин* (с увеличением δ предельная скорость уменьшается из-за увеличения неравномерности нагрева по толщине стенки). Для повышения предельной скорости увеличивают частоту тока (обычно до 100—300 *гц*). Исследование нагрева движущихся кромок трубы источником тепла, интенсивность которого изменяется по синусоидальному закону, позволило УКРНИТИ установить зависимость $\frac{T_{max}}{T_{min}}$ от f при различных скоростях сварки (фиг. 116, *в*), из которой, в частности, следует, что неравномерность нагрева $\left(\frac{T_{max}}{T_{min}}\right)$ при $v_{св} = 60$ *м/мин* и частоте 200 *гц* не выше, чем при обычной скорости сварки $v_{св} = 30$ *м/час* и $f = 50$ *гц*.

В сварочном калибре, образованном электродами и шов-сжимающими валками, трубная заготовка должна быть сжата усилием, достаточным для доведения кромок заготовки до соприкосновения и для осадки шва. Электроды прижимаются к кромкам трубы настолько, чтобы контактное сопротивление электрод — деталь не было чрезмерным.

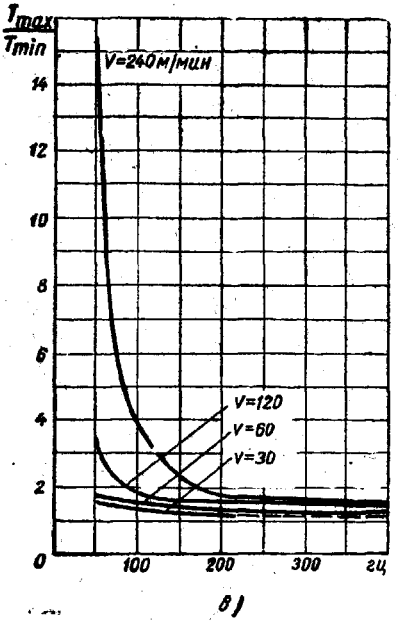
Усилие, развиваемое шов-сжимающими валками, растет с увеличением толщины стенки трубы (при $\delta = 2{,}5 \div 5$ *мм* $P = 2000 \div$



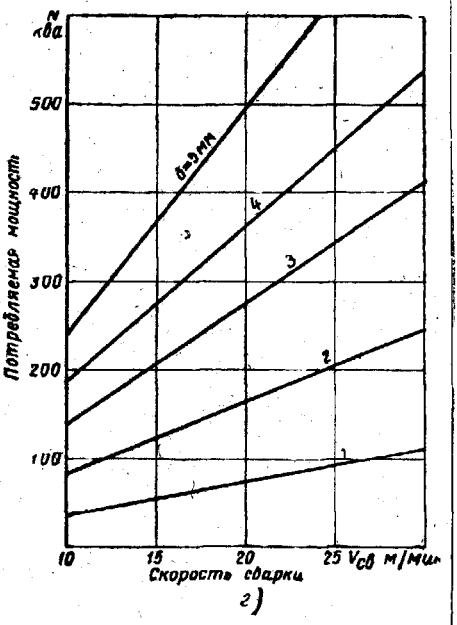
а)



б)



в)



г)

Фиг. 116. Изменение при роликостыковой сварке труб:

а — температуры в очаге сварки; *б* — формирования шва с внутренней стороны (*1* — оплавленные участки; *2* — участки, сваренные без расплавления); *в* — соотношения максимальной и минимальной температур в зависимости от частоты тока при разной скорости сварки; *г* — потребляемой мощности в функции скорости сварки и толщины стенки трубы ($f = 50$ *гц*).

÷ 7000 *кГ*). При этом суммарное усилие нажатия электродов составляет 3000—4000 *кГ*.

Потребляемая мощность приблизительно пропорциональна толщине стенки трубы и скорости сварки.

$$N = k_0 \delta v_{св}. \qquad (58)$$

Удельная мощность k_0 при $f = 50$ *гц* и $\delta = 1 \div 5$ *мм* составляет 3,5—5 $\frac{ква}{мм \frac{м}{мин}}$ (фиг. 116, *г*). С увеличением δ удельная мощность растет (до 8—10 $\frac{ква}{мм \frac{м}{мин}}$ при $\delta = 8 \div 12$ *мм*), так как для обеспечения равномерного прогрева кромок по толщине и требуемой осадки при этом необходимо расширение зоны нагрева, что достигается увеличением расстояния между электродами *b* (см. фиг. 115, *г*). Удельная мощность несколько растет при уменьшении диаметра свариваемой трубы (из-за увеличения тока в шунте $I_ш$) и увеличивается на 25—40% с повышением частоты до 100—150 *гц*. В современных трубосварочных станах мощность достигает 4000 *ква*. На стане мощностью 500 *ква* при частоте 150—180 *гц* трубы с толщиной стенки 2 *мм* сваривают со скоростью до 45—50 *м/мин*.

По выходе трубы из сварочного калибра горячий грат снаружи трубы срезается резцом. Внутренний грат обычно не удаляется, а в случае необходимости он раскатывается роликом или срезается резцом. Затем шов принудительно охлаждается и непрерывно движущаяся холодная труба поступает в калибровочную часть стана, где ей придается правильная круглая форма. Далее труба с помощью летучего отрезного устройства режется на куски заданной длины.

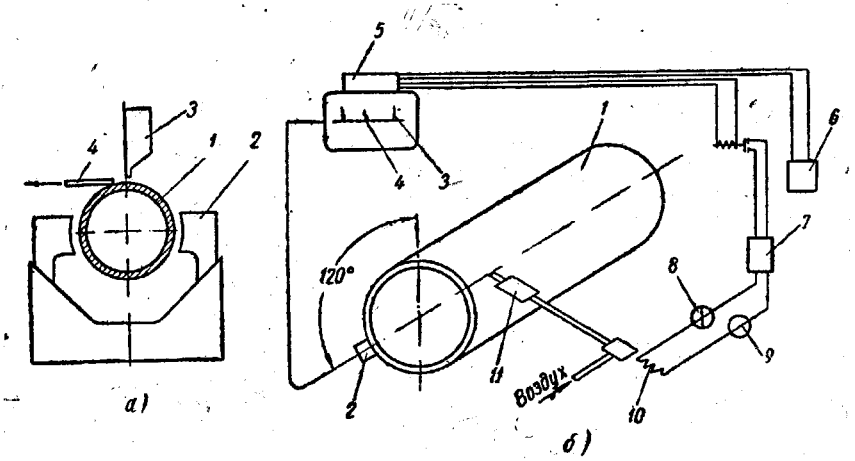
Очень высокую производительность дает сочетание сварки с горячим редуцированием труб до меньшего диаметра (например, со 102 до 25 *мм*) в многоклетьевом стане. Готовая труба (свариваемая со скоростью около 30 *м/мин*) выходит из редукционного стана со скоростью до 200 *м/мин*. В редукционный стан поступают трубы относительно большого диаметра (89—102 *мм*), что облегчает удаление внутреннего грата. Нагрев трубы по всему сечению, необходимый для ее редуцирования, способствует выравниванию структуры стали.

§ 8. ДЕФЕКТЫ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

Обычной роликовой сварке внахлестку и точечной сварке присущи одинаковые дефекты, поэтому и контроль их качества осуществляют одинаковыми методами. Важнейшее значение имеет активный контроль процесса, сопровождаемый периодическим испыта-

нием образцов (технологическими пробами, механическим испытанием и металлографическим исследованием). Кроме того, прочно-плотные швы проверяются на герметичность, например, автомобильные бензобаки испытываются сжатым воздухом при погружении в воду. Неплотность швов обнаруживается пузырьками воздуха.

Для непрерывного контроля продольного шва труб предложены два способа: магнитный и более совершенный ультразвуковой.



Фиг. 117. Схема магнитного (*а*) и ультразвукового автоматического контроля (*б*) качества продольного шва трубы.

При магнитном контроле сваренная труба *1* (фиг. 117, *а*) проходит между полюсами магнита *2*. Из бункера *3* на шов непрерывно подается магнитный порошок. Его излишки отсасываются соплом *4*. На участке со значительным непроваром на шве остается порошок в виде черной линии, обнаруживаемой фотоэлектрической следящей системой, подающей импульс на сигнальное устройство и автоматический отметчик, набрызгивающий на дефектный участок трубы полосу краски.

При ультразвуковом контроле по поверхности трубы *1* (фиг. 117, *б*) скользит щуп *2*, вводящий в нее ультразвуковые колебания. Под щуп подается масло для улучшения контакта. Ультразвук многократно отражается от внутренней и наружной поверхностей трубы, возвращается в щуп и дает на экране прибора отраженный импульс *3*. Дефект в шве отражает ультразвуковые колебания, и на экране появляется промежуточный импульс *4*. Усилитель *5* передает его на осциллограф *6*, позволяющий следить за протяженностью дефекта, и на реле времени *7*. Последнее включает сигнальную лампочку *8* и звонок *9*, а также клапан *10* разбрызгивателя краски *11*, отмечающего бракованный участок трубы.

Ультразвуковая дефектоскопия в отличие от магнитной выявляет дефекты (несплошность) очень малой толщины.

При отсутствии автоматического контроля из трубы периодически вырезаются куски для испытания на сплющивание и раздачу конусом. Плотность швов проверяют гидроиспытанием.

§ 9. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

Роликовая сварка внахлестку рентабельна при небольшой толщине свариваемого металла (обычно до 2—3 *мм*). Если ее применение вызывает замену горячекатаной стали более дорогой декапированной, то пределы рентабельности роликовой сварки еще суживаются (до 2 *мм*). При роликовой сварке доля машинного времени относительно велика (редко ниже 50%), поэтому увеличение скорости сварки (в частности, при рельефно-роликовом процессе) существенно повышает ее производительность. Как и при точечной сварке, использование механических операторов, например при сварке бензобака автомобиля на ГАЗе, позволяет одному сварщику обслуживать две сварочные машины, что удваивает его производительность.

Расход электроэнергии быстро увеличивается с повышением толщины свариваемого материала (см. фиг. 70, *в*). Расход медных сплавов на электроды при их интенсивном охлаждении в сварке внахлестку декапированной стали достигает 100—300 *г* на 100 *м* шва. При сварке очищенной горячекатаной стали и в особенности стали с защитными покрытиями он увеличивается.

ГЛАВА VI

ПОВЕРХНОСТНАЯ СВАРКА

§ 1. СВАРКА ПО МЕТОДУ ИГНАТЬЕВА

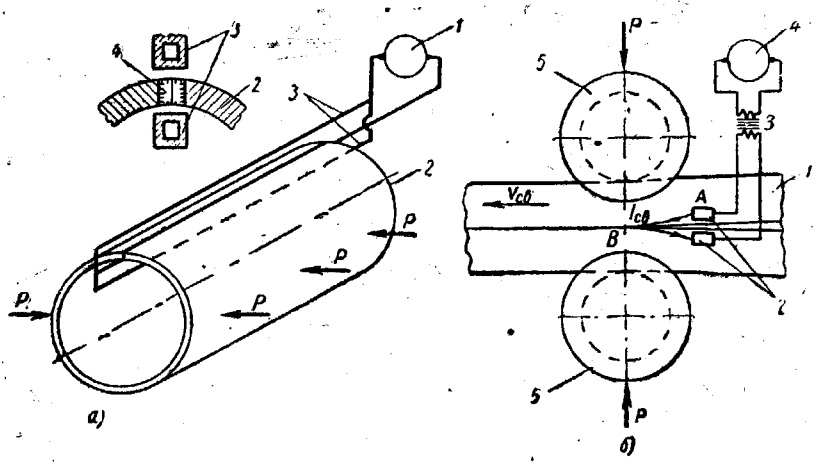
При поверхностной сварке в отличие от остальных способов контактной сварки ток протекает не перпендикулярно, а параллельно плоскости соединения. Ее принципиальное преимущество состоит в том, что выделение тепла не концентрируется в сварочном контакте, сопротивление которого может существенно колебаться, а целиком идет за счет работы тока на собственном сопротивлении свариваемого материала. Поверхностная сварка была впервые предложена советским изобретателем А. М. Игнатьевым в двух вариантах: прессовая сварка и непрерывная роликовая сварка. При прессовой сварке заготовки *1* и *2* (см. фиг. 66) зажимаются между асбестовыми изоляционными прокладками *4*. К концам более длинной заготовки *2* усилием P_1 прижимаются электроды *3*, соединенные со сварочным трансформатором. При медленном нагреве (со скоростью около 7°/сек) заготовки нагреваются равномерно по длине и сечению до температуры сварки ($T_{св} = 1250 \div 1300°$), после чего они обжимаются прессом с усилием P_2 и свариваются без расплавления. Для защиты от окисления место сварки покрывается флюсом (бурой).

При роликовой сварке (см. фиг. 38) заготовки *1* и *2* перемещаются со скоростью v_c между двумя парами дисковых электродов, размещенных в коробке, в которую подается газ для защиты от окисления. Заготовки на участке *AB* постепенно нагреваются и под действием усилия *P* свариваются. Сварка по способу Игнатьева получила ограниченное применение из-за большого расхода энергии на сквозной прогрев заготовок и трудности обеспечения провара без расплавления.

§ 2. СВАРКА Т. В. Ч.

В последнее время разрабстаны два способа поверхностной сварки т. в. ч. без сквозного прогрева. В первом, предложенном НИИТВЧ для сварки продольного шва труб большого диаметра сразу по всей длине, используется ток 2500 *гц*. Ток от машинного генератора *1* протекает вдоль собранных встык кромок трубной

заготовки *2* (фиг. 118, *а*) и возвращается по медным шинам *3*, параллельным стыку. Вследствие эффекта близости ток концентрируется в зоне стыка *4*, расположенной между шинами. По достижении требуемой температуры выключается ток и стык осаживается силами *P*. Так как нагрев незащищенной стали сопровождается ее окислением, осадка должна проводиться при температуре, превышающей температуры затвердения окислов. Это



Фиг. 118. Схемы одновременной (*а*) и последовательной (*б*) сварки продольного шва трубы т. в. ч.

облегчает их удаление в расплавленном состоянии. Наиболее легкоплавкий окисел (FeO), образующийся при сварке нелегированных сталей, плавится при 1370°, поэтому сварка сопровождается перегревом стали в зоне стыка и после нее требуется нормализация. Для сварки этим способом трубы с толщиной стенки 8—10 *мм* в течение 25—30 сек. необходимо напряжение около 100 *в* на погонный метр (при 12-метровой трубе U_2=1200 *в*) и мощность порядка 300 *квт/м*. После сварки должен быть срезан наружный и внутренний грат.

При втором способе продольный шов трубы сваривается током радиочастоты (до 450 000 *гц*). Ток подводится к кромкам непрерывно движущейся трубной заготовки *1* (фиг. 118, *б*) скользящими контактами *2* через трансформатор *3* от лампового генератора *4*. Вследствие эффекта близости ток течет вдоль кромок. Из-за высокой частоты глубина его проникания в металл очень мала. При большой скорости $v_{св}$ (до 60 *м/мин* и выше) тепло выделяется у самой кромки и не успевает заметно распространиться в толщу металла. Кромки постепенно нагреваются на участке *AB* до расплавления. Ролики *5* сжимают заготовку уси-

лием P и осуществляют сварку с выдавливанием из стыка пленки расплавленного металла. В этой схеме ток пересекает плоскость сварки, однако тепловыделение в контакте между кромками в данном случае не существенно, так как сопротивление контакта при токе радиочастоты очень мало. Большая скорость и наличие на кромках расплавленного слоя позволяют сваривать этим способом трубы из легких сплавов и нержавеющей стали, обычная роликостыковая сварка которых затруднена образованием тугоплавких окисных пленок (Al_2O_3, Cr_2O_3). Постепенный нагрев кромок обеспечивает равномерный их провар по длине трубы и стабильное качество сварки. Относительно малый ток и низкое контактное сопротивление при токе радиочастоты позволяют сваривать трубы из неочищенной стали с использованием простейших скользящих электродов. При мощности менее 100 *квт* описанным способом могут свариваться стальные трубы с толщиной стенки до 3—4 *мм*.

ГЛАВА VII

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАШИНАМ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

§ 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИН

Все машины для контактной сварки состоят из двух взаимосвязанных частей: механической и электрической. Механическая часть машины представляет собой более или менее сложный станок для закрепления, сжатия и перемещения свариваемых деталей с органами управления и устройствами для регулирования основных механических параметров (усилий зажатия и осадки, скоростей перемещения и т. д.). Часто элементы этих механизмов проводят сварочный ток.

Электрическая часть машины обычно состоит из сварочной цепи (*сварочного контура*), подводящей ток от источника питания к электродам; *источника питания* (в большинстве машин — однофазного понизительного трансформатора); аппаратуры управления, обеспечивающей заданную последовательность и продолжительность всех или части операций сварочного цикла и, в частности, требуемую продолжительность импульса сварочного тока (*прерывателя*), а также регулирующей основные электрические параметры процесса (мощность, напряжение, форму кривой тока).

К механической части машины (включая в нее силовые элементы сварочного контура), помимо прочности и эксплуатационной надежности, предъявляются следующие требования:

а) жесткость (большие деформации стыковых машин вызывают смещение и перекос свариваемых деталей; малая жесткость точечных и роликовых машин ведет к взаимному смещению электродов и деформациям свариваемого изделия);

б) быстрота срабатывания, необходимая при малой продолжительности сварочного цикла;

в) повторяемость цикла (сжатия, оплавления и осадки и т. д.) и постоянство заданных параметров (например, усилия сжатия электродов P), существенно влияющих на сварку, в частности, для обеспечения P-const во время быстрого нагрева и кристаллизации ядра при сварке легких сплавов электроды должны следо-

вать за термическими и усадочными деформациями зажатых между ними деталей без существенных сил трения и инерции, что возможно только при малом весе подвижных частей машины;

г) быстрая смена электродов и удобное регулирование их положения; доступность отдельных частей машины при ремонте;

д) маневренность элементов сварочного контура, позволяющая использовать машину для сварки изделий различной формы без сложных приспособлений;

е) водяное охлаждение всех интенсивно нагревающихся частей;

ж) надежная защита трансформатора и всех трущихся и контактных поверхностей от попадания воды (при повреждении системы охлаждения) и брызг расплавленного металла.

Электрическая часть машины должна развивать при сварке требуемую мощность с достаточно высоким к. п. д. и без недопустимого нагрева ее элементов; иметь соответствующую внешнюю характеристику (см. § 2); обеспечивать безопасность работы (неизолированные части, находящиеся под напряжением сети, защищаются от случайного прикосновения; напряжение в цепях управления, проводка которых доступна для прикосновения при нормальной работе, не должно превышать 36 *в*; одна точка сварочного контура должна быть электрически соединена со станиной машины, а станина надежно заземлена; обслуживающий персонал должен быть защищен от ожогов и поражения током).

Машины за исключением оборудования малой мощности должны иметь механизированный привод. В небольших машинах с ручным или педальным приводом часто автоматизируется включение сварочного тока. Большинство современных машин с механизированным приводом работает по полностью автоматическому циклу. Существуют, наконец, машины-автоматы с программным управлением и автоматические линии, осуществляющие автоматически все операции по сварке изделия, включая его перемещение, периодическую зачистку электродов, изменение режима (если оно требуется) и др. В таких машинах и линиях сварка обычно сочетается с операциями сборки и механической обработки деталей.

§ 2. МОЩНОСТЬ, РЕЖИМ РАБОТЫ И ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИНЫ

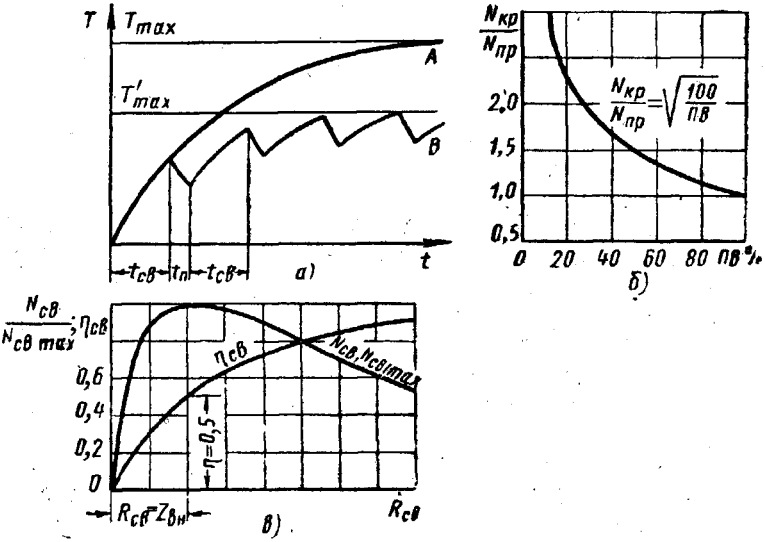
Для осуществления сварки за время $t_{св}$ в сварочной цепи машины должен протекать заданный ток I_2. Если сопротивление (в основном активное) свариваемых деталей равно $R_с$, то активная полезная мощность (в ваттах), развиваемая на участке цепи между электродами, равна

$$N_{св} = I_2^2 R_{св}. \qquad (59)$$

При этом полная кажущаяся мощность N, забираемая машиной из сети, значительно больше, чем $N_{св}$, в связи с потерями в сварочном контуре и трансформаторе. Мощность машины N (в киловольтамперах), необходимая для выполнения заданной сварочной операции, должна быть равна

$$N = I_2^2 \frac{\sqrt{(R_{св} + R_{вн})^2 + X_{L.вн}^2}}{1000\eta_{тр}} = \frac{I_2^2 Z}{1000\eta_{тр}}, \qquad (60)$$

где $R_{вн}$ — активное сопротивление сварочного контура машины;
$X_{L.вн}$ — его реактивное сопротивление;
$\eta_{тр}$ — к. п. д. трансформатора (обычно более 0,95);
Z — полное сопротивление контура и свариваемых деталей.



Фиг. 119. Нагрев при непрерывном и прерывистом включении тока (*а*), зависимость допустимого по условиям нагрева отношения кратковременной и продолжительной мощностей от $ПВ$ (*б*), зависимость от сопротивления свариваемых деталей полезной мощности при сварке и к. п. д. (*в*).

Мощность, необходимая для сварки заданных деталей, непостоянна и зависит от конструкции машины: чем больше ее внутреннее сопротивление $Z_{вн} = \sqrt{R_{вн}^2 + X_{L.вн}^2}$, тем больше N. Требуемая мощность развивается машиной, если электродвижущая сила вторичной обмотки ее трансформатора E_2 не ниже

$$E_2 = I_2 Z. \qquad (61)$$

Однако для нормальной работы машины недостаточно, чтобы в ее сварочной цепи протекал заданный ток I_2. Необходимо, чтобы при этом трансформатор и элементы контура не перегревались. Нагрев зависит от режима работы машины, определяемого продолжительностью ее включения $ПВ$ (в %):

$$ПВ = \frac{t_{св}}{t} 100\%, \qquad (62)$$

где $t_{св}$ — продолжительность включения тока в течение одной сварочной операции;

t — полное время этой операции.

Величина $ПВ$ зависит от назначения машины. Обычно она равна: для стыковых машин 8—30%; для точечных 5,5—20%; для роликовых машин 10—50%; для трубосварочных станов 100%.

При непрерывной работе (ПВ=100%) температура в любом нагреваемом элементе плавно нарастает по экспоненциальному закону (кривая A, фиг. 119, *а*) и достигает некоторого установившегося значения T_{max}. При одинаковых условиях работы, но прерывистом включении температура изменяется по кривой B. Ее установившееся значение $T'_{max} < T_{max}$. Если T_{max} нигде не превышает допустимых пределов, зависящих в основном от типа изоляции, то соответствующие этим условиям ток и мощность называются током продолжительной работы (продолжительным током $I_{пр}$) и продолжительной мощностью $N_{пр}$.

Количество тепла, выделяемого в любом элементе машины с сопротивлением R за время $t = t_{св} + t_п$ при непрерывной работе ($ПВ$=100%), равно $I^2_{пр} Rt$. При прерывистом включении за то же время t тепла будет выделено $I^2_{кр} Rt_{св}$, где $I_{кр}$ — ток при повторно-кратковременной работе (кратковременный ток).

Одинаковый нагрев при непрерывной и повторно-кратковременной работе будет получен при

$$I^2_{кр} Rt_{св} = I^2_{пр} Rt, \qquad (63)$$

откуда

$$I_{кр} = I_{пр} \sqrt{\frac{t}{t_{св}}} = I_{пр} \sqrt{\frac{100}{ПВ}} \text{ и } I_{пр} = I_{кр} \sqrt{\frac{ПВ}{100}}, \qquad (64)$$

по аналогии

$$N_{кр} = N_{пр} \sqrt{\frac{100}{ПВ}} \text{ и } N_{пр} = N_{кр} \sqrt{\frac{ПВ}{100}}. \qquad (65)$$

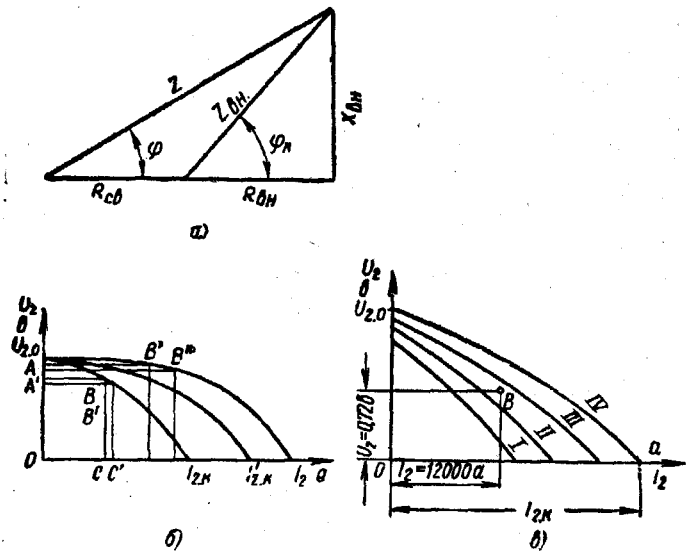
Чем меньше $ПВ$, тем больше $I_{кр}$ и $N_{кр}$, не вызывающие перегрева машины (фиг. 119, *б*) при заданных $I_{пр}$ и $N_{пр}$.

Кратковременная мощность, развиваемая машиной при сварке деталей номинального сечения (максимального сечения, указываемого в паспорте машины) и не вызывающая ее перегрева при номинальном режиме работы (при $ПВ_{ном}$, указанном в пас-

порте машины), называется номинальной мощностью $N_{ном}$. Отечественные машины серийного выпуска обычно маркируются по этой мощности; например, МТП-75 — машина точечная, пневматическая номинальной мощностью 75 *ква*. Если заданы $N_{ном}$ и $ПВ_{ном}$, легко определить допустимую кратковременную мощность $N_{кр}$, не вызывающую перегрева при любом другом $ПВ$,

$$N_{кр} = N_{ном}\sqrt{\frac{ПВ_{ном}}{ПВ}}. \qquad (66)$$

Из формулы (66) следует, что при малых $ПВ$ кратковременная мощность $N_{кр}$ может быть сколь угодно велика. Это справед-



Фиг. 120. Треугольник сопротивлений (*а*) и внешние характеристики машин для контактной сварки (*б* и *в*).

ливо только по условиям нагрева. В действительности максимальная мощность машины (забираемая из сети при коротком замыкании) обычно превышает ее номинальную мощность не более, чем на 30—60%. Однако при коротком замыкании, т. е. при $R_{св}=0$, полезная мощность $N_{св}=0$ и $\eta_{св}=\frac{N_{св}}{N}=0$. Легко показать, что $N_{св}$ имеет максимум ($N_{св.max}$) при $R_{св}=Z_{вн}$.

На фиг. 119, *в* показана зависимость $\eta_{св}$ и $\frac{N_{св}}{N_{св.max}}$ от $R_{св}$. Из этой диаграммы следует, что при сварке на машине, внутреннее сопротивление которой $Z_{вн}$ близко к сопротивлению $R_{св}$, ко-

лебания в величине последнего мало влияют на $N_{св}$ — создаются условия для сварки стабильного качества. При точечной и роликовой сварке часто $R_{св} \ll Z_{вн}$, поэтому $\eta_{св} = 0{,}2 \div 0{,}3$, и для стабилизации качества сварных соединений необходимо постоянство $R_{св}$. При стыковой сварке оплавлением $R_{св} \gg Z_{вн}$ и $\eta_{св} > 0{,}9$.

С помощью уравнения (66) можно решить и другую важную задачу: при каком $ПВ$ безопасно эксплуатировать машину, если $N_{кр} > N_{ном}$ (например, при сварке дуралюмина с малым $R_{св}$ на точечной машине, предназначенной для сварки стали). Легко показать, что

$$ПВ = ПВ_{ном} \frac{N_{ном}^2}{N_{кр}^2}. \qquad (67)$$

Полное сопротивление сварочной цепи машины Z можно представить графически (фиг. 120, *а*). При коротком замыкании ($R_{св} = 0$) коэффициент мощности

$$\cos \varphi_к = \frac{R_{вн}}{\sqrt{R_{вн}^2 + X_{L.вн}^2}}. \qquad (68)$$

При сварке

$$\cos \varphi = \frac{R_{вн} + R_{св}}{\sqrt{(R_{вн} + R_{св})^2 + X_{L.вн}^2}}. \qquad (69)$$

Всегда $\cos \varphi > \cos \varphi_к$. С увеличением $R_{св}$ увеличивается $\cos \varphi$. Коэффициент мощности может изменяться в широких пределах: от 0,25—0,3 в точечных машинах с большим вылетом до 0,90—0,95 в трубосварочных станах. Активная мощность, забираемая при сварке из сети,

$$N_{акт} = N \cos \varphi.$$

Зависимость между напряжением на электродах U_2 и сварочным током I_2, т. е. $U_2 = f(I_2)$, называется внешней характеристикой машины. При холостом ходе ($R_{св} = \infty$) $I_2 = 0$ и $U_{2.0} = E_2$ (E_2 — электродвижущая сила вторичной обмотки сварочного трансформатора; обычно $E_2 = 1 \div 24$ *в*). При коротком замыкании $I_2 = I_{2.к}$ и $U_2 = 0$ (фиг. 120, *б*). При заданном $U_{2.0}$ ток короткого замыкания ($I_{2.к}$) будет тем больше, а внешняя характеристика тем положе, чем меньше полное сопротивление $Z_{вн}$ сварочного контура, так как

$$I_{2.к} = \frac{U_{2.0}}{Z_{вн}}. \qquad (70)$$

Внешняя характеристика позволяет судить о некоторых особенностях машины и о ее пригодности для выполнения заданной

сварочной операции. Площадь прямоугольника $OABC$ (фиг. 120, *б*) пропорциональна полезной мощности $N_{св}=I_2U_2=I^2R_{св}$.

Если почему-либо изменяется $R_{св}$, в результате чего изменяется также I_2 и U_2, то значение $N_{св}$ определится площадью $OA'B'C'\neq OABC$.

При крутопадающей характеристике незначительное смещение точки B в B' не вызовет большого изменения площади прямоугольника— при изменении условий сварки полезная мощность мало изменится. При пологой характеристике смещение B'' в B''' вызовет резкое изменение $N_{св}$. Поэтому при точечной и роликовой сварке, когда для получения соединений устойчивого качества желательно, чтобы количество тепла, выделяемого в зоне сварки, мало изменялось, целесообразны машины с крутопадающей характеристикой. Наоборот, при стыковой сварке оплавлением лучше пологая характеристика, при которой уменьшение сопротивления сварочной цепи в момент образования перемычки между оплавляемыми торцами деталей ведет к резкому увеличению тока, что ускоряет ее нагрев и разрушение — оплавление идет устойчивее. Следует отметить, что при наличии в цепи индуктивного сопротивления $X_{L.вн}$ — ток при изменении ее параметров изменяется не мгновенно, но достигает своего установившегося значения, соответствующего значениям U_2 и I_2 по внешней характеристике, тем скорее, чем меньше постоянная времени сварочной цепи

$$\tau=-\frac{R_{св}+R_{вн}}{X_{L.вн}}. \qquad (71)$$

Постоянная времени уменьшается с уменьшением $X_{L.вн}$. Поэтому для быстрого разрушения перемычек важна не только пологая характеристика, но и малое индуктивное сопротивление.

Если известны сопротивление $R_{св}$ и требуемый для сварки ток I_2, то по внешней характеристике машины легко определить ее пригодность для выполнения заданной операции. Например, при $R_{св}=60$ *мком* и $I_2=12\,000$ *а* напряжение $U_2=R_{св}I_2=0{,}72$ *в*. На фиг. 120, *в* этим значениям тока и напряжения соответствуют точка B, и мы видим, что машины с внешними характеристиками *I* и *II* не обладают достаточной мощностью, а машины *III* и *IV* пригодны для сварки.

Основные требования к машинам для контактной сварки (ряды номинальных мощностей, номинальные *ПВ*, допустимые температуры нагрева и т. д.) регламентированы ГОСТом 297-52.

ГЛАВА VIII

ЭЛЕМЕНТЫ СВАРОЧНОГО КОНТУРА МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

§ 1. СХЕМА СВАРОЧНОГО КОНТУРА

Элементы, соединяющие источник питания *1* (трансформатор) с электродами *2*, образуют сварочный контур машины (фиг. 121, *а*), обычно состоящий из:

а) электродов *2*, непосредственно подводящих ток к свариваемым деталям и передающих необходимые усилия для их обжатия; иногда (в роликовых машинах) электроды служат и для перемещения деталей; электроды быстро изнашиваются и являются рабочим инструментом;

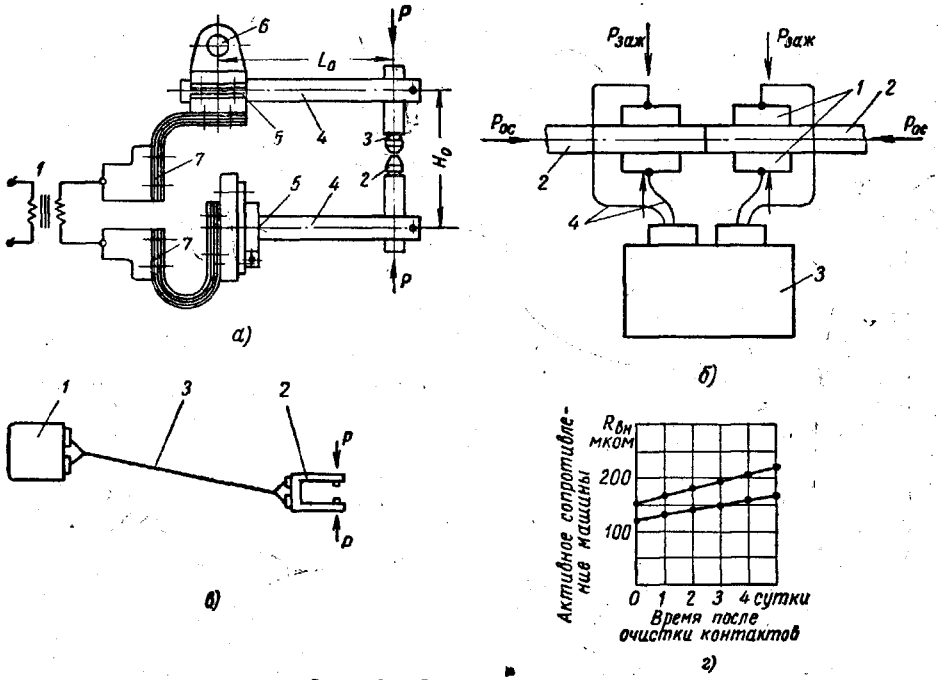
б) электрододержателей *3* для закрепления электродов;

в) хоботов *4* (в точечных и роликовых машинах); плит (в стыковых машинах), соединенных непосредственно или через специальные держатели *5* с механизмами, развивающими необходимые усилия сжатия свариваемых деталей; между электрододержателем, хоботом и другими элементами контура имеются неподвижные или подвижные контакты (при роликовой сварке, когда держатель, жестко связанный с электродом, вращается). Под действием сил P хобот вместе с электрододержателем перемещается для сближения электродов *2* поступательно (в машинах с прямолинейным ходом электродов) или поворачивается вокруг шарнира *6* (в машинах с радиальным ходом);

г) гибких шин *7*, связывающих колодки вторичного витка трансформатора с подвижными элементами контура. В машинах малой мощности вторичный виток трансформатора иногда делается гибким из медной фольги (см. гл. IX) и может непосредственно соединяться с держателями хоботов без промежуточных шин.

Обычно электрододержатели во время сварки перемещаются в одной плоскости — шины изгибаются в этой же плоскости. Иногда, например, в стыковых машинах с двухсторонним подводом тока (фиг. 121, *б*) электрододержатель с электродом *1* перемещается при зажатии свариваемых деталей *2* и при их осадке во взаимоперпендикулярных направлениях под действием сил $P_{заж}$ и $P_{ос}$.

В переносных машинах сварочный трансформатор *1* часто отделяется от легкой сварочной головки *2* (фиг. 121, *в*). В этом случае шины объединяются в специальном бифилярном кабеле *3*, обладающем большой гибкостью и малым индуктивным сопротивлением. Это очень существенно при большой его длине (до 3—5 *м*), необходимой для обслуживания машиной достаточного рабочего участка.



Фиг. 121. Сварочный контур:

а — точечной машины; *б* — стыковой машины с двухсторонним подводом тока; *в* — переносной машины с отдельно расположенным трансформатором; *г* — изменение сопротивления контура двух машин в эксплуатации.

Неподвижные контакты бывают постоянными, разбираемыми только при ремонте или переналадке машины, и переменными, разбираемыми при смене или регулировании электродов.

Таким образом, сварочный контур в электрическом отношении представляет собой систему жестких и гибких элементов, последовательно (а иногда и параллельно) соединенных неподвижными (постоянными или разбираемыми) и подвижными контактами. В механическом отношении сварочный контур является силовым узлом, иногда передающим очень значительные усилия.

Размеры контура (полезный вылет L_0 и раствор H_0, см. фиг. 121, *а*) ограничивают габариты изделий, которые могут быть сварены с их введением в контур машины. Так как с увели-

чением L_0 и H_0 быстро растет внутреннее сопротивление машины и падает ее к. п. д. и $\cos\varphi$, в универсальных машинах обычно вылет не превышает 800 *мм*, а раствор — 200—300 *мм*. Однако в некоторых специальных машинах полезный вылет достигает 3000 *мм*.

Все элементы сварочного контура, как правило, изготовляются из медных сплавов с достаточно высокой электропроводностью и прочностью. Их сечение и взаимное расположение должны быть такими, чтобы при протекании заданного тока и номинальном $ПВ_{ном}$ не было чрезмерных потерь на внутреннем сопротивлении контура и перегрева его элементов, а также обеспечивалась приемлемая внешняя характеристика машины.

Значительную часть активного сопротивления контура составляет сопротивление его контактов. В эксплуатации ослабление их затяжки и окисление могут резко изменять сопротивление машины (фиг. 121, *г*). Поэтому контакты периодически разбираются и очищаются (при интенсивной работе — ежемесячно) и систематически подтягиваются.

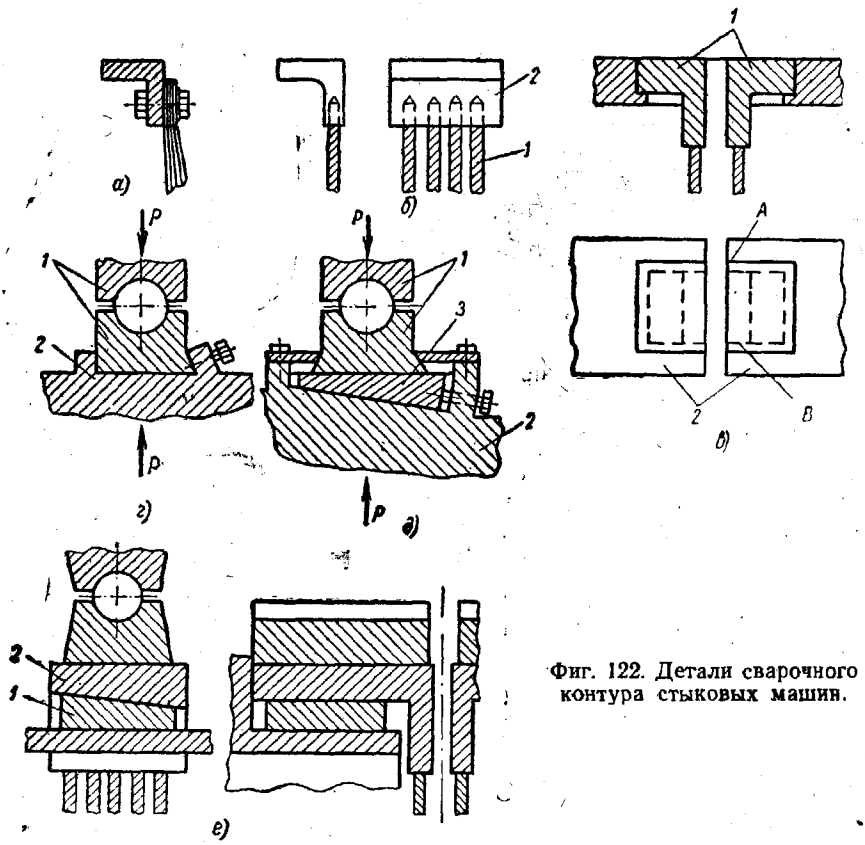
Силовые элементы контура должны обладать достаточной прочностью и жесткостью, а электроды и подвижные контакты — также износостойкостью; электрододержатели и хоботы должны допускать быструю смену и удобную регулировку электродов. Очень важна маневренность элементов контура, расширяющая возможность использования машины для сварки узлов сложной формы. Она наибольшая (фиг. 121, *а*), если хоботы *4* можно выдвигать (изменяется вылет L_0), раздвигать (изменяется H_0), взаимно смещать в горизонтальной плоскости и, наконец, поворачивать вокруг своей продольной оси.

§ 2. СВАРОЧНЫЙ КОНТУР И ЭЛЕКТРОДЫ СТЫКОВЫХ МАШИН

Для обеспечения пологой внешней характеристики и малой постоянной времени (см. гл. VII, § 2) сопротивление контура стыковых машин для сварки оплавлением должно быть минимальным. Поэтому трансформатор *3* (фиг. 121, *б*) располагают как можно ближе к электродам, а в сварочной цепи делают минимум контактов. Расстояние между шинами *4* и их выгиб, необходимый для свободного перемещения электродов при зажатии деталей и осадке, должны быть минимальными. Простейший контур стыковых машин состоит из гибких шин, контактных колодок и электродов. При одностороннем токоподводе шины соединяются с контактными колодками, не перемещающимися при зажатии свариваемых деталей. Такие шины изгибаются при сварке в одной плоскости и делаются из медной фольги толщиной 0,2—0,5 *мм*. Зачищенные и пропаянные концы шин крепятся болтами к контактным колодкам и к трансформатору (фиг. 122, *а*). При двухстороннем токоподводе (см.

фиг. 121, *б*) шины изгибаются в двух плоскостях и выполняются из голых гибких проводов *1* с концами, запаиваемыми в отверстия контактных колодок *2* (фиг. 122, *б*).

Колодки *1* закрепляют в вырезах стальных плит *2* подвижного и неподвижного (фиг. 122, *в*) зажимов машины. Эти вырезы де-

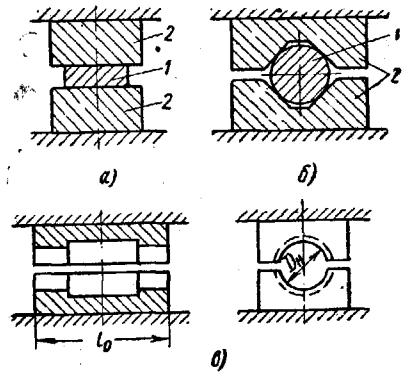


Фиг. 122. Детали сварочного контура стыковых машин.

лаются открытыми во избежание образования замкнутого магнитного контура вокруг проводника, что ведет к большим потерям энергии и нагреву плит. Если по условиям жесткости открытый вырез нежелателен, то можно связать углы плиты *A* и *B* приваренным ребром из немагнитной стали. Электроды *1* устанавливаются и закрепляются непосредственно на контактных колодках *2* без вертикальной регулировки (фиг. 122, *г*) или на регулировочном клине *3* (фиг. 122, *д*). Электрод упирается в выступ колодки или плиты для уменьшения опасности проскальзывания при осадке. При каждой сварке контакт между электродом *1* и колодкой *2* (а при наличии клина — два контакта) попеременно

сжимается силой $P_з$ и почти освобождаются от нагрузки. Из-за упругих деформаций при снятии силы $P_з$ в контакте образуется зазор, способствующий окислению контакта. Перемещение клина нарушает приработавшийся контакт и также ведет к росту его сопротивления. Для уменьшения последнего иногда размещают регулировочный клин *1* под колодкой *2* (фиг. 122, *е*). При этом ток через клин не течет и его делают стальным. Можно полностью устранить «дышащий» контакт, освободив сопряжение электрода с колодками от передачи усилий зажатия.

Конструкция и материал электродов стыковых машин определяются тем, что они: а) подводят ток к свариваемым деталям; б) передают значительные усилия зажатия и осадки (при отсутствии в машине упоров); центрируют свариваемые детали.



Фиг. 123. Электроды для стыковой сварки.

При сварке брусков и полос *1* электроды *2* имеют плоскую рабочую поверхность (фиг. 123, *а*). Полосы сваривают с односторонним токоподводом и верхние не токоведущие электроды иногда делают стальными. При сварке тонкой полосы очень важно обеспечить одинаковые условия нагрева и осадки по всей ее ширине, для чего подвод тока должен осуществляться строго на заданном расстоянии от плоскости стыка. Для этого иногда верхний электрод делается со скосом (см. фиг. 63, *д*), а при сварке очень тонких полос ($\delta < 1$ *мм*) могут применяться криволинейные электроды (см. фиг. 63, *в*). Круглые детали *1* иногда свариваются в призматических электродах *2* (фиг. 123, *б*), облегчающих взаимную центровку деталей и не требующих замены при изменении диаметра деталей. Трубы чаще сваривают в электродах с цилиндрической поверхностью, обеспечивающих более равномерный подвод тока без смятия трубы в зажимах.

В эксплуатации электроды сминаются и нарушается их профиль. Это затрудняет центрирование деталей и ухудшает качество сварки. Стойкость электродов обеспечивается выбором их размеров и материала. Площадь контакта электрод — деталь определяется по удельному давлению зажатия $p_з$ ($p_з \leqslant 2$ *кГ/мм*^{2} для медных электродов, не более 4—5 *кГ/мм*^{2} для электродов из сплавов твердостью *НВ* 120—160 *кГ/мм*^{2}). Плотность тока при этом не превышает допустимой. При сварке без упоров длина электрода l_0 (фиг. 123, *в*) должна обеспечивать соосность свариваемых деталей. Обычно она составляет $(3 \div 4)\ D_н$ ($D_н$ — диаметр трубы или стержня). При боль-

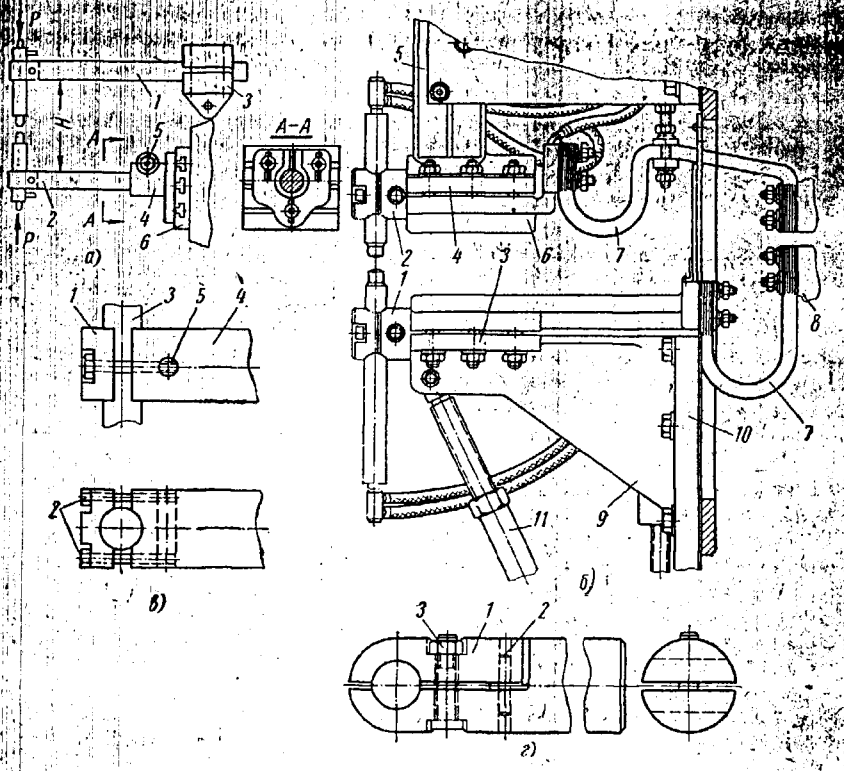
шой длине в электроде делают выточку, фиксирующую место ... вода тока.

Плотность тока в контакте электрод — деталь при стыко... сварке относительно невелика (например, по сравнению с точеч... сваркой), поэтому электроды для стыковых машин могут изго... ляться из медных сплавов повышенной твердости (120—160 *кГ/*... с электропроводностью около 40—50% проводимости меди (см. ... Применение более твердых сплавов часто нецелесообразно. С ... личением твердости сплава, как правило, уменьшается коэффиц... его трения по стали и растут необходимые усилия зажатия для ... дупреждения проскальзывания свариваемых деталей при осадке. Электроды нужной формы получают отливкой в кокиль, штамповкой или механической обработкой. Плоскость сопряжения с электродной колодкой во всех случаях механически обрабатывают и шабрят.

§ 3. СВАРОЧНЫЙ КОНТУР И ЭЛЕКТРОДЫ ТОЧЕЧНЫХ МАШИН

Конструкция и условия работы контура точечной машины зависят от характера перемещения верхнего электрода. В машинах с радиальным ходом (фиг. 124, *а*) длинные хоботы *1* и *2* изгибаются силами *P*. Универсальные точечные машины имеют круглые хоботы, зажимаемые в хоботодержателях *3* и *4*, в которых хобот можно выдвигать и поворачивать вокруг своей оси. Нижний хобот может крепиться болтом *5* в разрезной втулке хоботодержателя *4*, который перемещается в двух направлениях относительно плиты *6*, закрепленной через изоляцию на станине и соединяемой шинами с трансформатором. Иногда кронштейн нижнего хоботодержателя перемещают по цилиндрической направляющей для плавного регулирования раствора H_0. В машинах с вертикальным ходом хоботы *1* и *2* обычно короче; изгибающий их момент меньше, жесткость больше (фиг. 124, *б*). Они закреплены в держателях *3* и *4*. Верхний держателях *4* жестко связан с ползуном *5* механизма сжатия, а его контактная колодка *6* соединяется шинами *7* с трансформатором *8*. Кронштейн *9*, воспринимающий усилие сжатия электродов, крепится к станине через изоляцию *10*. Иногда для разгрузки кронштейна ставят подкос *11* регулируемой длины. Кронштейн крепится болтами и при необходимости перемещается вверх или вниз на шаг болтов. Ступенчатое регулирование раствора не вызывает неудобств. В хоботах закрепляются электрододержатели (свечи). Для удобного регулирования положения и замены свечи обычно удерживаются трением, развиваемым при затяжке болтов. Стальная колодка *1* двумя стальными болтами *2* прижимает свечу *3* к гнезду хобота *4* в любом положении (фиг. 124, *в*). Болты ввертываются в палец *5* из немагнитной стали с тем, чтобы исключить образование вокруг проводника замкнутого магнитопровода, а при повреждении резьбы не портить дорогой хобот.

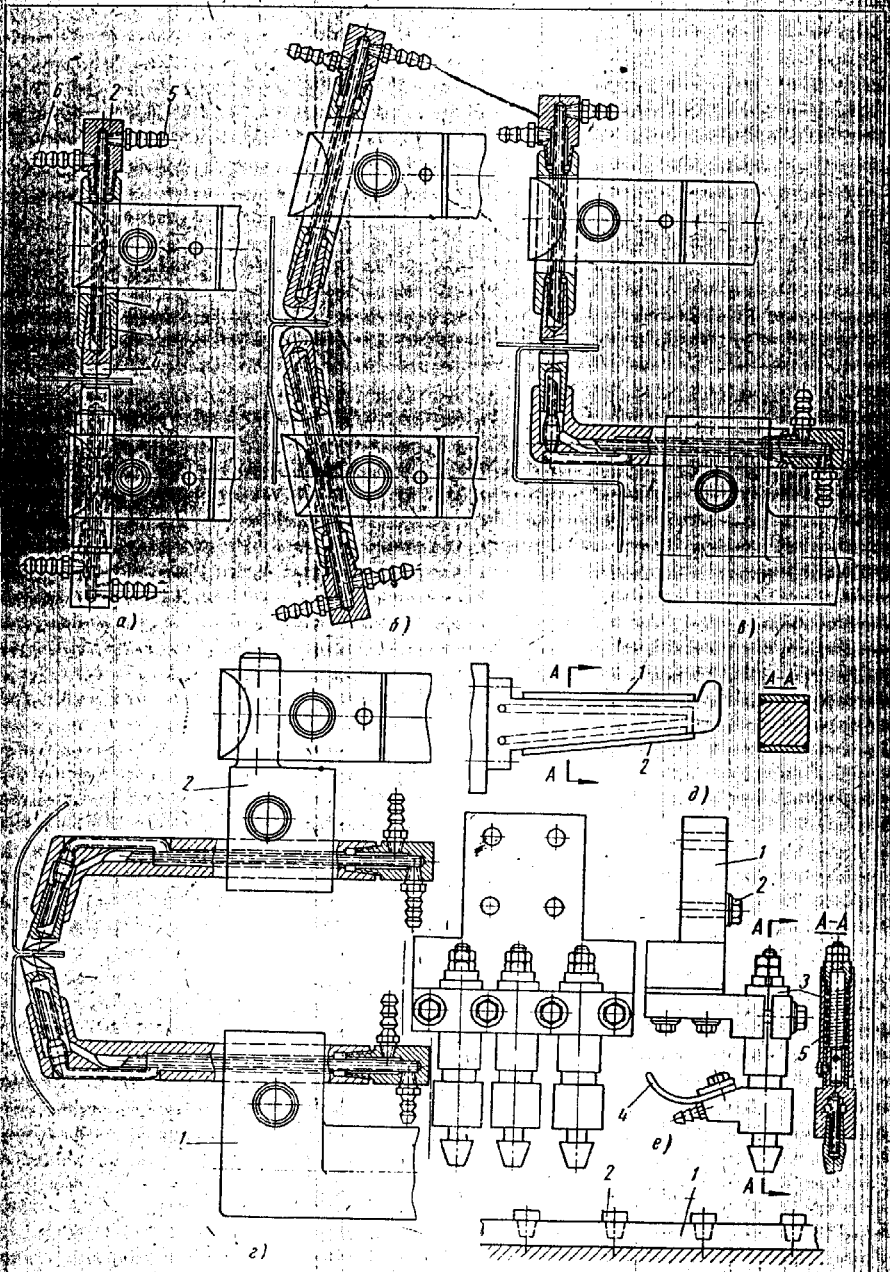
Крепление свечи боковой колодкой 1 (фиг. 124, а) из медного сплава, фиксируемой стальным штифтом 2 и притягиваемой болтом 3, менее надежно, так как при этом только часть усилия затяжки одного болта создает трение, удерживающее свечу. При сварке в труднодоступных местах иногда применяют специальные



Фиг. 124. Детали сварочного контура точечных машин.

хоботы, свечи и электроды (фиг. 125), в сопряжении которых передается помимо вертикальной силы изгибающий момент. При креплении свечи боковой колодкой этот момент воспринимается гнездом хобота в то время, как при торцовой колодке он передается полностью через болты, расстраивая контакт свечи с хоботом. Длинные хоботы имеют водяное охлаждение; короткие обычно охлаждаются за счет отвода тепла интенсивно охлаждаемыми свечами и колодками хоботодержателя.

Электрод крепится в свече на конусе, реже — на резьбе. Конусное крепление требует большей точности изготовления электродов и посадочных гнезд в свечах с тем, чтобы обеспечить хороший кон-



Фиг. 125. Нормальная и специальная оснастка точечных машин.

такт и предупредить утечку охлаждающей воды. Однако смена электродов на конусе удобнее, в особенности при несимметричной их форме (см. фиг. 128, *г*), когда правильная установка электрода с резьбой требует вращения всей свечи. Свеча с конусным креплением электрода показана на фиг. 125, *а*. В свечу *1* ввернута стальная ниппельная головка *2* с ниппелями *5* и *6* для присоединения шлангов водяного охлаждения. Вода по латунной трубке *3* подается к электроду *4*. Конец трубки косо срезан с тем, чтобы при неправильной сборке трубка не могла упереться в дно канала по всему периметру и прекратить циркуляцию воды. Обычно трубка не доходит до дна канала на 5—6 *мм*. При большем расстоянии резко ухудшается охлаждение электрода из-за возможности образования паровой рубашки. На фиг. 125, *б* — *е* показано несколько примеров специальной оснастки точечных машин.

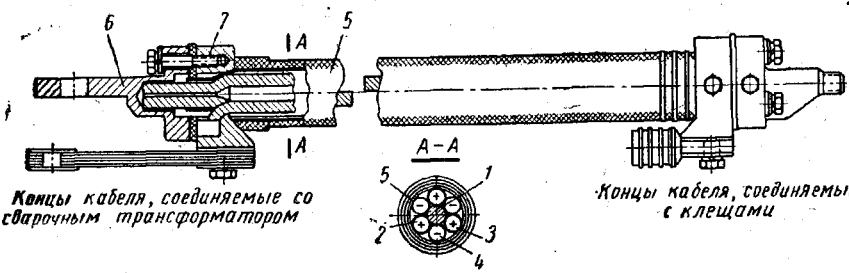
При сварке вблизи вертикальных стенок (фиг. 125, *б*) могут применяться нормальные свечи и электроды в сочетании с хоботами, имеющими наклонные отверстия. Применяются также специальные хоботы (фиг. 125, *в*, *г*). Вместо специального хобота *1* можно использовать промежуточный держатель *2* (фиг. 125, *г*). При сварке в трудно доступных местах иногда применяют армированные хоботы-электроды малого сечения (фиг. 125, *д*). Их прочность и жесткость достигается напайкой пластин *1* и *2* из нержавеющей стали.

В некоторых случаях для лучшего использования мощности машин они могут быть приспособлены для одновременной сварки двух-трех точек на деталях малой толщины (1—1,5 *мм*). При этом применяют электрододержатели, обеспечивающие равномерное распределение сжимающего усилия и тока между всеми точками, что необходимо для получения одинакового их провара. В одном из таких держателей (фиг. 125, *е*) корпус *1* крепится болтами *2* к подвижной головке машины с вертикальным ходом. В корпусе зажаты три свечи *3* с индивидуальным токоподводом гибкими шинами *4* и пружинами *5*, обеспечивающими равномерное распределение усилия между всеми электродами. Нижние электроды крепятся жестко.

В машинах для односторонней сварки контур иногда имеет дополнительный элемент — подкладную медную шину. Ее форма соответствует форме укладываемого на нее изделия. Контактную поверхность шины *1* делают гладкой или в местах сварки в ней крепят электроды *2* (фиг. 125, *ж*). Недостаток гладкой шины — постепенное образование в местах сварки трудно устранимых поверхностных вмятин.

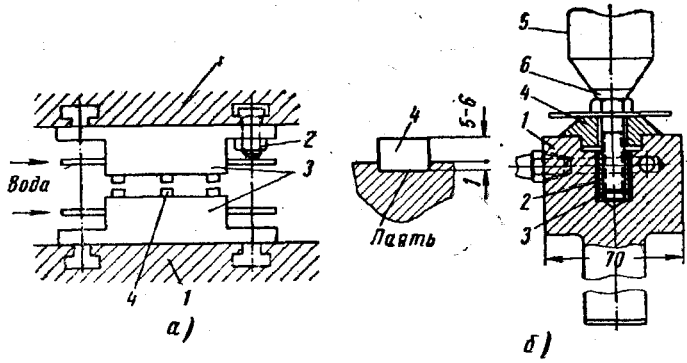
В подвесных машинах (см. фиг. 121, *в*) в сварочный контур включается бифилярный гибкий кабель. В этом кабеле вокруг резинового стержня *1* (фиг. 126) располагаются три медные жилы *2* одного провода, помещенные в резиновую трубку *3*, и три жилы *4* обратного провода. Все провода пропущены через охлаждаемый водой резиновый шланг *5*. Концы медных жил припаиваются к медным наконечникам *6* и *7*. Благодаря переплетению прямого и обратного

проводов реактивное сопротивление кабеля очень мало. Однако его активное сопротивление велико из-за большой длины и малого сечения, необходимого для уменьшения веса и увеличения гибкости кабеля. Поэтому при сварке падение напряжения в кабеле иногда достигает 10—12 *в*. В кабеле теряется значительная мощность и требуется его интенсивное охлаждение.



Фиг. 126. Бифилярный кабель с внутренним водяным охлаждением.

В сварочном контуре машин для рельефной сварки хоботы и свечи точечных машин заменяются контактными плитами *1* с пазами, в которых болтами *2* закрепляются приспособления — электроды *3* с впаянными вставками *4* (фиг. 127, *а*). Иногда рельефная сварка



Фиг. 127. Оснастка для рельефной сварки:
а — на прессе; *б* — на точечной машине.

производится на обычных точечных машинах с вертикальным ходом. Например, для приварки болта к листу (фиг. 127, *б*) в охлаждаемую водой свечу *1* вставляют миканитовую изоляционную втулку *2* и стальную направляющую втулку *3*. В нижнюю свечу вставлен электрод *4*, а в верхнюю — электрод *5* с припаянным наконечником *6* из медного сплава высокой твердости (см. § 6).

Как отмечалось выше, электрод является рабочим инструментом при контактной сварке. От его качества и состояния во многом за-

висят результаты сварки. При точечной сварке электрод сильно нагревается и деформируется с увеличением контактной поверхности. Эта поверхность при нагреве окисляется, что повышает сопротивление между электродом и свариваемыми деталями. Перегрев электродов и загрязнение их поверхности может вызывать местное сваривание электрода с деталью, ведущее к прилипанию частиц свариваемого металла к электроду (и наоборот). Поэтому необходима периодическая зачистка, запиливание или обработка электрода режущим инструментом, при которых часть металла электрода удаляется — электрод срабатывается. Стоимость электродов влияет на общие затраты при сварке, а время, расходуемое на уход за ними и их смену, может заметно сказаться на производительности труда сварщика. Поэтому повышение стойкости электродов имеет большое значение.

Стойкость электродов зависит от их материала и конструкции, а также от интенсивности охлаждения и режима сварки. Требования к материалу различны для электродов точечных (и роликовых) машин, эксплуатируемых при большой плотности тока на контактной поверхности, и электродов для рельефной (и стыковой) сварки, работающих при меньшей плотности тока.

Материал электродов первой группы должен обладать:

а) высокой электро- и теплопроводностью для уменьшения нагрева электродов при работе;

б) большой твердостью, сохраняющейся при высокой температуре (высокой температурой рекристаллизации) для уменьшения деформации электродов;

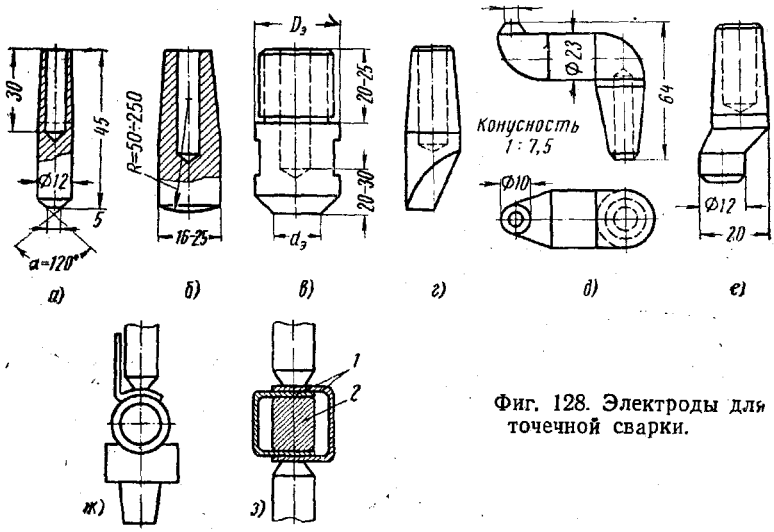
в) малой склонностью к образованию сплавов с металлом свариваемых деталей.

Электроды первой группы обычно имеют электропроводность не ниже 70% проводимости меди при твердости *HB* 100—160 *кГ/мм*^{2} и температуре рекристаллизации 250—500° С. Чем выше электропроводность и твердость свариваемого материала, тем выше должны быть эти показатели у электродов. При сварке аустенитных сталей и жаропрочных сплавов целесообразны наиболее твердые сплавы с проводимостью не ниже 70—75%. Малоуглеродистую сталь хорошо сваривать электродами с твердостью *HB* 120—140 *кГ/мм*^{2} при проводимости около 80%, а для сварки легких сплавов применимы только электроды с проводимостью не ниже 85—90%; при этом допустима твердость $HB \geqslant 100$ *кГ/мм*^{2}.

Электроды второй группы нагреваются меньше, но требуется значительная их точность (например, износ электродов при рельефной сварке нарушает равномерное распределение усилия и тока между рельефами и вызывает непровар). Поэтому электроды второй группы должны обладать высокой твердостью (*HB* 140—220 *кГ/мм*^{2}), а их электропроводность можно понизить до 45—55%.

Нормальные электроды для точечной сварки сажают на конус (фиг. 128, *а* и *б*). При усилии сжатия $P \ll 1000$ *кГ* конусность со-

ставляет 1 : 10; при больших P во избежание быстрой раздачи конуса в свече — 1 : 5. Изредка электроды крепятся на резьбе (фиг. 128, *в*). Для удобной смены на электроде делают лыски под ключ. Рабочая часть электрода имеет цилиндрическую или коническую форму с плоской или сферической контактной поверхностью. Электроды с конусным креплением можно получить холодной высадкой



Фиг. 128. Электроды для точечной сварки.

на прессе с одновременным образованием канала для охлаждения. Высадка — дешевый способ изготовления электродов с минимальными потерями металла в стружку.

Диаметр контактной поверхности электрода $d_э$ определяется толщиной свариваемых деталей (см. стр. 129). Угол конуса рабочей части $\alpha = 30 \div 150°$ (обычно 120°). Чем больше α, тем меньше нагревается и труднее деформируется электрод и тем выше его стойкость. Чрезмерное увеличение α затрудняет запиливание электрода.

Электроды со сферической контактной поверхностью (радиусом $R = 50 \div 250$ *мм*) применяют при сварке легких сплавов. При этом уменьшается глубина вмятин и улучшается начальный контакт. Такие электроды применяются и для сварки стали толщиной более 5—6 *мм*, так как при сферической поверхности на качество сварки меньше влияют перекосы толстых деталей.

Стойкость электродов очень сильно зависит от условий их охлаждения, которые определяются массой электрода и размерами каналов для воды. С увеличением мощности машины, как правило, увеличиваются размеры электродов. Диаметр цилиндрической части электродов $D_э$ при номинальной мощности $N_{ном} \leqslant 50$ *ква* обычно

равен 12—16 *мм*; при $N_{ном} = 50 \div 75$ *ква* он увеличивается до 20—35 *мм*, а в более мощных машинах иногда достигает 45—50 *мм*. Расстояние от дна канала до рабочей поверхности нового электрода не превышает 15—25 *мм*. С его увеличением растет припуск на износ электрода, но ухудшается охлаждение, и электрод приходится очень часто запиливать.

При сварке в труднодоступных местах, помимо нормальных электродов, применяются специальные электроды, например, при сварке деталей с узкой отбортовкой прямые и изогнутые электроды со смещенной рабочей частью (фиг. 128, *г* — *е*). Их стойкость понижается из-за худшего охлаждения, связанного с меньшей массой рабочей части электрода и увеличенным расстоянием до дна канала. При сварке тонких деталей лучше применять изогнутые электрододержатели с нормальными хорошо охлаждаемыми электродами (см. фиг. 125, *г*.).

Иногда форма электрода определяется формой свариваемого изделия. Например, при сварке прутков и труб в электродах может быть сделана выемка (фиг. 128, *ж*).

При сварке небольших деталей *1* замкнутого сечения применяется промежуточный электрод-оправка *2* (фиг. 128, *з*), предупреждающий деформации изделия.

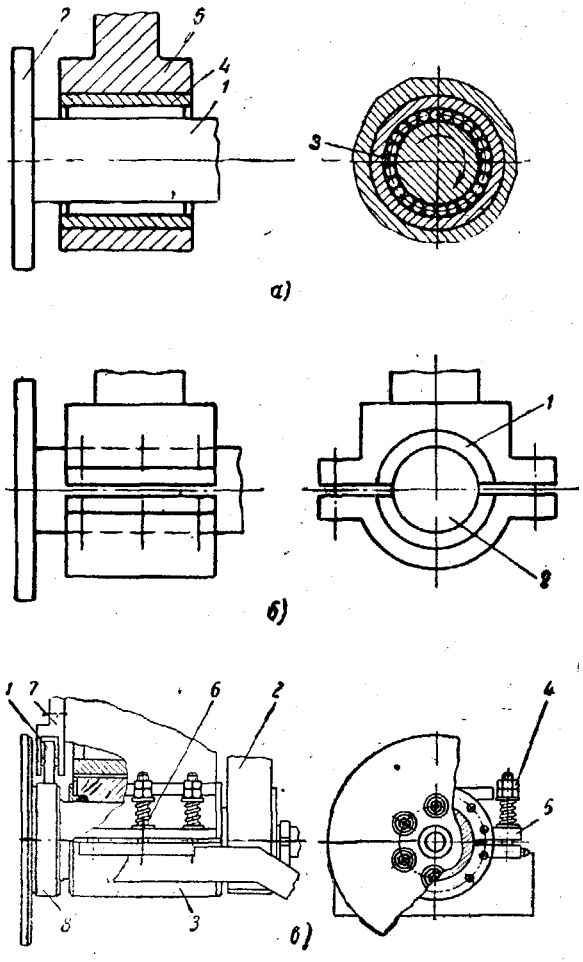
Эксплуатация электродов сводится к поддержанию требуемой формы их рабочей части и чистоты контактной поверхности. Для этого сварщик периодически очищает контактную поверхность наждачной бумагой или обрабатывает его специальным инструментом — заправником без снятия с машины. Сильно деформированные электроды перетачиваются на станке.

Периодичность очистки зависит от электродного сплава и главным образом от свариваемого материала. При сварке стали без окалины электроды зачищаются после каждых 300—1000 точек. При сварке алюминиевых сплавов зачистка требуется через 30—50 точек, так как при окисленной поверхности электрода частицы меди сплавляются с алюминием и понижают его коррозионную стойкость.

§ 4. СВАРОЧНЫЙ КОНТУР И ЭЛЕКТРОДЫ РОЛИКОВЫХ МАШИН

Особенность контура роликовых машин — наличие подвижных контактов. Эти контакты выполняются в виде подшипника качения (фиг. 129, *а*) или скольжения (фиг. 129, *б*). В первом случае охлаждаемый электрододержатель *1* с электродом *2* вращается в игольчатом подшипнике, собранном из роликов *3*, изготовленных из твердой бронзы с высокой электропроводностью, и втулки *4*, запрессованной в корпус *5*, соединенный шиной с трансформатором. Подшипник смазывается электропроводной смесью графита и касторового масла. Скользящий контакт (фиг. 129, *б*) конструктивно проще. Для того, чтобы при нагреве не было заедания, вкладыши *1* соби-

раются на валу *2* с некоторым зазором. Из-за этого зазора, а также в результате действия усилия *P* возможен перекос электродов. В новейших машинах усилие сжатия воспринимается обычными шари-

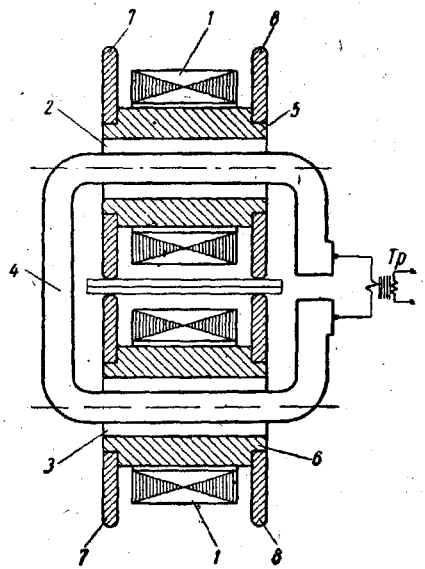


Фиг. 129. Детали сварочного контура роликовых машин.

коподшипниками *1* и *2* (фиг. 129, *в*), а ток подводится скользящей колодкой *3*, стянутой болтами *4* с парной колодкой *5*. Давление в скользящем контакте регулируется натягом пружин *6* и не зависит от усилия, приложенного к электродам. Подшипники *1* укреплены в обойме *7* и катятся по сидящему на валу немагнитному кольцу *8*. Задний подшипник 2 находится на участке вала, не обтекаемом то-

ком, и имеет обычную конструкцию. Охлаждающая вода подводится к валу через сальник.

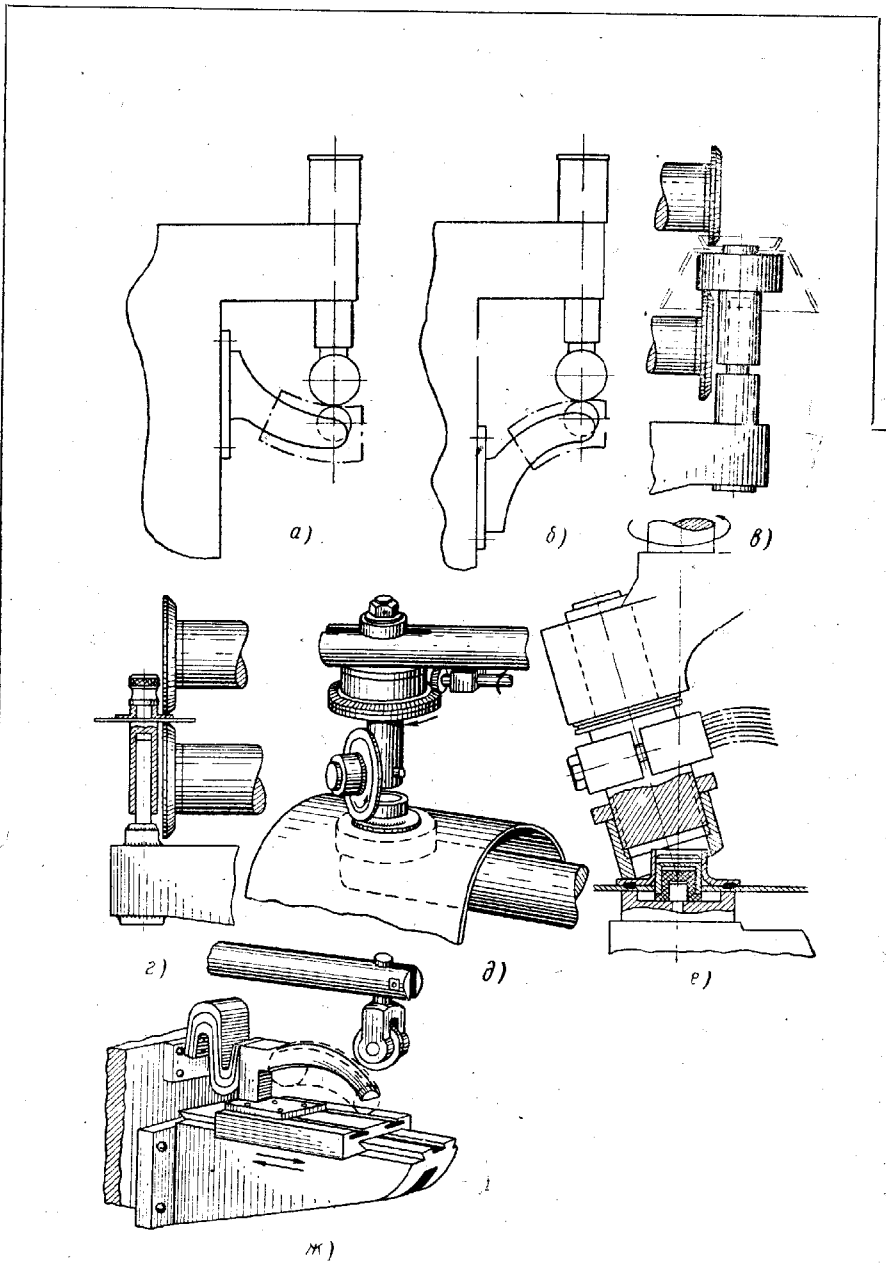
Оригинальная роликовая машина с заменой подвижного электрического контакта магнитной связью разработана Институтом электросварки им. Е. О. Патона для двухсторонней рельефно-роликовой сварки стальной ленты двумя швами. Трансформатор этой машины имеет два неподвижных кольцевых сердечника *1* (фиг. 130). Вращающиеся валы *5* и *6* с укрепленными на них дисковыми электродами *7* и *8* образуют вторичные витки трансформатора, а его неподвижный первичный виток *4* пропущен через отверстия *2* и *3*. Коэффициент трансформации сварочного трансформатора $n = 1$. Его первичный виток *4* присоединен к неподвижному трансформатору *Тр*, служащему для понижения напряжения сети и регулирования мощности.



Фиг. 130. Вращающийся трансформатор без подвижных электрических контактов.

Подавляющее большинство роликовых машин имеет два дисковых электрода для сварки продольных или поперечных швов (см. фиг. 106, *а* и *б*). При этом, как правило, один электрод приводной, а второй вращается силами трения, развиваемыми в его контакте с движущимся свариваемым изделием. Это упрощает кинематическую схему машины и обеспечивает необходимое равенство окружных скоростей обоих электродов при неодинаковых их диаметрах. В машинах для поперечных швов (см. фиг. 106, *б*) приводным делается небольшой нижний электрод, а большой верхний электрод легко вращается силами трения. В машинах для продольных швов приводным делают верхний электрод, несмотря на его больший диаметр. При этом нижняя электродная головка имеет минимальные размеры, допускающие сварку швов на обечайках малого диаметра. Такой привод допустим потому, что при сварке продольного шва вероятность проскальзывания неприводного электрода значительно меньше, чем при сварке криволинейных поперечных швов. Существуют машины, в которых оба электрода имеют принудительное вращение стальными шарошками (см. фиг. 202, *б*).

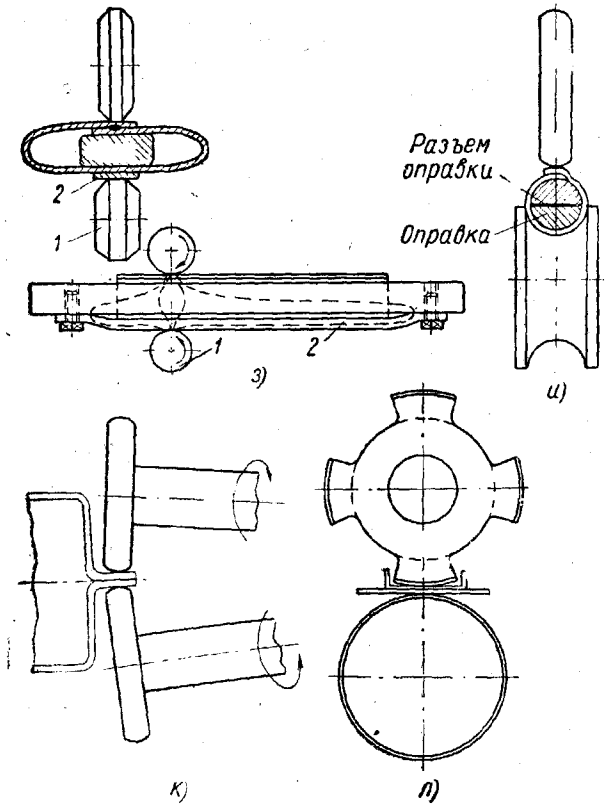
Машины общего назначения можно использовать для сварки изделий сложной формы, фланцев и др. при установке специальных



Фиг. 131. Специальная оснастка

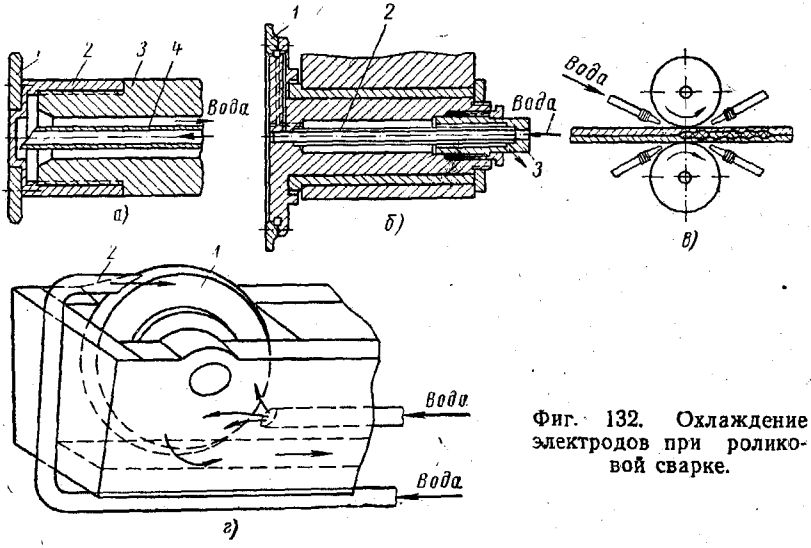
хоботов и приспособлений. Например, сварка колена возможна на изогнутых нижних хоботах (фиг. 131, *а* и *б*); сварка фланцев — во вращающихся приспособлениях, увлекаемых электродами машины. В зависимости от формы изделия ток протекает или не протекает через приспособление (фиг. 131, *в* и *г*). Для приварки фланцев к невращающимся изделиям иногда используются специальные головки с дисковым (фиг. 131, *д*) или цилиндрическим электродом (фиг. 131, *е*).

При сварке небольших полых изделий удобны одноролико вые машины с оправкой (фиг. 131, *ж*), на которую изделие надевается. Однако возможна их сварка и на обычных машинах со сплошным или разъемным электродом — оправкой (фиг. 131, *з* и *и*). Чтобы избежать на изделии следа от нижнего электрода *1*, можно применить медную планку *2*.



для роликовой сварки.

Как правило, при роликовой сварке применяют массивные ди ковые электроды из достаточно твердого и электропроводного мат риала с конической или сферической рабочей поверхностью (с фиг. 111, *а* и *б*). При сварке вблизи ребер применяют электрод с од носторонним конусом (см. фиг. 111, *в*). Иногда используются н клонные электроды (например, в машинах МШПБ-150 при свар бензобаков, фиг. 131, *к*). Короткие швы могут свариваться секто



Фиг. 132. Охлаждение электродов при роликовой сварке.

ными электродами (фиг. 131, *л*). Качество швов и стойкость электродов сильно зависят от интенсивности охлаждения электродов. Возможно их внутреннее охлаждение. Электрод *1* с оправкой *2* навинчивается на конец хобота *3*, в который по трубке *4* подается вода (фиг. 132, *а*). Кольцевой электрод *1* непосредственно омывается водой, поступающей по радиальным каналам через трубку *2* и сальник *3* (фиг. 132, *б*). Однако наиболее эффективно наружное охлаждение водой, поступающей по трубкам непосредственно в зону сварки (фиг. 132, *в*). Даже при погружении низа электрода *1* в воду (фиг. 132, *г*) желательно дополнительное его охлаждение в зоне сварки водой из трубки *2*. При наружном охлаждении во избежание коррозии стали вода иногда заменяется специальной эмульсией.

§ 5. РАСЧЕТ СВАРОЧНОГО КОНТУРА

Расчет контура состоит из двух частей: определения необходимого сечения элементов контура и контактов между ними и определения его активного и индуктивного сопротивлений.

Исходными в расчете принимаются номинальная мощность $N_{ном}$ и $ПВ_{ном}$, а также напряжение холостого хода трансформатора $U_{2.0}$

(на номинальной ступени включения, см. гл. IX, § 3). Кроме того, задаются конструктивная схема контура (см. фиг. 121, *а*) и действующие в нем усилия. Сечение F_2 элементов контура и площадь контактов рассчитывают по допустимой продолжительной плотности тока $j_{2.пр}$ по формуле

$$F_2 = \frac{I_{2.пр}}{j_{2.пр}} = \frac{1}{j_{2.пр}} \cdot \frac{N_{ном}}{U_{2.0}} \sqrt{\frac{ПВ_{ном}}{100}}, \qquad (72)$$

где $I_{2.пр}$ — продолжительный ток в сварочной цепи [см. (64)].

Силовые и прежде всего изгибаемые элементы контура, а также их сопряжения, являющиеся, как правило, контактами, проверяются на прочность. Так как сечения этих элементов по условиям прочности часто больше сечений, необходимых по расчету на плотность тока, целесообразно такие элементы делать не из меди, а из ее сплавов повышенной прочности (например, хромоцинковой бронзы ЭВ, см. § 6), несмотря на их пониженную электропроводность.

Допустимая плотность тока зависит от электропроводности материала, размеров и типа сечения токоведущего элемента (в шинах из тонких проводников меньше поверхностный эффект и лучше естественное охлаждение, чем в массивных проводниках), условий охлаждения и, наконец, конструктивных требований (табл. 19). С увеличением $j_{2.пр}$ уменьшается сечение токоведущих элементов при росте потерь энергии на их нагрев. Уменьшение сечения элементов контура часто имеет решающее значение, например, для получения легкого кабеля в переносных машинах; для обеспечения малых размеров электрододержателей при точечной сварке в стесненных местах. Допустимая плотность тока в таких элементах очень велика, а для борьбы с перегревом применяют интенсивное охлаждение.

Допустимая продолжительная плотность тока для неподвижных контактов между медными деталями, охлаждаемыми водой, составляет 0,5—1,0 *а/мм*^{2}. При воздушном охлаждении контакта она понижается до 0,2—0,5 *а/мм*^{2}. В контакте между латунными деталями с водяным охлаждением допускается $j_{2.пр}$ = 0,4—0,8 *а/мм*^{2}. Неподвижные контакты стягиваются болтами диаметром не менее 10—12 *мм*. Усилие затяжки болтов должно обеспечивать удельное давление в контакте, равное 0,4—0,8 *кГ/мм*^{2}.

Общее сопротивление сварочного контура

$$Z_{вн} = \sqrt{R_{вн}^2 + X_{L.вн}^2}. \qquad (73)$$

Активное сопротивление $R_{вн}$ слагается из сопротивлений отдельных элементов контура и контактов между ними. Активное сопротивление любого элемента контура равно

$$R_{п.вн} = m \rho_T \frac{l_п}{F_п}, \qquad (74)$$

где l_n — длина элемента;
F_n — его поперечное сечение;
ρ_T — удельное сопротивление при максимальной допустимой температуре (около 75° С);
m — коэффициент, учитывающий поверхностный эффект (для гибких шин из фольги $m = 1{,}0$; для массивных элементов m можно приближенно найти по формулам (11) и (12), подставляя вместо a_0 половину толщины элемента).

Сопротивление контактов зависит от их конструкции и состояния. Наименьшее сопротивление имеют постоянные неподвижные

Таблица 19

Допустимые плотности тока в элементах сварочного контура и во вторичном витке сварочного трансформатора

Наименование элемента	Тип сечения и материал	Охлаждение	Допустимая плотность тока в $а/мм^2$
Хоботы, хоботодержатели, плиты	Медь катаная	Воздушное Водяное	1,8—2,2 2,4—2,6
	Бронза Латунь	Воздушное	1,4—1,6 1,8—2,0
Электрододержатели	Медные сплавы с электропроводностью не менее 85%	Водяное	10—20
	Латунь	Водяное	8—15
Гибкие шины (соединительные или шины вторичного витка трансформатора)	Медь М1	Воздушное Водяное одного контакта при длине до 1000 *мм* Водяное двух контактов при длине до 1000 *мм*	2,8—3,5 4—4,5 5—5,5
Гибкие кабели	Медь М1	Интенсивное водяное	20—40
Вторичный виток трансформатора	Медь М1, катаная листовая Тонкостенные медные трубы	Водяное Водяное	2,8—3,2 5—8

контакты (2—8 *мком*); сопротивление переменных неподвижных контактов достигает 4—12 *мком*, а подвижных — 8—20 *мком*. С увеличением мощности машины контактные сопротивления ее сварочного контура уменьшаются главным образом вследствие роста усилий, обжимающих контакты. Падение напряжения $\Delta U_к$ в контакте определяется произведением его сопротивления на кратковременный ток. Для неподвижных контактов ориентировочно $\Delta U_к = 0{,}02 \div 0{,}15$ *в*, для подвижных 0,1—0,3 *в*. При плохом состоянии контактов (неподтянутые болты, окисленные поверхности) их сопротивление, а также падение напряжения на этих контактах может возрасти во много раз.

Индуктивное сопротивление сварочного контура

$$X_{L.вн} = 2\pi f L, \tag{75}$$

где f — частота тока в *гц*;

L — индуктивность контура в генри.

В простейшем случае для контура в виде прямоугольной рамки длиной a (вылет) и шириной b (раствор), образованной круглыми проводниками диаметром d,

$$L = \frac{\mu_0}{\pi}\left[a \ln\frac{4ab}{d(c+a)} + b \ln\frac{4ab}{d(c+b)} - 2(a+b+c)\right], \tag{76}$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха ($1{,}256 \cdot 10^{-8}$ *гн/см*) и

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

При $f = 50$ *гц* индуктивное сопротивление элементов контура можно рассчитать по эмпирическим формулам. Это сопротивление на единицу длины контура составляет:

при круглых хоботах радиусом r, расположенных на расстоянии b

$$X_L = 1{,}37\left(\frac{b-r}{r}\right)^{0,38} \cdot 10^{-6} \left|\frac{ом}{см}\right|. \tag{77}$$

при прямоугольных хоботах и шинах шириной α и толщиной β

$$X_L = 3{,}8\left(\frac{b-\beta}{\beta} \cdot \frac{\alpha}{\beta}\right)^{0,45} \cdot 10^{-7} \left|\frac{ом}{см}\right|, \tag{78}$$

при одном круглом и втором прямоугольном хоботе

$$X_L = 9{,}7\left(\frac{b-r}{r} \cdot \frac{b-\beta}{\beta} \cdot \frac{\alpha}{\beta}\right)^{0,17} \cdot 10^{-7} \left|\frac{ом}{см}\right|. \tag{79}$$

Индуктивное сопротивление свечей точечных машин

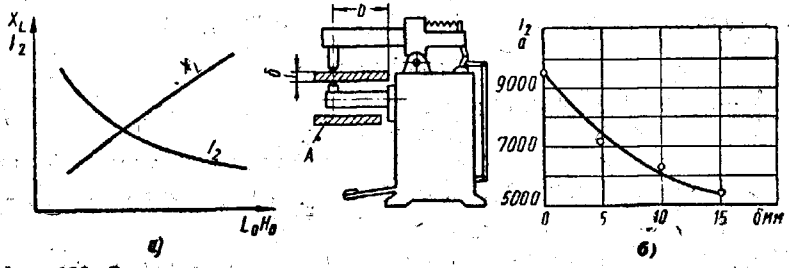
$$X_L = 9{,}5e^{0,05\frac{b_1-r_1}{r_1}} \cdot (b_1 - 2r) \cdot 10^{-7} \left|\frac{ом}{см}\right|, \tag{80}$$

где r_1 — радиус сечения свечи;

$b_1 - 2r$ — расстояние в свету между хоботами, равное суммарной расчетной длине свечей.

При расчете контур разбивается на участки с одинаковым сечением его элементов. Например, в контуре, представленном на фиг. 121, *а*, таких участков три: участок с двумя круглыми хоботами; участок с колодками хоботодержателей, сечение которых близко к прямоугольному; участок с прямоугольными гибкими шинами.

С увеличением полезного вылета L_0 и раствора между хоботами машины H_0, т. е. с увеличением площади контура, его индуктивное сопротивление быстро растет, а при неизменном значении $U_{2.0}$ соответственно уменьшается сварочный ток и мощность машины



Фиг. 133. Зависимость сварочного тока и индуктивного сопротивления от размеров контура (*а*) и влияние толщины ферромагнитной стали, расположенной в контуре, на сварочный ток (*б*).

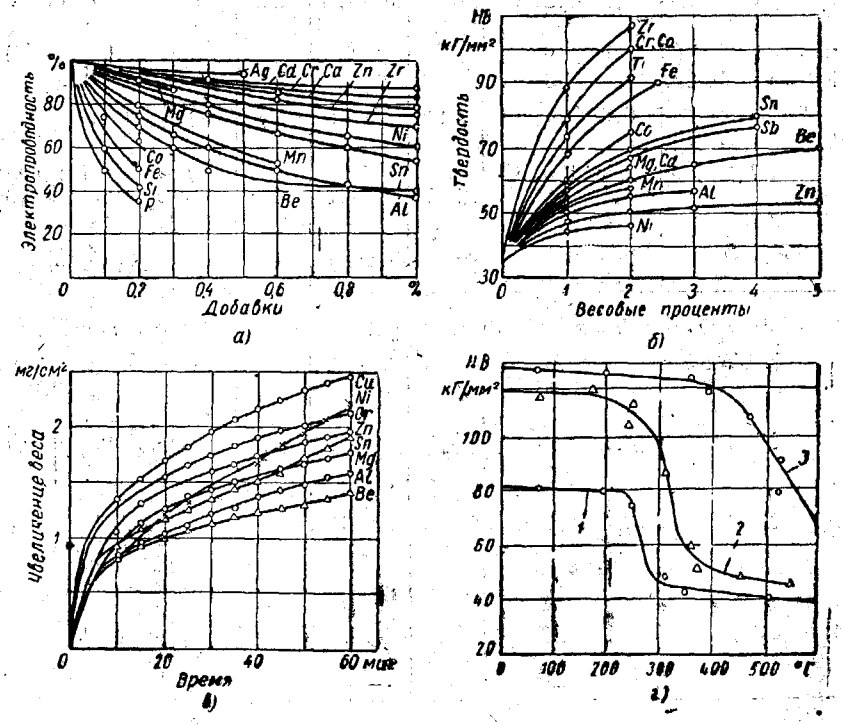
(фиг. 133, *а*). Например, при увеличении вылета с 300 до 1200 *мм* и неизменном $U_{2.0}$ ток может снизиться более чем втрое. Уменьшение площади контура — одно из эффективных средств повышения кратковременной мощности машины. Полное сопротивление контура, являющееся геометрической суммой активных и индуктивных сопротивлений всех его элементов, обычно лежит в пределах 150—350 *мком* (для машин мощностью 10—300 *ква*).

Введение в контур магнитной стали, например, пластины сечением $F = b\delta$ (фиг. 133, *б*) повышает как его индуктивное, так и активное сопротивление. Индуктивное сопротивление растет из-за увеличения магнитной проницаемости, так как при наличии рядом с проводником магнитной стали магнитная проницаемость $\mu \gg \mu_0$ [см. уравнение (76)]. Активное сопротивление увеличивается вследствие возбуждения в стали вихревых токов. Увеличение $Z_{вн}$ при введении в контур магнитной стали существенно уменьшает сварочный ток. Например, введение в контур машины мощностью 40 *ква* стальных листов сечением 300 × 15 *мм* вдвое уменьшило ток (фиг. 133, *б*). Поэтому при сварке избегают введения в контур тяжелых деталей или приспособлений из магнитной стали. Это особенно важно при роликовой сварке длинных изделий, надеваемых на хобот (см. фиг. 113). Следует отметить, что даже близко расположенные детали *А* из магнитной стали, находящиеся вне контура, мало влияют на его сопротивление (фиг. 133, *б*).

Если к $Z_{вн}$ геометрически прибавить расчетное сопротивление свариваемых деталей $R_{св}$, то произведение полученного значения Z и заданного сварочного тока $I_{2.кр}$ дает требуемое вторичное напряжение $U_{2.0}$ трансформатора. Его следует сопоставить с исходным $U_{2.0}$, принятым в расчете, а при расхождении этих величин более чем на 5% необходимо скорректировать расчет трансформатора по полученному $U_{2.0}$. При разработке новых машин целесообразнее исходить из технологически необходимого значения $I_{2.кр}$ и по полученному расчетом Z определять $U_{2.0}$ и мощность, пользуясь формулой (60).

§ 6. ЭЛЕКТРОДНЫЕ СПЛАВЫ

Наибольшее эксплуатационное значение имеют электропроводность, твердость и температура рекристаллизации электродных спла-



Фиг. 134. Влияние примесей на:

а — электропроводность меди; *б* — твердость и *в* — окисляемость меди (при 700°); *г* — зависимость твердости (при 20°) холоднокатаной меди (*1*), кадмиевой меди (*2*) и хромоцинковой бронзы ЭВ (*3*) от температуры отпуска в течение 2 час.

вов. Состав и характеристика сплавов, получивших наибольшее применение, приведены в табл. 20. Они разбиты на две группы: материалы с высокой электропроводностью (более 75% проводимости

Таблица 20

Состав и свойства электродных материалов

Марка материала	Состав в %	Электропроводность в % к проводимости меди (по стандарту)	Твердость при 20° в кГ/мм²	Температура рекристаллизации в °С	Основная область применения
Материалы для электродов с большой плотностью тока в контакте (точечная и роликовая сварка)					
Медь М1 холоднотянутая	Cu	98	75—100	200	Любые электроды при отсутствии более стойких материалов
Кадмиевая медь (МК)	0,9—1,2 Cd	~90	107—114	250	Сварка легких сплавов
Хромоцинковая бронза ЭВ	0,4—0,8 Cr 0,3—0,6 Zn	75—80	120—140	430	Сварка стали
Хромистая бронза (БХ 0,7)	0,6—0,8 Cr	~80	110—120	~400	Сварка стали
МЦ4	0,5—1,0 Cr 0,1—0,25 Al 0,1—0,25 Mg	75—78	110—135	510	Сварка сталей и сплавов с высоким электросопротивлением
МЦ5Б	0,15—0,25 Cr 0,2—0,3 Cd	87—90	85—95	380	Сварка легких сплавов
Материалы для электродов с малой плотностью тока в контакте					
Б р.КН 0,5-2,5	0,4—0,6 Si 2,3—2,6 Ni	40—45	130—150	450	Для электродов стыковых машин общего назначения
МЦ2	0,4—0,6 Si 1,5—1,7 Ni 0,15—0,3 Mg	40—50	140—170	540	То же, для листосварочных машин
МЦ3	0,9—1,1 Ni 0,15—0,25 Mg 0,15—0,25 Be	55—60	150—180	550	Для электродов при рельефной сварке, а также для стыковой сварки деталей большой точности
Cu-W	60 W 40 Cu	~45	225	~1000	Для электродных вставок при рельефной сварке

меди), предназначенные главным образом для точечной и роликовой сварки, и сплавы с пониженной электропроводностью (40—60%), но более твердые, используемые при стыковой сварке. Все эти материалы изготовляются на медной основе.

Твердость меди может быть повышена наклепом; легированием элементами, образующими с медью твердые растворы, и легирова-

нием элементами, ограниченно растворимыми в меди и обеспечивающими при старении упрочнение сплава за счет выделения дисперсных частиц избыточной фазы.

При легировании меди вводятся упрочняющие добавки, по возможности мало снижающие ее проводимость (Cd, Cr, Zn иногда Ag, фиг. 134, *а* и *б*). Как известно, с обогащением твердого раствора наряду с повышением твердости понижается его электропроводность. При выделении из твердого раствора дисперсных частиц одновременно повышается и его твердость и электропроводность. Поэтому дисперсионно твердеющие электродные сплавы, как правило, обладают наилучшим комплексом свойств.

Наибольшая жаропрочность также достигается у дисперсионно твердеющих сплавов, имеющих относительно высокую температуру рекристаллизации. Чистая медь упрочняется только наклепом и имеет температуру рекристаллизации 200° С (фиг. 134, *г*). Повышенная твердость кадмиевой меди достигается растворением кадмия в меди и наклепом. Твердость хромоцинковой бронзы (сплава ЭВ) обеспечивается сочетанием наклепа и термообработки. Ее температура рекристаллизации превышает 450°. Сплавы группы МЦ приобретают необходимую твердость в результате термообработки. Ее обычный режим: закалка в воду с температуры 900—1020° после выдержки около 1 часа и отпуск в течение 4—5 час. при 470—520°. Оптимальная температура нагрева при закалке и отпуске зависит от состава сплава.

Сопротивление меди окислению при 500—700° можно заметно повысить небольшими добавками Mg, Al или Be (фиг. 134, *в*). Например, жаростойкость сплава МЦ3, содержащего 0,2% Be и 0,15% Mg, при этой температуре, в 3—3,5 раза выше, чем меди, а жаростойкость сплава МЦ4, содержащего Al и Mg, приблизительно в 2,5 раза выше, чем меди.

Высокая твердость и сопротивляемость окислению существенно повышают стойкость электродов. Срок службы электродов из специальных сплавов в 3—6 раз выше, чем медных электродов.

Для электродных вставок при рельефной сварке, от которых требуется большая твердость и высокая температура рекристаллизации, применяют медновольфрамовые спеченные сплавы (60% W — 40% Cu), повышающие в несколько раз стойкость электродов.

ГЛАВА IX

ТРАНСФОРМАТОРЫ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС

Электрическая энергия сетевого напряжения чаще всего преобразуется в энергию, необходимую для контактной сварки, в однофазном сварочном трансформаторе. Для сварки требуются большие токи (обычно 2000—40 000 *а*) при низком напряжении.

Сварочный трансформатор характеризуется следующими основными параметрами: первичным напряжением U_1 (напряжением питающей сети), частотой тока f, электродвижущей силой вторичной обмотки E_2, номинальной мощностью $N_{ном}$ и номинальной продолжительностью включения $ПВ_{ном}$ (см. гл VII, § 2).

Трансформаторы для контактной сварки обычно включаются в сеть с напряжением 220 или 380 (реже 127 или 500 *в*). Каждый трансформатор рассчитывается на включение в сеть с определенным напряжением и без промежуточного трансформатора (или переделки) не может быть включен на другое напряжение.

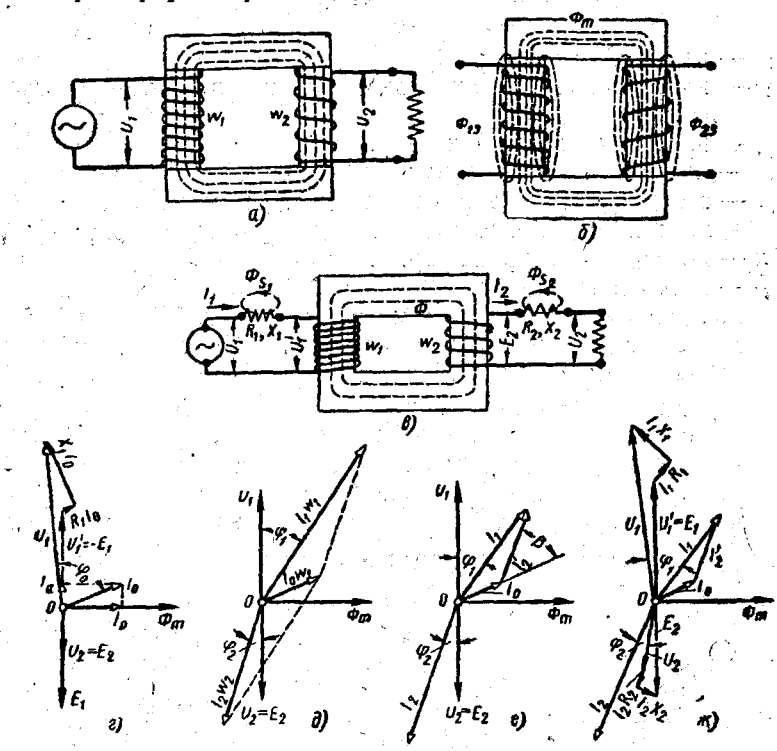
Сварочные трансформаторы включаются непосредственно в сеть промышленной частоты (50 *гц*). Только в отдельных случаях они питаются током пониженной (3—10 *гц*), повышенной (100—2500 *гц*) или высокой (до 450 000 *гц*) частоты. Иногда они питаются разрядом конденсаторов или импульсом выпрямленного тока (в различных типах импульсных машин). Напряжение холостого хода вторичной обмотки трансформатора $U_{2.0} = E_2$, необходимое для получения в машине заданного сварочного тока, зависит от конструкции и размеров сварочного контура, материала и размеров свариваемых деталей, способа сварки и др.

Обычно $U_{2.0}$ лежит в пределах 1—24 *в*. В стационарных машинах $U_{2.0}$ редко превышает 16 *в*. Более высокое $U_{2.0}$ иногда требуется в подвесных машинах, в которых трансформатор соединен с рабочим инструментом длинными проводами. Отношение $\frac{U_1}{U_{2.0}}$ приближенно определяет коэффициент трансформации.

Наибольшее распространение имеют машины с трансформаторами мощностью от нескольких сот ватт до 300 *ква*. Иногда мощность трансформаторов достигает 1000 *ква* и выше. Номинальное

значение *ПВ* изменяется в зависимости от назначения машины в пределах от 5 до 100%.

Трансформаторы для контактной сварки отличаются от обычных силовых тем, что вследствие низкого $U_{2.0}$ вторичная обмотка сварочных трансформаторов имеет всего один или (в подвесных маши-



Фиг. 135. Схемы и векторные диаграммы трансформатора.

нах при $U_{2.0}=20\div24$ *в*) два последовательных витка. При этом необходимое для регулирования мощности изменение $U_{2.0}$ обычно достигается изменением числа включенных витков первичной обмотки (изменением коэффициента трансформации).

Как известно, всякий трансформатор состоит из первичной и вторичной обмоток и магнитопровода (сердечника). В идеальном трансформаторе, схематически показанном на фиг. 135, *а*, условно допускается, что сопротивления его первичной и вторичной обмоток равны нулю, отсутствуют потери энергии в сердечнике, вызываемые в реальном трансформаторе гистерезисом при перемагничивании и вихревыми токами, и отсутствует магнитное рассеяние, т. е. весь магнитный поток, создаваемый обмотками транс-

форматора, всегда полностью замыкается через сердечник и одновременно пронизывает обе обмотки. У идеального трансформатора к. п. д. равен 1, и для него справедливы следующие соотношения:

$$U_1 = E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m; \quad U_2 = E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m, \tag{81}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = n, \tag{82}$$

где U_1 — напряжение сети;
U_2 — напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора;
E_1 и E_2 — э. д. с. первичной и вторичной обмоток;
w_1 и w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток;
Φ_m — амплитудное (максимальное) значение магнитного потока, изменяющегося по синусоидальному закону;
n — коэффициент трансформации;
f — частота тока в *гц*.

В реальном трансформаторе (фиг. 135, *б*) часть индукционных линий магнитного потока, возбуждаемых его обмотками, замыкается минуя сердечник и образует магнитные потоки рассеяния $\Phi_{1.S}$ и $\Phi_{2.S}$. Потоки рассеяния создают индуктивное сопротивление обмоток реального трансформатора. Эти потоки тем меньше, чем ближе друг к другу и к сердечнику расположены витки первичной и вторичной обмоток. В эквивалентной схеме реального трансформатора (фиг. 135, *в*) активные и индуктивные сопротивления его обмоток (R_1, X_1, R_2, X_2) вводятся последовательно с этими обмотками.

При холостом ходе (трансформатор включен в сеть при разомкнутой вторичной цепи) в первичной обмотке трансформатора протекает ток холостого хода I_0. При этом в сердечнике возникает магнитный поток Φ_m, наводящий в обмотках трансформатора э. д. с. E_1 и E_2, отстающие от него по фазе на 90° (фиг. 135, *г*). Напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки $U_{2.0} = E_2$, так как при этом $I_2 = 0$ и потерь во вторичной цепи нет. В идеальном трансформаторе $E_1 = -U_1$; в реальном $-E_1 = -U'_1 < U_1$, так как часть напряжения сети U_1 затрачивается на преодоление током I_0 активного и реактивного сопротивлений первичной обмотки. Вектор $R_1 I_0$ направлен параллельно, а вектор $X_1 I_0$ перпендикулярно вектору I_0.

Ток холостого хода слагается геометрически из реактивного намагничивающего тока I_p, совпадающего по фазе с потоком Φ_m, и активного тока I_a, вызываемого потерями энергии в сердечнике вследствие гистерезиса и вихревых токов (токов Фуко). Угол φ_0 определяет сдвиг фаз напряжения и тока при холостом ходе (коэффициент мощности при холостом ходе) равен $\cos \varphi_0$. В силовых трансформаторах I_0 меньше 5% рабочего тока. В современных трансформаторах для контактной сварки I_0 не превышает

10%, а в некоторых трансформаторах старой конструкции I_0 достигает 20% рабочего тока.

Амплитуда магнитного потока при переходе от холостого хода к рабочему режиму не изменяется. При холостом ходе этот поток создается намагничивающей силой $I_0 w_1$; при работе с нагрузкой — геометрической суммой намагничивающих сил (ампервитков) первичной ($I_0 w_1$) и вторичной ($I_2 w_2$) обмоток (фиг. 135, *д*). Если значения намагничивающих сил разделить на w_1, то можно построить векторную диаграмму токов (фиг. 135, *е*), на которой $I_2' = -I_2 \frac{w_2}{w_1}$ называется приведенным вторичным током. Из этой диаграммы видно, что ток I_1 является геометрической суммой приведенного вторичного тока I_2' и тока холостого хода I_0. При малом I_0 приближенно $I_1 = I_2'$. В расчетах трансформаторов для контактной сварки пренебрегать значением I_0 часто нельзя. При малом угле β приближенно

$$I_1 = I_2' + I_0$$

или

$$I_2 = (I_1 - I_0) \frac{w_1}{w_2}. \qquad (83)$$

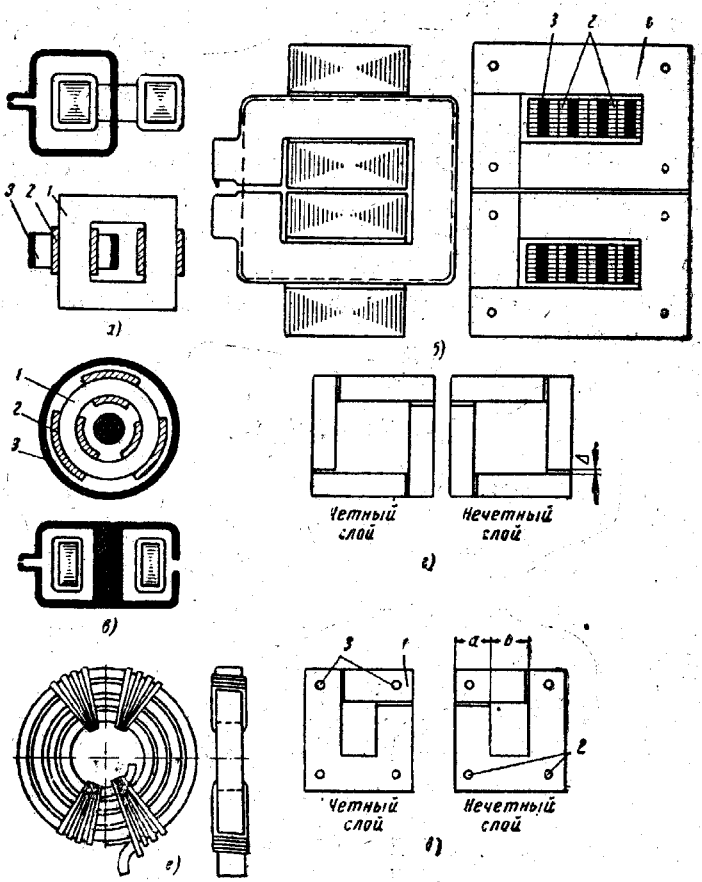
На фиг. 135, *ж* приведена полная векторная диаграмма реального трансформатора с рабочей нагрузкой. Напряжение U_2 на зажимах трансформатора меньше э. д. с. E_2, так как часть E_2 затрачивается на преодоление сопротивлений вторичной обмотки (векторы $I_2 R_2$ и $I_2 X_2$). Напряжение U_2 смещено на угол φ_2 по отношению к току I_2. Смещение по фазе I_1 и U_1 в первичной обмотке определяется углом φ_1, бо́льшим, чем φ_2.

§ 2. КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В машинах для контактной сварки применяются три типа трансформаторов с различными сердечниками: стержневой, броневой и кольцевой. Стержневой трансформатор (фиг. 136, *а*) проще в изготовлении, но имеет большие потоки рассеяния. Наиболее распространен броневой трансформатор (фиг. 136, *б*), в котором все обмотки размещаются вместе на центральном стержне сердечника *1*. Кольцевые трансформаторы (фиг. 136, *в*) первоначально были применены в трубосварочных станах как вращающиеся. Институт электросварки им. Патона разработал неподвижные контурные трансформаторы с разъемным кольцевым сердечником в первую очередь для сварки встык труб большого диаметра (см. фиг. 137, *г*). Катушки его первичной обмотки равномерно распределены по длине сердечника и чередуются с параллельно соединенными элементами вторичного витка, подводящими ток к кромкам свариваемых труб по всему периметру. Из-за малого контура установка с кольцевым трансформатором

имеет незначительное сопротивление $Z_{вн}$ и высокий cos φ, что обеспечивает устойчивое оплавление.

Для уменьшения вихревых токов и вызываемых ими потерь энергии сердечник набирается (шихтуется) из изолированных друг



Фиг. 136. Основные типы сварочных трансформаторов и их элементы (на *а*, *б* и *в*: *1* — сердечник; *2* — первичная обмотка и *3* — вторичный виток).

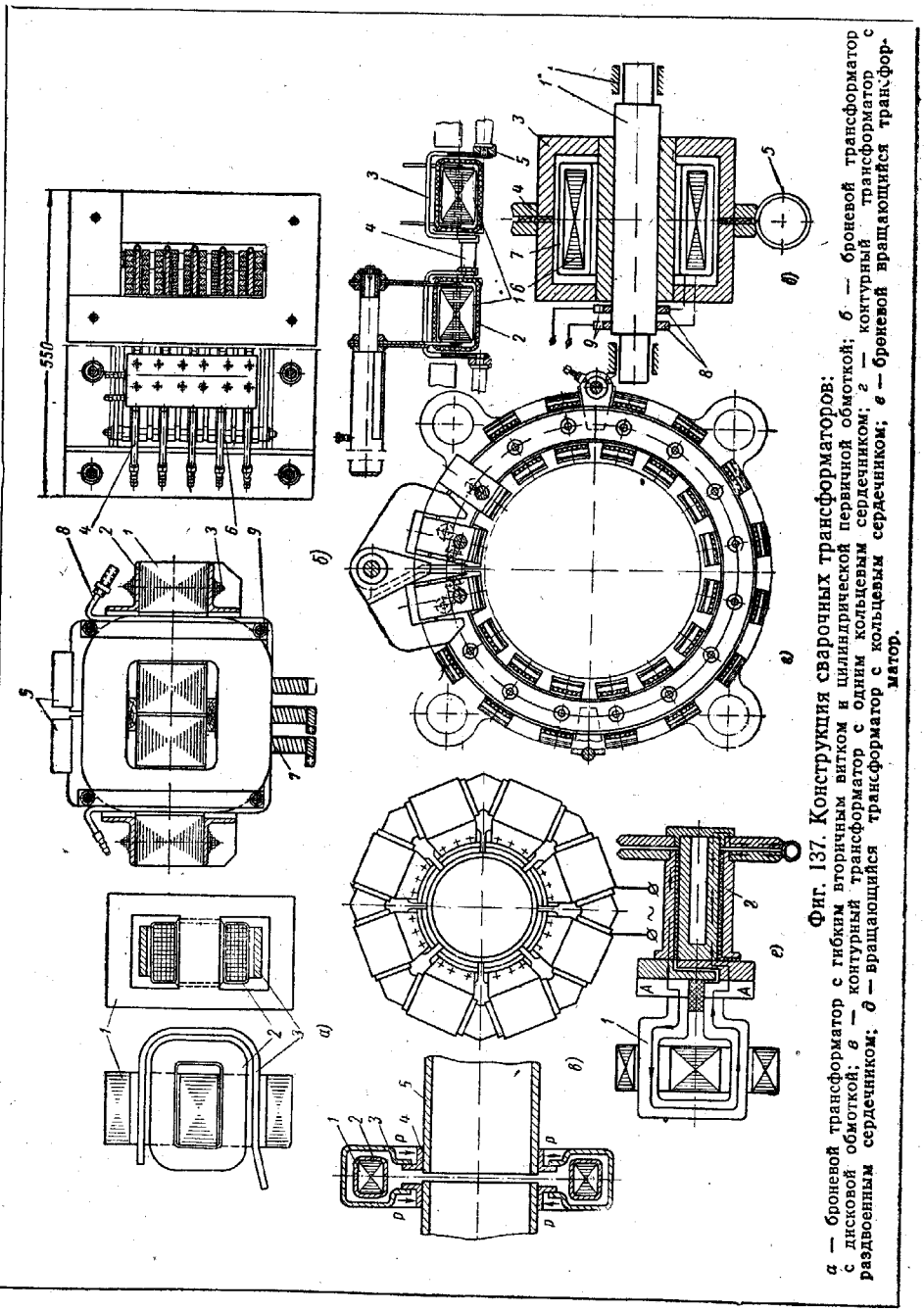
от друга листов электротехнической стали толщиной 0,35—0,50 *мм*. Листы после штамповки изолируются с одной стороны лаком. Электротехническая (динамная или трансформаторная) сталь обладает высокой магнитной проницаемостью при относительно большом удельном сопротивлении. Такое сочетание свойств достигается присадкой в сталь 1—4% Si при минимальном содержании в ней других элементов (в особенности углерода).

Сердечник собирается из отдельных листов внахлестку с чередованием стыков в соседних слоях (фиг. 136, *г*). Для уменьшения сопротивления магнитной цепи зазоры в стыках Δ должны быть минимальными (до 0,1 *мм*). В магнитопроводе стержневого трансформатора имеется четыре стыка, а при П-образной штамповке листов (фиг. 136, *д*) всего два. Столько же стыков в броневом сердечнике, состоящем из двух параллельных магнитных цепей (фиг. 136, *б*). При равенстве размеров *а* и *b* (фиг. 136, *д*) П-образная штамповка может выполняться без отходов. Листы ярма *1* шихтуются после сборки П-образного сердечника на шпильках *2* и надевания на него элементов первичной и вторичной обмоток. Ярмо скрепляется шпильками *3*.

Первичная обмотка выполняется из прямоугольного или реже круглого медного провода. Применяются цилиндрическая и дисковая обмотки. Первая состоит из одной или двух цилиндрических катушек *2* (фиг. 136, *а*). Дисковая обмотка разделяется на несколько (6—16) последовательно или последовательно-параллельно соединенных дисковых катушек (фиг. 136, *е*). Для уменьшения влияния поверхностного эффекта и связанных с этим увеличенных потерь в меди толщина катушек ограничивается 15—20 *мм*. Эти катушки *2* чередуются с элементами вторичного витка *3* (фиг. 136, *б*), чем достигается их малое расстояние между собой и сердечником. Это уменьшает потоки рассеяния трансформатора. Улучшается также охлаждение первичной обмотки за счет теплоотвода в элементы вторичного витка с водяным охлаждением. Наконец, при дисковой обмотке облегчается ремонт, так как при повреждении отдельной катушки ее заменяют без общей перемотки трансформатора.

Витки первичной обмотки изолируются друг от друга и от остальных элементов машины. Качество изоляции в основном определяет допустимый нагрев и срок службы трансформатора. Применяется изолированный провод (например, типа ПБД — провод с двойной хлопчатобумажной изоляцией) с дополнительной изоляцией витков прокладкой между ними электротехнического картона (прессшпана) толщиной 0,2—0,3 *мм*. При обмотке голым проводом толщина прокладок увеличивается до 0,5—0,7 *мм*. Готовые катушки стягивают и изолируют обматыванием хлопчатобумажной (киперной) лентой с последующей пропиткой лаком и просушкой при $T \approx 100°$. Первичная обмотка изолируется от вторичной и от сердечника. Эта изоляция должна быть тонкой (для уменьшения потоков рассеяния, растущих с увеличением расстояния между обмотками, и улучшения теплопередачи) и обладать сыростойкостью, так как при циркуляции воды в ненагретом трансформаторе на поверхности вторичного витка конденсируется влага. Этим условиям отвечает тонкий гетинакс ($\delta = 0{,}5 \div 1$ *мм*).

В трансформаторах с цилиндрической обмоткой делают гибкий или жесткий вторичный виток. Гибкий виток набирается из медной,



Фиг. 137. Конструкция сварочных трансформаторов:
а — броневой трансформатор с гибким вторичным витком и цилиндрической первичной обмоткой; *б* — броневой трансформатор с дисковой обмоткой; *в* — контурный трансформатор с одним кольцевым сердечником; *г* — контурный трансформатор раздвоенным сердечником; *д* — вращающийся трансформатор с кольцевым сердечником; *е* — броневой вращающийся трансформатор.

фольги толщной 0,2—0,4 *мм* и часто непосредственно соединяется с подвижными элементами сварочного контура. При этом между первичной и вторичной обмотками имеется значительный зазор. Такие трансформаторы (фиг. 137, *а*) просты конструктивно, но мало совершенны электрически — они применяются только в машинах малой мощности.

В современных трансформаторах с дисковой первичной обмоткой вторичный виток состоит из трех или более плоских (дисковых) элементов *3*, соединенных параллельно (см. фиг. 136, *б*). Эти элементы штампуются из листовой меди. По периметру к ним привариваются трубки водяного охлаждения, а по концам — колодки для крепления шин сварочного контура. В сердечнике и обмотках включенного трансформатора возникают большие электромеханические силы. Поэтому сердечник стягивается болтами с помощью жестких рамок, а обмотки надежно расклиниваются. Типовая конструкция броневого трансформатора (мощностью 200 *ква*) показана на фиг. 137, *б*. Его сердечник *1* стянут рамками *2* с помощью изолированных болтов *3*. Вторичный виток состоит из пяти листов *4* толщиной 8 *мм*, приваренных к колодкам *5*. Концы *7* десяти катушек дисковой первичной обмотки *6* выведены вниз. Они имеют отверстия для присоединения проводов, питающих машину от сети через контактор и переключатель ступеней, служащие для включения трансформатора и регулирования его мощности. Трубки *8* предназначены для водяного охлаждения. Все обмотки расклинены на сердечнике и стянуты болтами *9*.

Контурный трансформатор с кольцевым сердечником, схематически показанный на фиг. 137, *в*, состоит из сердечника *1*, катушек первичной обмотки *2* и элементов вторичного витка *3* с закрепленными электродами *4*. Последние прижимаются к свариваемому изделию (трубе *5*) усилиями *P*, создаваемыми специальным механизмом.

Для удобного осмотра стыка и уменьшения опасности повреждения трансформатора брызгами расплавленной стали применяются трансформаторы со сдвоенным сердечником *1* (фиг. 137, *г*). Катушки первичной обмотки *2* соединяются параллельно, а каждый элемент вторичного витка состоит из гибких участков *3*, жесткой перемычки *4* и электродов *5*.

Схематический разрез вращающегося трансформатора показан на фиг. 137, *д*. На валу *1*, вращающемся в подшипниках *2*, укреплены полые элементы *3* вторичного витка с насаженными на них кольцевыми электродами *4*, катящимися при сварке по кромкам трубной заготовки *5*. Внутри размещен кольцевой сердечник *6* с первичной обмоткой *7*, концы которой присоединены к изолированным контактным кольцам *8*. Ток к ним подводится щетками *9*. В связи со сложностью изготовления и ремонта кольцевого трансформатора иногда в качестве вращающегося трансформатора используется обычный броневой трансформатор *1* (фиг. 137, *е*), же-

стко соединяемый с цилиндрическими элементами сварочного контура *2*, вращающимися в подшипниках.

Известны более простые в изготовлении вращающиеся трансформаторы со стержневым сердечником взамен кольцевого. На каждом из его четырех стержней имеются последовательно соединенные катушки первичной обмотки и соединенные параллельно элементы вторичного витка.

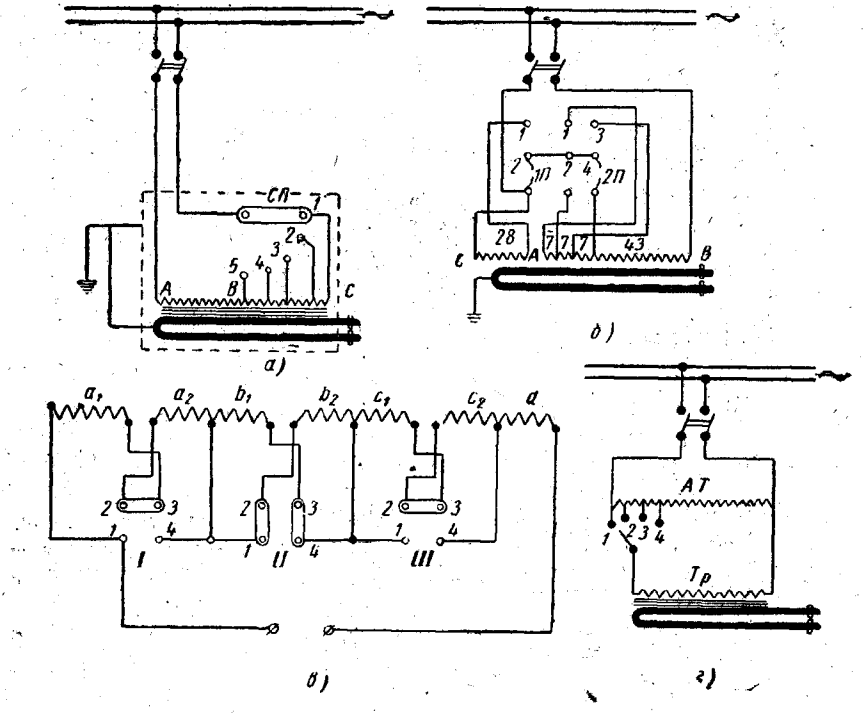
Оригинальная конструкция вращающегося трансформатора с заменой щеточного токоподвода магнитной бесконтактной связью разработана Институтом им. Патона (см. фиг. 130). Созданы малогабаритные трансформаторы, встраиваемые в легкие сварочные головки и клещи. В них используется высокопроницаемая холоднокатаная трансформаторная сталь и стойкая при высокой температуре изоляция из стеклянного волокна.

§ 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНОГО ТОКА

Сварочный ток регулируется изменением напряжения во вторичной цепи трансформатора. Это регулирование может быть неавтоматическим (требуемое напряжение $U_{2.0}$ устанавливается до начала сварки), автоматическим (при сварке автоматически поддерживается заданное неизменное напряжение) и программным (напряжение в процессе сварки изменяется по заданной программе, см., например, фиг. 97, *б*). Применяется ступенчатое и плавное регулирование или их сочетание. Наиболее распространено неавтоматическое ступенчатое регулирование мощности изменением числа включенных витков первичной обмотки w_1. Увеличение w_1 повышает коэффициент трансформации что, при неизменном U_1 ведет к снижению $U_{2.0}$, уменьшению тока I_2 и потребляемой мощности. Для этой цели первичная обмотка трансформатора секционируется и ее ответвления *1—5* (фиг. 138, *а*) соединяются с клеммами секционного переключателя *СП*. При включении на клемму *1* ток обтекает все витки; этому соответствует минимальное $U_{2.0}$ (низшая ступень). При включении на клемму *5* (высшая ступень) $U_{2.0}$ будет наибольшим. При этом напряжение сети U_1 подводится к участку обмотки *AB*, а между концами *A* и *C*, как в автотрансформаторе, появится напряжение $U_{AC} = U_1 \frac{w_1}{w_{1.min}}$ (w_1 — общее число витков первичной обмотки и $w_{1.min}$ — число витков в секции *AB*).

В машинах для контактной сварки отношение $\frac{w_1}{w_{1.min}}$ (коэффициент регулирования) обычно близко к 2, а в отдельных случаях и выше. При этом в первичной обмотке могут возникать опасные напряжения, значительно превышающие напряжение сети. Во избежание этого при $\frac{w_1}{w_{1.min}} > 1{,}5$ в первичной обмотке делают разрыв

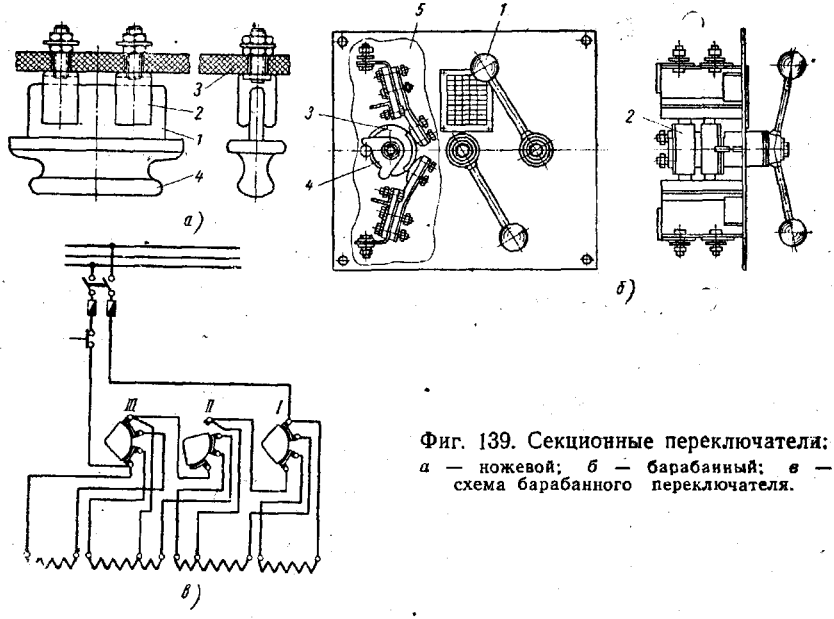
(точка *A*, фиг. 138, *б*) и переключатель имеет два ножа *1П* и *2П*. При их установке в положение *1* первичная обмотка включена полностью. При установке ножа *1П* в положение *2* левая группа из 28 витков отключается. Если при этом нож *2П* установлен в положение *4* (высшая ступень), то включено только 43 витка. При этом напряжение между точками *A* и *B* $U_{AB} < 1{,}50\ U_1$.



Фиг. 138. Схемы регулирования мощности трансформатора секционным переключателем (*а* — *в*) и автотрансформатором (*г*).

Заводом «Электрик» разработана оригинальная схема последовательно-параллельного переключения витков первичной обмотки, при которой на любой ступени током обтекаются все витки первичной обмотки (фиг. 138, *в*). Это уменьшает потоки рассеяния и улучшает использование меди. При указанном на схеме положении переключателей *I*, *II* и *III* витки a_1, a_2, c_1, c_2 и d соединены последовательно, а витки b_1 и b_2 — параллельно. При этом $w_1 = 2a + 2c + d + b$ (для обеспечения параллельной работы симметрично расположенные катушки имеют равное число витков). Если переключатели *I* и *III* установить как средний переключатель *II*, то все витки окажутся соединенными параллельно и $w_{1.min} = a + b + c + d$.

Нагрев при сварке регулируется двояко: изменением тока и длительности его включения. При плавном регулировании длительности нагрева не требуется особенно плавное регулирование тока — число ступеней переключения трансформатора ограничивают 6—8, реже 12—16. При затрудненном подводе тока к сварочному трансформатору (при вращающемся трансформаторе) или при необходимости предельного уменьшения его габаритов (в некоторых многотрансформаторных машинах) $U_{2.0}$ регулируют из-



Фиг. 139. Секционные переключатели: *а* — ножевой; *б* — барабанный; *в* — схема барабанного переключателя.

менением U_1 с помощью отдельного автотрансформатора *АТ* (фиг. 138, *г*). При этом сварочный трансформатор *Тр* имеет минимальное число витков и ток к нему подводится всего двумя проводами.

Существует несколько типов секционных переключателей. Простейший из них — штепсельный. Из-за заклинивания при перестановке его применение ограничивается машинами малой мощности. В машинах мощностью до 200 *ква* широко используются ножевые переключатели (фиг. 139, *а*), в которых медный нож *1* вводится в зазор между пружинящими контактными пластинами *2*, укрепленными на плите *3* из изоляционного материала. Нож закреплен в текстолитовой рукоятке *4*. В машинах большой мощности (200—400 *ква*) применяются барабанные переключатели со скользящими контактами (фиг. 139, *б*). Рукоятка *1* вращает ось с контактными барабанами *2*. На каждом барабане (из текстолита или пластмассы) имеется медная ламель *3* и ограничитель поворота *4*. К бара-

бану пружинами прижимаются четыре скользящих контакта *5*. Каждый барабан имеет всего два положения. Трехбарабанный переключатель имеет восемь положений (восемь ступеней), а четырехбарабанный — 16 положений. Эти переключатели используются для последовательно-параллельного соединения катушек первичной обмотки, что поясняется схемой на фиг. 139, *в*. Иногда в машинах большой мощности применяют простые и надежные пластинчатые переключатели, представляющие собой текстолитовую плиту с клеммными болтами, на которых в требуемом положении закрепляются гайками перемычки в виде пластин.

Недостаток пластинчатого переключателя, ограничивающий его применение, — медленное переключение, связанное с отвинчиванием гаек, и необходимостью отключения от сети.

Бесступенчатое регулирование тока (неавтоматическое, автоматическое и программное) в машинах переменного тока, как правило, осуществляется изменением специальными электронными устройствами (см. главу X) эффективного напряжения, питающего сварочный трансформатор. Это достигается изменением продолжительности фактического включения трансформатора в сеть в каждом полупериоде переменного тока.

§ 4. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

При расчете трансформатора исходят из следующих данных: напряжения сети U_1 и частоты f (50 *гц*); пределов регулирования $U_{2.0}$ (которые должны соответствовать коэффициентам трансформации, равным целым числам); числа ступеней регулирования трансформатора; номинальной мощности $P_{ном}$ и номинального $ПВ$; типа трансформатора. Трансформатор должен развивать номинальную мощность на предпоследней (номинальной) ступени включения. Последняя ступень считается резервной и позволяет работать при мощности, превышающей $P_{ном}$, но при соответствующем снижении $ПВ$. Так как потери в реальном сварочном трансформаторе относительно невелики, расчет основных его размеров, определяемых сечениями сердечника и обмоток, производят для идеального трансформатора, в котором $E_1 = U_1$ и $U_{2.0} = E_2$. Расчет начинается с определения напряжений (э. д. с.) на промежуточных ступенях, в том числе и на предпоследней, номинальной ступени ($_{2,\,ном}$). Желательно, чтобы отношение напряжений на смежных ступенях $\frac{U_{2.n}}{U_{2.n-1}} \approx$ const. При этом на всех ступенях коэффициент трансформации должен равняться целому числу. Затем рассчитывают поперечное сечение F ($см^2$) активной стали сердечника. После подстановки $\Phi_m = F_c \, B \cdot 10^{-8}$ в уравнение (81) имеем

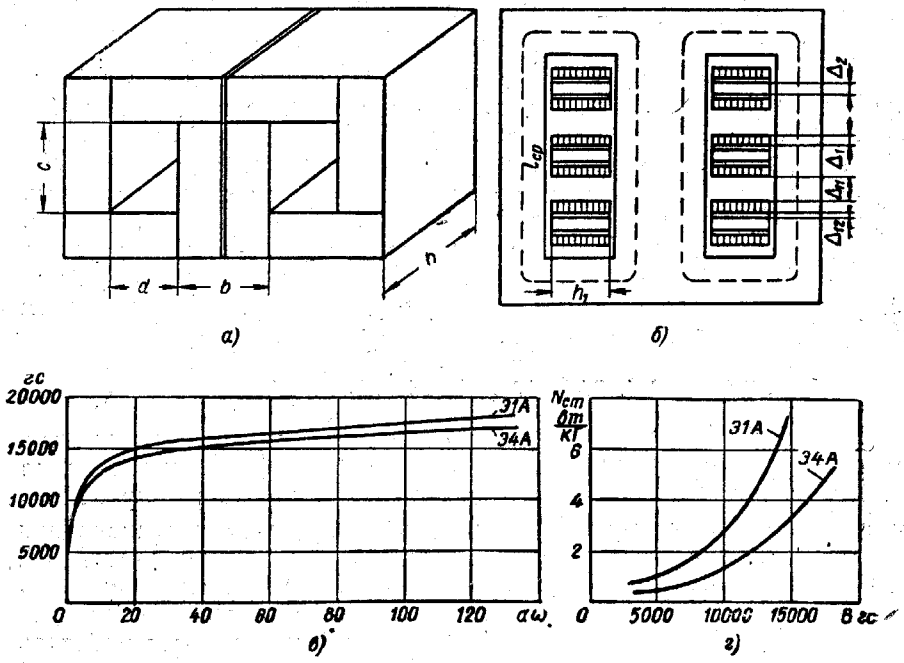
$$F_c = \frac{U_{2.max} \cdot 10^8}{4{,}44 f w_2 B}, \qquad (84)$$

где $U_{2.max}$ — напряжение на последней ступени;

w_2 — число витков вторичной обмотки (обычно 1);

B — допустимая магнитная индукция в гауссах.

Значение B зависит от режима работы ($ПВ_{ном}$) и применяемой стали. С увеличением B уменьшается F_c и понижаются размеры и вес трансформатора.



Фиг. 140. К расчету трансформатора:

а — размеры сердечника; *б* — размещение дисковых обмоток; *в* — кривые намагничивания электротехнической стали; *г* — потери в стали в зависимости от индукции.

При малых ПВ, когда нагрев сердечника невелик, целесообразно применять низколегированную динамную сталь марки Э1А, обладающую высокой магнитной проницаемостью; при ПВ $\geqslant$ 50% выгоднее трансформаторная сталь Э4 или Э4А, хотя и допускающая несколько меньшую индукцию, но меньше нагревающаяся из-за большего удельного сопротивления и, как следствие, меньших вихревых токов.

По данным завода «Электрик» применяются следующие значения индукции B: для Э1А — при $ПВ = 10\%$ — до 18 000 *гс*, при $ПВ = 20 \div 25\%$ — 16 000 *гц*; для Э4А при $ПВ = 50\%$ — 14 000 *гс* и при $ПВ = 100\%$ — 12 000 *гс*.

Фактическое сечение сердечника F_c' несколько больше F_c из-за неплотной сборки стальных листов и наличия изоляции

$$F_c' = \frac{F_c}{k_c}, \tag{85}$$

где k_c — при изоляции слоем лака равняется 0,9—0,92.

В стержневом трансформаторе все его стержни должны иметь одинаковое сечение F_c'. В броневом трансформаторе только средний стержень имеет сечение F_c', сечение остальных стержней равно $\frac{F_c'}{2}$ (фиг. 140, *а*). Минимальная длина витков обмотки при заданном F_c' будет при равенстве толщины h и ширины b пакета.

Для уменьшения габаритов трансформатора часто уменьшают b за счет увеличения h. Обычно в броневых трансформаторах $\frac{h}{b} = 0{,}7 \div 1{,}8$ (в стержневых 1,0—2,0).

Для расчета сечения первичной обмотки сначала определяется продолжительная мощность по формуле (65), исходя из значений $N_{ном}$ и $ПВ_{ном}$, а затем продолжительный ток на номинальной ступени

$$I_{1.пр} = \frac{N_{пр}}{U_1}. \tag{86}$$

Сечение первичной обмотки

$$F_1 = \frac{I_{1.пр}}{j_{1.пр}}. \tag{87}$$

Допустимая плотность тока в медной обмотке при естественном воздушном охлаждении $j_{1.пр} = 1{,}2 \div 1{,}7$ *а/мм²*. При хорошей циркуляции воздуха $j_{1.пр}$ повышается до 1,8—2,0 *а/мм²*. При дисковых обмотках, плотно зажатых между хорошо охлаждаемыми водой элементами вторичного витка, $j_{1.пр} = 2{,}8 \div 3{,}2$ *а/мм²*. Иногда для экономии меди часть витков обмотки, включаемых только при работе на низких ступенях, рассчитывается по соответственно уменьшенному току.

Продолжительный вторичный ток

$$I_{2.пр} = \frac{N_{пр}}{U_{2.ном}}. \tag{88}$$

Полное сечение вторичного витка

$$F_2 = \frac{I_{2.пр}}{j_{2.пр}}, \tag{89}$$

Значения допустимой плотности тока $j_{2.пр}$ приведены в табл. 18.

Для того чтобы закончить определение основных размеров трансформатора, необходимо рассчитать площадь окна сердечника $F_0 = cd$ (фиг. 140, *а*) по формуле

$$F_0 = \frac{\Sigma F_1 w_1 + \Sigma F_2 w_2}{k_{з.о}}, \qquad (90)$$

где $k_{з.о}$ — коэффициент заполнения окна, обычно равный 0,45—0.65.

Для уменьшения средней длины витка обмотки (и ее веса) нежелательно делать узкое окно. Отношение $\frac{c}{d} = 2{,}0 \div 3{,}0$. При окончательном выборе размеров сердечника учитывается рациональный раскрой стандартных листов электротехнической стали.

При дисковой обмотке вторичный виток разбивается на несколько параллельных элементов с двойным количеством дисковых катушек первичной обмотки. Последняя разбивается на группы так, чтобы при работе на номинальной ступени включенные витки обмотки располагались по возможности симметрично относительно элементов вторичного витка (асимметрия вызывает неравномерное распределение тока во вторичном витке и перегрев отдельных его элементов, а также увеличивает магнитный поток рассеяния). Широко применяется последовательно-параллельное соединение (см. фиг. 138, *в*). Между средними катушками (фиг. 140, *б*) оставляется зазор $\Delta_{11} = 10 \div 14$ *мм* для размещения отводов, расклинивания и воздушного охлаждения. После установления количества и сечения всех обмоток проверяется их размещение в окне сердечника с учетом необходимой изоляции и зазоров, а затем уточняются размеры окна. Далее производится проверочный расчет трансформатора для определения его потерь, к. п. д. и условий охлаждения.

Ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \qquad (91)$$

Намагничивающий ток I_p, необходимый для получения в сердечнике заданной индукции B, определяется по формуле

$$I_p = \frac{aw_1 l_{cp} + 0{,}8 n_з \Delta_з B}{w_1 \sqrt{2}}, \qquad (92)$$

где aw_1 — ампервитки на 1 *см*, определяемые по кривым намагничивания (фиг. 140, *в*) в зависимости от принятой марки стали и требуемой индукции (при $B > 16\,000$—$18\,000$ *гс* aw_1 очень быстро растет);

$l_{ср}$ — средняя длина (*см*) магнитной силовой линии (см. фиг. 140, *б*);

$n_з$ и $\Delta_з$ — число и величина ($\Delta \approx 0{,}005$ *см*) зазоров в магнитной цепи сердечника;

w_1 — число витков первичной обмотки на последней ступени трансформатора.

Активная составляющая тока холостого хода I_a рассчитывается по мощности $N_{ст}$, теряемой в сердечнике,

$$I_a = \frac{N_{ст}}{U_1}. \quad (93)$$

Эти потери пропорциональны весу сердечника G и равны

$$N_{ст} = (1{,}1 \div 1{,}2)\, n_{ст} G, \quad (94)$$

где $n_{ст}$ — удельные потери в *вт/кг*, увеличивающиеся с ростом индукции B и зависящие от марки стали (фиг. 140, *г*).

Если ток холостого хода окажется больше $0{,}1\, I_{ном}$, то трансформатор пересчитывают с уменьшением расчетной индукции.

Активные сопротивления обмоток (*ом*) равны

$$r_1 = \rho_1 m \frac{l_{1.ср} w_1}{F_1} \text{ и } r_2 = \rho_2 m \frac{l_{2.ср} w_2}{F_2}, \quad (95)$$

где ρ_1 и ρ_2 — удельное сопротивление материала первичной и вторичной обмоток с учетом их нагрева при работе (для первичной обмотки при 75°; для вторичного витка с водяным охлаждением при 50°);

m — коэффициент поверхностного эффекта;

$l_{1.ср}$ и $l_{2.ср}$ — средняя длина одного витка обмоток;

w_1, w_2, F_1 и F_2 — число витков и сечения обмоток.

Потери энергии (*вт*) в обмотках на их нагрев составляют при номинальном режиме

$$N_{1.м} = I^2_{1.пр} r_1; \quad N_{2.м} = I^2_{2.пр} r_2 \text{ и } N_м = N_{1.м} + N_{2.м}. \quad (96)$$

Индуктивное сопротивление обмоток, связанное с потоком рассеяния, зависит от их взаимного положения. Это сопротивление равно

$$X_2 = \frac{8 f w^2_1 \, l_{ср} \Delta_s}{l_s} \cdot 10^{-8}, \quad (97)$$

где f — частота тока в *гц*;

w_1 — число витков первичной обмотки (или ее секции);

$l_{ср}$ — средняя длина витка первичной и вторичной обмотки в *см*;

Δ_s — приведенное расстояние между обмотками в *см*;

l_s — расчетная длина индукционной линии рассеяния в *см*.

При дисковой обмотке для средних катушек (фиг. 140, *б*)

$$\Delta_s = \Delta_{12} + \frac{\Delta_1 + \frac{\Delta_2}{2}}{3} + \frac{\Delta_{11}}{4}. \quad (98)$$

Для средних катушек

$$l_s = \frac{h_1}{1 - \dfrac{\Delta_{12} + \Delta_1 + \dfrac{\Delta_2}{2} + \dfrac{\Delta_{11}}{2}}{\pi h}}. \qquad (99)$$

Для крайних катушек в формулах (98) и (99) подставляется $\Delta_{11} = 0$.

К. п. д. трансформатора приближенно определяется по формуле

$$\eta = \frac{U_{2\cdot ном} I_{2\cdot ном} \cos \varphi_2}{U_{2\cdot ном} I_{2\cdot ном} \cos \varphi_2 + N_{ст} + N_м}. \qquad (100)$$

Затем рассчитывается охлаждение трансформатора. Удельная тепловая нагрузка сердечника

$$q_{ст} = \frac{N_{ст} \dfrac{ПВ_{ном}}{100}}{S_{ст}} \leqslant 7{,}5 \ вт/дм^2, \qquad (101)$$

где $S_{ст}$ — полная охлаждаемая воздухом поверхность сердечника в $дм^2$ (при $q_{ст} > 7{,}5$ $вт/дм^2$ увеличивают $S_{ст}$).

Часть тепла ($q_м S_м$), выделяемого в обмотках, передается окружающему воздуху ($q_м \leqslant 6$ $вт/дм^2$; $S_м$ — охлаждаемая воздухом поверхность обмоток в $дм^2$). Остальное тепло, выделяемое в обмотках, должно быть отведено охлаждающей водой. Расход воды ($см^3/сек$) определяют по формуле

$$Q_в = \frac{0{,}24\left(N_м \dfrac{ПВ_{ном}}{100} - q_м S_м\right)}{\Delta T_в}, \qquad (102)$$

где $\Delta T_в$ — допускаемое повышение температуры воды (10—20°).

Сечение каналов водяного охлаждения рассчитывается так, чтобы скорость воды в них не превышала $v_в = 2 \div 2{,}5$ $м/сек$. При этом внутренняя поверхность $S_в$ ($дм^2$) этих каналов должна обеспечивать отвод требуемого количества тепла при коэффициенте теплоотдачи, выраженном в $вт/дм^2$ °С

$$k_т = 1 + 6\sqrt{v_в}$$

или

$$S_в \geqslant \frac{N_м \dfrac{ПВ_{ном}}{100} - q_м S_м}{k_т \cdot \Delta T_в}. \qquad (103)$$

ГЛАВА X

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ И КОНТРОЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Эта аппаратура может осуществлять следующие функции:

а) включать и выключать ток (с помощью контакторов);

б) обеспечивать выполнение элементов сварочного цикла (например, сжатие деталей, их сварку и проковку при точечной сварке) в заданной последовательности (с помощью аппаратуры управления сварочным циклом);

в) регулировать параметры процесса, определяющие условия нагрева при сварке, например, продолжительность импульса тока, эффективное напряжение и др. с помощью различных прерывателей и модуляторов.

Для контроля параметров сварки и при наладке оборудования применяют некоторые специальные измерительные приборы.

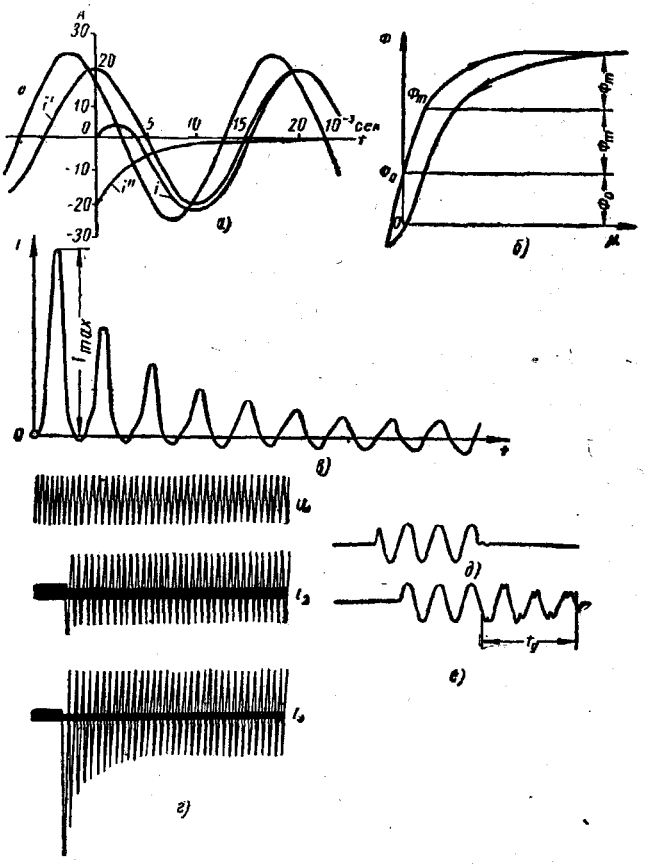
Как отмечалось выше, контактная сварка осуществляется очень быстро, а качество получаемых соединений определяется почти полностью параметрами технологического процесса. Поэтому совершенство аппаратуры управления и надежность всех ее элементов имеют исключительное значение для обеспечения высокой и стабильной прочности соединений при контактной сварке.

§ 2. КОНТАКТОРЫ

Применяются асинхронные и синхронные контакторы. Асинхронные контакторы включают и выключают переменный ток в произвольный момент времени, не связанный по фазе с синусоидой тока. Иногда асинхронные контакторы, выключающие ток при его прохождении через нуль, называются полусинхронными. Более совершенные синхронные контакторы включают ток в заданной точке его синусоиды, а выключают ток только при его нулевом значении.

Трансформатор и в особенности сварочный контур обладают большой индуктивностью, поэтому при их включении на синусоидальное напряжение токи в первичной и сварочной цепях не достигают сразу своих окончательных установившихся значений.

В случае, когда в цепь переменного тока с синусоидальным напряжением u включается катушка с активным сопротивлением R и индуктивностью L, но без железного сердечника, максимальное мгновенное значение неустановившегося тока i больше амплитудного значения установившегося тока i' (фиг. 141, $а$). Если включе-



Фиг. 141. Неустановившиеся процессы:

$а$ — при включении катушки без сердечника; $б$ и $в$ — при включении трансформатора без нагрузки; $г$ — при включении трансформатора под нагрузкой (u_1 — напряжение сети; I_1 — ток в первичной цепи, I_2 — сварочный ток); $д$ и $е$ — при отключении сварочного трансформатора.

ние осуществлено при амплитудном значении i' и свободный ток i'' спадает очень медленно из-за большой постоянной времени цепи, то предельное значение $i = 2i'$. Если же ток случайно включился при $i' = 0$, то $i'' = 0$ и неустановившийся ток $i = i' + i'' = i'$— система сразу входит в установившийся режим.

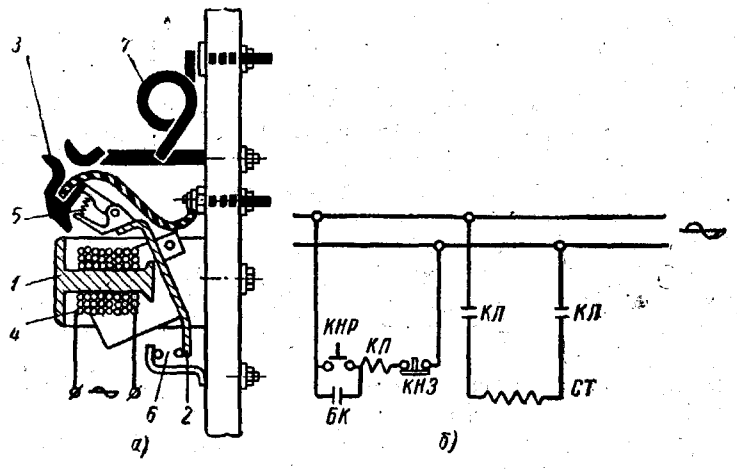
Явления неустановившегося режима гораздо сложнее при включении в цепь переменного тока катушки с железным сердечником, в котором возможен поток остаточного магнетизма, т. е. реального трансформатора. Если этот поток, сохранившийся от предыдущего включения трансформатора, равен Φ_0 (фиг. 141, *б*) и включение происходит в неблагоприятный момент, когда вновь создаваемый поток Φ_m совпадает по знаку с Φ_0, то максимальное неустановившееся значение потока может достигнуть значения $\Phi_0 + 2\Phi_m$. При этом индукция B в сердечнике значительно превысит установившуюся, соответствующую потоку Φ_m, и неустановившийся намагничивающий ток может катастрофически возрасти до i_{max} (фиг. 141, *в*).

Неустановившиеся процессы особенно сильно проявляются и медленно затухают в первичной цепи сварочного трансформатора (фиг. 141, *г*). Это может неблагоприятно влиять на работу других потребителей энергии, включенных параллельно с контактными машинами. Несмотря на то, что установившееся состояние в сварочной цепи достигается относительно быстро (в течение 1—3 периодов переменного тока), колебания в величине тока, связанные с асинхронным включением, могут существенно влиять на сварочный нагрев, в особенности при точечной сварке на «жестких» режимах и при роликовой сварке, когда отдельный импульс тока соизмерим по продолжительности с неустановившимися процессами.

Не менее существенно при контактной сварке синхронное выключение тока. Если ток выключается не при нулевом значении (фиг. 141, *д*), то в месте размыкания цепи, т. е. в контакторе, возникает электрическая дуга, разрушающая контакты и задерживающая действительное выключение тока (на $t_д = 0{,}02 \div 0{,}05$ сек.) по отношению к моменту срабатывания контактора (фиг. 141, *е*). При случайном срабатывании контактора вблизи $i' = 0$ дуга не загорится и запаздывания не будет. Затяжки включения тока, так же как неустановившиеся процессы при его выключении, ведут к нестабильности энергетических параметров сварки, управляемой асинхронным контактором. Эта нестабильность незначительно влияет на качество соединений при большой длительности включения тока ($t_{св} \geqslant 0{,}25 \div 0{,}35$ сек.) и малой чувствительности свариваемого материала (например, стали) к перегреву. В этих случаях успешно используют простые и дешевые асинхронные контакторы.

Контакторы бывают механические, электромагнитные и игнитронные асинхронные. Механический включатель представляет собой систему неподвижных и подвижных контактов, замыкание и размыкание которых кинематически связывается с движением элементов контура машины при зажатии и освобождении свариваемых деталей. Поэтому контакты включателя быстро обгорают и требуют частой зачистки и смены. Несовершенные механические включатели изредка применяются в неавтоматических машинах небольшой мощности.

В точечных машинах мощностью до 75 *ква*, а также в стыковых машинах обычно применяются электромагнитные контакторы. К электромагниту *1* (фиг. 142, *а*) притягивается якорь *2* с укрепленными на нем подвижными контактами *3* в момент, когда в катушке *4* протекает оперативный ток. При этом замыкается главная (силовая) цепь машины и начинается сварка. Давление в контактах регулируется пружинами *5*. При отключении катушки *4*



Фиг. 142. Электромагнитный контактор:
а — конструкция; *б* — схема включения.

якорь с подвижными контактами быстро возвращается в исходное положение собственным весом и пружинами. Контактор имеет вспомогательные блок-контакты *6* (нормально открытые или закрытые) для включения цепей управления. Виток *7* создает магнитное поле, выдувающее дугу в момент выключения тока.

В простейшей схеме электромагнитный контактор КЛ (фиг. 142, *б*) срабатывает и включает своими главными контактами КЛ трансформатор СТ при нажатии кнопки КНР. После ее отпускания оперативный ток в катушке КЛ протекает через нормально-открытые блок-контакты БК и нормально-замкнутую кнопку КНЗ. Контактор остается включенным до разрыва блокировочной цепи нажатием кнопки КНЗ. Обычно такие контакторы одновременно рвут силовую цепь в двух точках. Применение двухполюсных контакторов облегчает гашение дуги и уменьшает износ контактов.

Иногда применяются синхронизированные электромагнитные контакторы (например, КС-500), которые с помощью вспомогательной обмотки и небольшого конденсатора обеспечивают выключение тока при $i' \approx 0$ (ток включается в произвольной точке синусоиды).

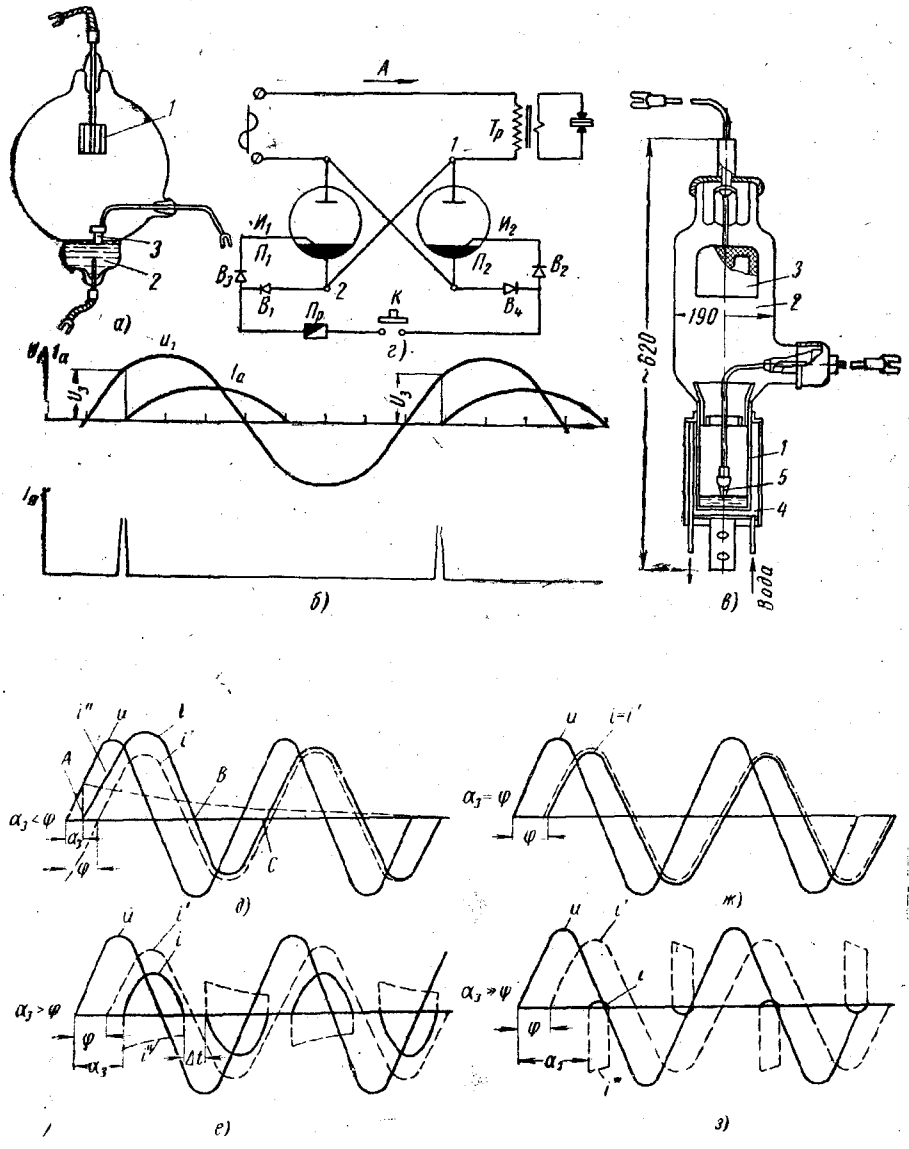
Эти контакторы однополюсные, так как износ их контактов невелик вследствие отсутствия дуги при выключении. Широко применяются асинхронные (полусинхронные) игнитронные контакторы, не имеющие движущихся частей (и поэтому бесшумны) и всегда отключающие ток при $i' = 0$. Игнитрон представляет собой трехэлектродный управляемый ионный прибор с жидким катодом. В сосуд, из которого откачан воздух, введен железный или графитовый анод *1* (фиг. 143, *а*). В нижнюю часть сосуда наливается ртуть, образующая катод *2*. Сбоку вводится третий электрод-поджигатель *3* (кристалл карборунда), частично погруженный в ртуть. При положительном потенциале поджигателя по отношению к катоду между ними мгновенно (менее чем за 0,001 сек.) возбуждается дуга, ионизирующая заполненное парами ртути пространство между анодом и катодом. При наличии в этот момент положительного потенциала на аноде между анодом и катодом также возбуждается дуговой разряд, и игнитрон зажигается — в нем начинает протекать анодный ток. Падение напряжения в игнитроне мало зависит от тока и составляет 16—18 *в*.

Игнитрон является управляемым вентилем, пропускающим ток только одного направления (от анода к катоду).

При включении игнитрона в цепь переменного тока с напряжением U_1 анодный ток I_a начинает протекать при появлении на поджигателе положительного потенциала U_3 (фиг. 143, *б*). При переходе тока через нуль игнитрон гаснет. В течение отрицательного полупериода тока межэлектродное пространство игнитрона успевает полностью деионизироваться, и для зажигания игнитрона в следующем положительном полупериоде требуется новый импульс U_3. Следует отметить, что искусственно приостановить протекание тока в возбужденном игнитроне нельзя до тех пор, пока его анодный ток естественно не достигнет нулевого значения.

Промышленный стеклянно-металлический игнитрон, рассчитанный на продолжительный ток $I_a = 100$ *а* (фиг. 143, *в*), состоит из металлического катодного стакана *1* с водяной рубашкой, спаянного со стеклянным баллоном *2*. В них находятся анод *3*, катод *4* и поджигатель *5*. Применяются и цельнометаллические игнитроны. Игнитрон пропускает большие токи, мало чувствителен к перегрузкам и надежен в эксплуатации. Его нормальный срок службы, обычно ограниченный долговечностью поджигателя, составляет 1000 час. и более.

В асинхронном игнитронном контакторе (фиг. 143, *г*) питание сварочного трансформатора Тр происходит через два игнитрона (И1 и И2), включенные по встречно-параллельной схеме, обеспечивающей протекание тока в оба его полупериода. Контактор включается кнопкой К. Если при ее нажатии ток протекает по стрелке А, то загорится игнитрон И2, так как при этом на его аноде появится положительный потенциал, а ток, протекающий через точки *1* и *2* и селеновые выпрямители $В_1$ и $В_2$, создаст необходимый потен-



Фиг. 143. Схема (*а*) и конструкция (*в*) игнитрона, схема асинхронного игнитронного контактора (*г*), анодный ток в игнитроне при различных условиях его включения (*б*, *д* — *з*).

циал зажигания на поджигателе $П_2$. В следующий полупериод И2 не загорится (так как на его аноде будет отрицательный потенциал), но загорится игнитрон И1. Ток к поджигателю $П_1$ подводится через выпрямители $В_3$ и $В_4$. При размыкании кнопки К процесс прекратится, однако только после того, как анодный ток достигнет своего нулевого значения.

В описанной схеме момент зажигания игнитронов не регулируется.

При обычном для контактной сварки значительном смещении по фазе тока и напряжения (на угол φ, фиг. 143, *д*) ток через включенный асинхронный контактор протекает непрерывно. Если кнопка *К* была нажата в момент А, то ток через И2 протекает в течение интервала времени АВ. В момент В напряжение достаточно для поджигания второго игнитрона И1, который горит в течение полупериода ВС, когда вновь зажигается игнитрон И2, и т. д. (при $\varphi=0$ напряжение в момент $I_a=0$ недостаточно для немедленного поджигания игнитрона; он загорится с некоторым запозданием, и ток будет протекать с небольшими перерывами). При непрерывном протекании тока через асинхронный игнитронный контактор наблюдаются такие же неустановившиеся процессы, как при использовании любого другого асинхронного контактора. В зависимости от положения момента включения А относительно синусоиды установившегося тока i' изменяется свободный ток i'' и неустановившийся ток $i = i' + i''$ (см. фиг. 141). Синхронные контакторы, снабженные устройствами для зажигания игнитронов в строго определенные моменты времени, обычно называются прерывателями и рассмотрены в § 4.

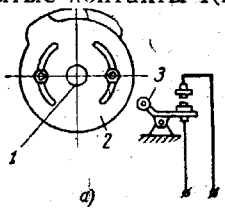
§ 3. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМ ЦИКЛОМ

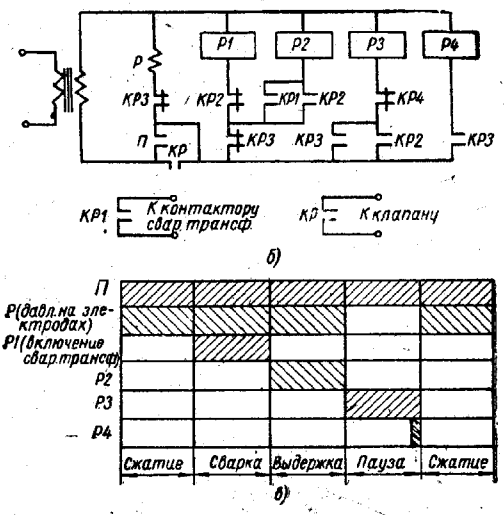
Применяются два основных способа управления сварочным циклом (иногда их комбинация): механический и электрический. Машины с электроприводом часто управляются механически с помощью кулачкового механизма (командоаппарата). При вращении вала *1* (фиг. 144, *а*) выступ кулачка в течение времени, регулируемого взаимным смещением шайб *2*, нажимает на рычаг *3* контактной системы. При этом в зависимости от настройки контактов замыкается или размыкается цепь оперативного тока, питающего катушку электромагнитного контактора, электропневматического клапана или других элементов машины.

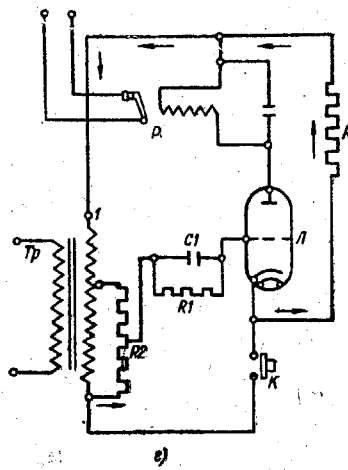
Наличие на одном валу нескольких кулачков позволяет регулировать продолжительность и последовательность ряда операций сварочного цикла, например, при стыковой сварке, включения и выключения сварочного тока, начала и окончания осадки, раскрытия зажимов и др.

В машинах с пневматическим и гидравлическим приводом применяется управление циклом с помощью электронных регуляторов времени. Принципиальная схема такого четырехпозиционного регу-

лятора (типа РВЭ-7) для точечной сварки показана на фиг. 144, *б*. При нажатии педального выключателя П срабатывает реле Р и замыкаются контакты КР. Реле Р включает электроклапан, подающий воздух в цилиндр механизма сжатия: начинается сжатие свариваемых деталей. Одновременно напряжение через нормально-закрытые контакты КР2 и КР3 подводится к реле времени Р1, которое срабатывает через заданный промежуток времени, ограничивающий продолжительность предварительного сжатия. При срабатывании Р1 замыкаются контакты КР-1, включающие кон-







Фиг. 144. Схемы автоматического управления циклом точечной сварки:
а — кулачковым командоаппаратом; *б* — электронным регулятором РВЭ-7; *в* — циклограмма работы РВЭ-7; *г* — схема электронного реле времени.

тактор (начинает протекать сварочный ток) и подающие напряжения на реле Р2. Через заданный отрезок времени (определяющий продолжительность импульса сварочного тока) Р2 срабатывает. При этом размыкаются контакты КР2 в цепи реле Р1, в результате чего разомкнутся контакты КР1 и отключится контактор. Одновременно КР2 подключает реле Р3. Через заданный интервал времени (время выдержки) реле Р3 срабатывает и н. з. (нормально закрытыми) контактами КР3 обесточит реле Р — контакты КР отключат клапан и освободят детали. Замыкание КР3 возбуждает реле Р4. По прошествии заданной паузы реле Р4 сработает, контактами КР4 разомкнет цепь реле Р3 и приведет в исходное положение цепь реле

Р — сварка может быть повторена, а при нажатой педали П будет повторяться автоматически.

Последовательность работы элементов схемы иллюстрируется циклограммой (фиг. 144, *в*). Более сложные циклы сварки могут управляться регуляторами с большим числом последовательно соединенных реле времени.

Схема отдельного реле времени показана на фиг. 144, *г*. Катушка промежуточного реле Р включена в анодную цепь электронной лампы Л. В цепь ее сетки параллельно включены конденсатор С1 и сопротивление R1 через потенциометр R2, питающийся частью вторичной обмотки вспомогательного трансформатора Тр. При разомкнутой кнопке К ток от движка R2 потечет через R1, сетку и катод лампы Л, сопротивление R3 к точке *1* трансформатора. Этот сеточный ток протекает по стрелке только в те полупериоды, когда потенциал сетки положителен по отношению к потенциалу катода. Падение напряжения на R1, регулируемое потенциометром R2, быстро заряжает конденсатор С1. При замыкании кнопки К цепь конденсатора С1 лишается возбуждения, и он начинает разряжаться на сопротивление R1. Одновременно замыкается анодная цепь лампы Л. Однако отрицательный заряд на ее сетке некоторое время, пропорциональное величине заряда и сопротивлению R1, запирает лампу.

Когда по мере разряда С1 потенциал на сетке достигнет определенной величины, в лампе начнет протекать анодный ток, в результате чего сработает реле Р, которое включит (или выключит) соответствующую оперативную цепь.

Величина заряда конденсатора и время срабатывания реле определяются напряжением, регулируемым потенциометром R2. Регуляторы РВЭ-7 имеют два диапазона регулирования времени каждой операции: 0,04—1,4 сек. и 0,23—6,75 сек. Они являются асинхронными приборами.

§ 4. ПРЕРЫВАТЕЛИ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Прерыватели служат для автоматического управления импульсом сварочного тока. Основная задача автоматизации точечной сварки — получение точек стабильной прочности. Сварные точки обладают одинаковой прочностью при одинаковых размерах и структуре их ядра, определяемых условиями нагрева и охлаждения при сварке и прежде всего температурным полем в момент окончания сварочного нагрева. Нагрев зависит от многих параметров: тока I_2 и длительности его включения $t_{св}$ (а также момента его включения при заданном $t_{св}$), сопротивления свариваемых деталей $R_{св}$, усилия P, приложенного к электродам, и диаметра их контактной поверхности $d_э$. Все эти параметры независимы, за исключением $R_{св}$, которое определяется значениями P и $d_э$, а также состоянием поверхности деталей. При сварке материала постоянной толщины в одинаковом состоянии одинаковый нагрев каждой

точки, а следовательно, и стабильная их прочность будут обеспечены при постоянстве I_2, $t_{св}$, P и $d_э$.

В производственных условиях этого очень трудно добиться. Длительность $t_{св}$ может изменяться из-за несовершенства включающих устройств (особенно при асинхронных контакторах).

Ток изменяется в результате колебаний напряжения в сети, изменения $R_{св}$, изменения сопротивления сварочного контура при введении в него магнитного материала, а также из-за ослабления или окисления его контактов, шунтирования тока.

Сопротивление $R_{св}$ колеблется вследствие изменения усилия P, а при $P=\text{const}$ из-за непостоянства доли этого усилия, непосредственно действующей в контакте между деталями; изменения $d_э$, неоднородной подготовки свариваемого материала или загрязнения контактной поверхности электродов.

Усилие P может отклоняться от заданного значения из-за нечеткой работы редукторов, не обеспечивающих постоянство давления воздуха в приводе машины; значительных и непостоянных по величине сил трения в подвижных элементах ее механизма сжатия; большой инерции движущихся частей (это существенно при очень «жестком» режиме сварки); изменения длины электродов (в машинах с пружинным регулированием усилия P).

Первоначально автоматизация процесса нагрева при точечной сварке сводилась к включению тока в течение заданного $t_{св}$. Даже наиболее совершенные синхронные прерыватели типа $t_{св}=\text{const}$ не всегда гарантируют стабильное качество точек, так как они не реагируют на неизбежные колебания других параметров процесса (помимо $t_{св}$). Современные усовершенствованные прерыватели по принципу действия могут быть разделены на две группы: а) прерыватели, сочетающие синхронное включение тока при $t_{св}=\text{const}$ с автоматическим поддержанием постоянства эффективного напряжения (прерыватели типа $t_{св}=\text{const}$; $I=\text{const}$) или с программным изменением этого напряжения на протяжении каждого импульса сварочного тока [$t_{св}=\text{const}$; $I=f(t)$] и б) прерыватели, управляющие процессом по тем или иным параметрам, непосредственно связанным с образованием сварной точки, и строго не ограничивающие продолжительность импульса сварочного тока ($t_{св}\neq\text{const}$).

Ко второй группе, в частности, относятся: прерыватели, выключающие ток после израсходования на сварку заданной порции энергии (прерыватели типа $U_1 \cdot I_1 \cdot t_{св}=\text{const}$); прерыватели, выключающие ток при достижении заданной температуры в контакте электрод — деталь (термопрерыватели) или при расширении свариваемых деталей, зажатых между электродами, на заданную величину, связанную со степенью нагрева зоны сварки (дилатометрические прерыватели).

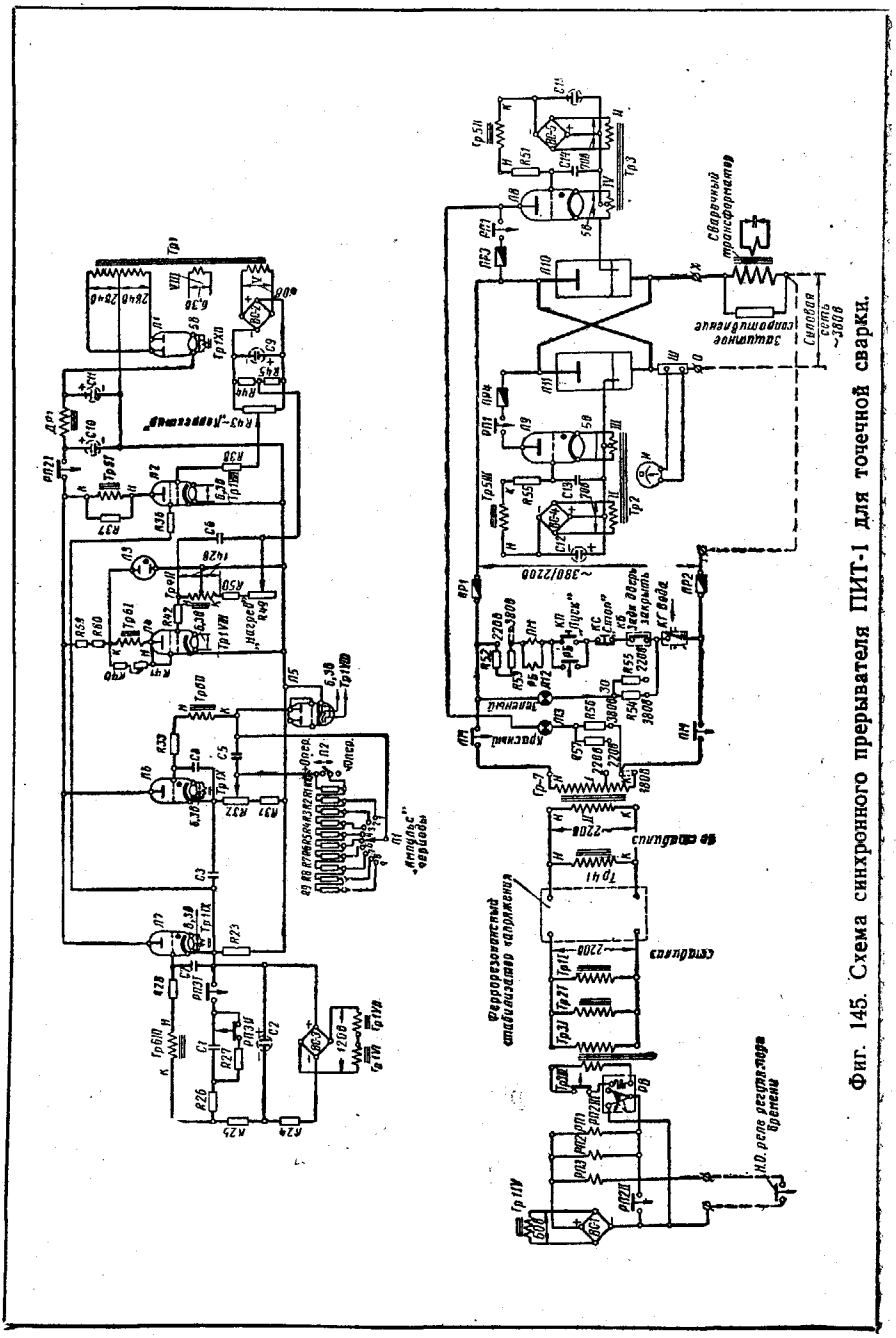
При ответственных сварочных работах основное промышленное значение в настоящее время имеют синхронные прерыватели

$t_{св} = \text{const}$ и прерыватели типа $t_{св} = \text{const}$; $I = \text{const}$ (в менее ответственных случаях применяется асинхронное включение с электронным или кулачковым управлением контактором).

В качестве примера рассмотрим полную схему синхронного прерывателя ПИТ-1, работающего по принципу $t_{св} = \text{const}$. Так же, как в асинхронном игнитронном контакторе (см. фиг. 143, *г*), силовая цепь синхронного прерывателя состоит из двух игнитронов (Л10 и Л11, фиг. 145), включенных по встречно-параллельной схеме, но с синхронным поджиганием управляемыми тиратронами Л8 и Л9 при определенном регулируемом смещении на угол α_3 момента поджигания по отношению к фазе напряжения сети. Обычно $\alpha_3 > \varphi$ (см. фиг. 143, *е*). При этом благодаря кратковременным перерывам Δt в течение каждого полупериода протекает одинаковый импульс тока, максимальное эффективное значение которого соответствует $\alpha_3 = \varphi$ (см. фиг. 143, *ж*). Значительное увеличение α_3 (см. фиг. 143, *з*) приводит к резкому уменьшению неустановившегося тока $i = i' + i''$. При $\alpha_3 < \varphi$ (см. фиг. 143, *д*) ток в сварочной цепи течет без перерывов, и в результате неустановившихся процессов амплитудные значения тока i непостоянны.

Обычно в синхронных прерывателях α_3 регулируется в пределах от φ до $\varphi + 50°$. Следует иметь в виду, что угол φ может изменяться при изменении размеров контура машины, при введении в него ферромагнитного материала и др. В результате этого при неизменной настройке угла α_3 смещение $\alpha_3 - \varphi$ будет изменяться, что приведет к изменению эффективного значения тока. Поэтому при значительном изменении φ требуется подналадка прерывателя.

Продолжим рассмотрение схемы прерывателя (фиг. 145). Сетевое напряжение с анода Л10 подается через предохранитель ПР3, нормально открытые контакты реле РП1 и тиратрон Л8 на поджигатель игнитрона Л10. Катод Л8 накаливается током от обмотки IV трансформатора Тр3. Выпрямитель ВС-5, питающийся переменным током от обмотки II трансформатора Тр3, через обмотку Тр5II и сопротивление R51 подает на сетку тиратрона Л8 запирающее его напряжение (потенциал сетки отрицателен по отношению к катоду). Поджигание Л10 возможно только при возбуждении тиратрона Л8 и замыкании контактов РП1. Последние замыкаются регулятором времени, управляющим циклом сварки (см. фиг. 142), и остаются замкнутыми в течение всего времени работы прерывателя. Тиратрон же возбуждается только при появлении положительного импульса в обмотке Тр5II, компенсирующего запирающее отрицательное напряжение на его сетке. При этом тиратрон загорается, когда его анодное напряжение достигнет определенной величины. Игнитрон Л11 управляется тиратроном Л9, возбуждение которого происходит при положительном импульсе на обмотке Тр5III. Положительные импульсы на Тр5II и Тр5III



Фиг. 145. Схема синхронного прерывателя ПИТ-1 для точечной сварки.

смещены по фазе на 180°. Они возникают при работе цепей управления, образованных лампами Л1—Л7 и соединенными с ними элементами схемы. Эти цепи создают импульсы определенной формы и продолжительности, которые через трансформатор Тр5, первичная обмотка которого Тр5I включена в анодную цепь лампы Л2, поочередно поджигают игнитроны Л10 и Л11 в заданные по фазе моменты времени.

Для возбуждения импульсов служит триггерная цепь, состоящая из двойного диода Л5 и тиратронов Л6 и Л7. При запуске прерывателя замыкаются контакты РП21 и подается питание в анодные цепи Л6 и Л7 от трансформатора Тр1 через двойной диод Л1 и фильтр (ДР1, С10 и С11). К сетке тиратрона Л7 при этом приложено отрицательное напряжение от выпрямителя ВС-3, питающегося обмотками VI и VII трансформатора Тр1. В этом состоянии Л7 при подаче на него анодного напряжения не возбуждается.

Потенциал сетки тиратрона Л6 по отношению к его катоду равен нулю и при подаче анодного напряжения Л6 возбуждается. Анодный ток создает падение напряжения на сопротивление R31—R32, в результате чего через сопротивление R23 зарядится С3, а через лампу Л5 (закороченный анод, сетку и катод) — конденсатор С5. К катоду Л6 подключены положительные обкладки С3 и С5. Теперь триггерная цепь подготовлена к подаче сварочного импульса.

При командном сигнале (от регулятора времени) срабатывает реле РП3. Его н. о. (нормально открытые) контакты РП31 подключают С1 на зарядку от выпрямителя ВС-3, а н. з. контакты РП3-II отключают С1 от R27. Падение напряжения от зарядного тока на R24—R25 резко снижает отрицательный потенциал на сетке Л7, поэтому в момент появления синхронизирующего импульса на обмотке Тр6III тиратрон Л7 возбуждается и присоединяет к аноду Л6 отрицательную обкладку ранее зарядившегося конденсатора С3. Это вызывает мгновенное снижение напряжения на аноде Л6, его возбуждение прекращается и не может вновь восстановиться, так как он заперт отрицательным напряжением на сетке от заряженного конденсатора С5.

Вследствие падения напряжения на R23 при возбужденном тиратроне Л7 конденсатор С3 через R31—R32 перезаряжается обратной полярностью. При прекращении возбуждения Л6 конденсатор С5 начинает разряжаться через сопротивления R1—R10, набранные с помощью переключателей П1—П10. Как только напряжение на С5 упадет до величины, при которой сетка Л6 потеряет запирающее действие, Л6 вновь возбудится, а Л7 окажется запертым. На этом цикл работы триггерной цепи заканчивается.

Время разрядки С5 регулируется ступенчато — перестановка П1 на одно деление удлиняет его на один период, а перестановка П2 на десять периодов. Таким образом, время включения реле РП3

не задает фактической продолжительности сварочного импульса, начало которого совпадает с первым синхронизирующим импульсом, а длительность определяется количеством включаемых в цепь С5 сопротивлений R1—R10. Для повторения этого цикла сначала нужно выключить реле РП3 (его н. з. контакты РП3-II разрядят С1 на R27), а затем вновь включить.

Продолжительность возбуждения тиратрона Л7 определяет длительность сварочного импульса (количество поджиганий игнитронов за один цикл работы триггерной цепи), так как напряжение с анодной нагрузки (R23) тиратрона Л7 подается на экранную сетку лампы Л2 в цепи связи и определяет, как показано ниже, количество импульсов, возникающих в импульсном трансформаторе Тр5. Эти импульсы отпирают тиратроны Л8 и Л9, управляющие поджиганием игнитронов Л10 и Л11.

Синхронизация работы триггерной цепи с частотой питающей сети осуществляется подачей на сетки Л6 и Л7 кратковременных импульсов через обмотки II и III трансформатора Тр6, формируемые так называемой дифференцирующей цепью. Эта цепь состоит из электронной лампы Л4, импульсного трансформатора Тр6 и лампы Л3 (стабиливольта) стабилизирующей напряжение в этой цепи.

На управляющую сетку лампы Л4 через трансформатор Тр4 подается неискаженное сетевое напряжение. При этом обмотка Тр4II, сопротивления R49 (регулируемое), R50 и конденсатор С6 образуют фазовращающую цепь (см. фиг. 146, *а* и *б*); изменяя сопротивления R49, можно изменять угол между сетевым напряжением на Тр4II и напряжением, подаваемым на управляющую сетку Л4.

Характеристика лампы Л4 выбрана так, что ее анодный ток имеет форму почти прямоугольных импульсов. Эти импульсы создают во вторичных обмотках II и III трансформатора Тр6 кратковременные импульсы напряжения, которые и используются в качестве синхронизирующих в триггерной цепи для возбуждения тиратронов Л6 и Л7.

Триггерная цепь связана с сеточными цепями тиратронов Л8 и Л9 цепями связи и корректирования (электронной лампой Л2, импульсным трансформатором Тр5 и потенциометром — «корректиром» R43). Возбужденные в триггерной цепи импульсы напряжения, синхронизированные с напряжением сети при помощи дифференцирующей цепи, снимаются с анодной нагрузки Л7 и подаются на экранную сетку Л2. Лампа Л2 становится проводящей на все время возбуждения Л7. Анодный ток Л2 в момент ее проводимости индуктирует в обмотках Тр5II и Тр5III положительные импульсы напряжения, поочередно отпирающие тиратроны Л8 и Л9.

Корректир R43 позволяет подрегулировать интервалы между поджигающими импульсами и добиться одинаковых эффективных токов в обоих игнитронах (если это условие не соблюдено, то по-

является постоянная составляющая тока и ухудшается работа сварочного трансформатора). Постоянная составляющая отсутствует при нулевом положении индикатора И.

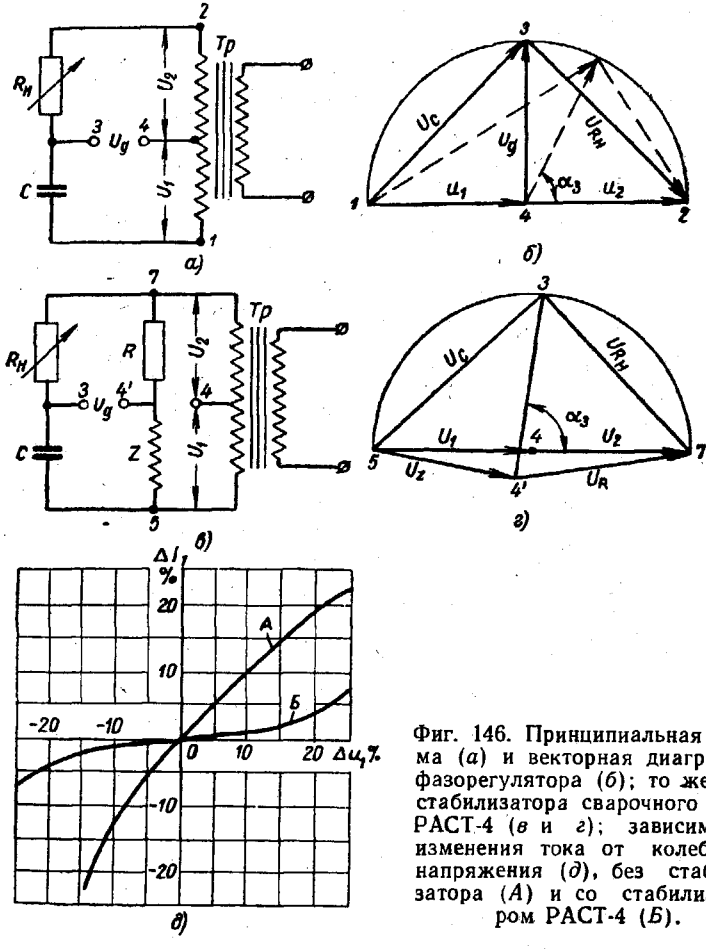
Игнитроны четко работают (безотказно поджигаются) при включении на напряжение не ниже 380 *в* и достаточно большом токе. Поэтому машины с игнитронными прерывателями выпускаются только на напряжение 380 *в*, а при включении в сеть 220 *в* они питаются через повысительный автотрансформатор 220/380 *в*. Защитное сопротивление, включенное параллельно сварочному трансформатору, гарантирует протекание через игнитроны требуемого минимального тока (около 50 *а*) при любом значении сварочного тока.

Таким образом, синхронный игнитронный прерыватель имеет три главные цепи: силовую, непосредственно включающую сварочный ток; триггерную, задающую общую продолжительность сварочного импульса тока, и дифференцирующую, определяющую форму каждой полуволны сварочного тока.

Более совершенные синхронные прерыватели (например, ПИТ-2) снабжаются стабилизаторами сварочного тока. Стабилизация может быть достигнута и в прерывателе ПИТ-1 подключением отдельного прибора, например автоматического регулятора сварочного тока РАСТ-4. Действие стабилизатора основано на автоматическом изменении угла зажигания игнитронов α_3 (см. фиг. 143) с помощью фазорегулятора: при понижении напряжения сети α_3 автоматически уменьшается и за счет удлинения каждой полуволны сварочного тока поддерживается его требуемое эффективное значение.

В обычном фазорегуляторе, управляющем через ряд элементов схемы прерывателя моментом поджигания игнитронов, фаза напряжения U_∂ между клеммами *3* и *4* (фиг. 146, *а*) определяется соотношением регулируемого омического сопротивления $R_н$ емкостного сопротивления конденсатора *С*. Геометрическая сумма $U_{Rн}$ и U_C (всегда взаимно перпендикулярных) равна напряжению $U_1 + U_2$. При изменении $R_н$ точка *3* (фиг. 146, *б*) описывает дугу окружности и вектор U_∂ образует больший или меньший угол α_3 по отношению к вектору сетевого напряжения $(U_1 + U_2)$. В стабилизаторе РАСТ-4 к фазорегулятору подсоединяются два дополнительных сопротивления — омическое *R* и катушка *Z* (фиг. 146, *в*). Теперь угол α_3 зависит не только от соотношения $U_{Rн}$ и U_C, но и от величин U_R и U_Z (фиг. 146, *г*). Катушка *Z* является вторичной обмоткой трансформатора, первичная обмотка которого включена в анодную цепь электронных ламп. Их анодный ток пропорционален разности между нестабилизированным сетевым напряжением и некоторым постоянным стабилизированным напряжением. При увеличении разности этих напряжений ток в первичной обмотке трансформатора растет, а сопротивление обмотки понижается;

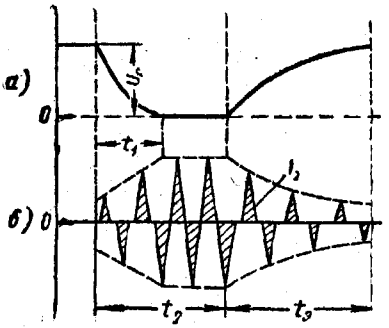
угол α_3 соответственно изменяется. Такой стабилизатор при колебаниях напряжения сети на ±15% поддерживает эффективное значение тока в пределах ±3% (фиг. 146, *д*). Время, необходимое для автоматической стабилизации (постоянная времени стабилизатора), составляет 0,02—0,03 сек.



Фиг. 146. Принципиальная схема (*а*) и векторная диаграмма фазорегулятора (*б*); то же для стабилизатора сварочного тока РАСТ-4 (*в* и *г*); зависимость изменения тока от колебаний напряжения (*д*), без стабилизатора (*А*) и со стабилизатором РАСТ-4 (*Б*).

В основном этот же принцип используется для программного управления импульсом сварочного тока. Например, в модуляторе МЭ-1 анодный ток электронных ламп, управляющих через фазорегулятор углом поджигания игнитронов, изменяется путем изме-

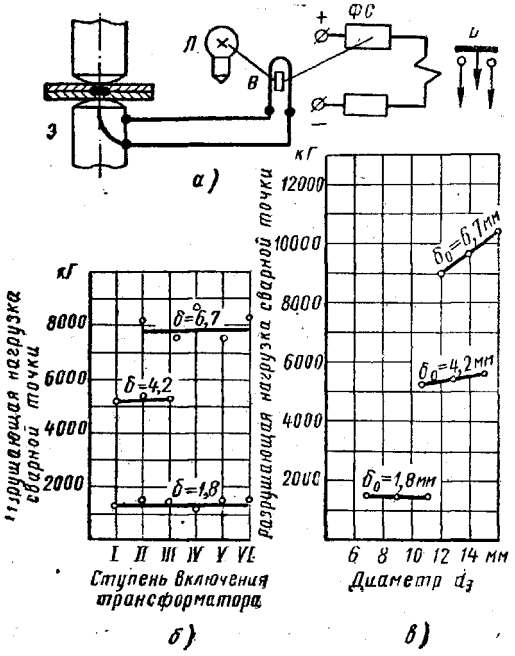
нения напряжения на сетке этих ламп. Для этой цели служит конденсатор емкостью C, предварительно заряженный до U_a (фиг. 147, *а*). Разрядка этого конденсатора на сопротивление R в течение t_1 приводит к постепенному уменьшению α_3 до установленного минимума и плавному нарастанию тока (фиг. 147, *б*). Начинающаяся в t_2 зарядка конденсатора вызывает постепенное повышение α_3 и плавный спад тока в течение t_3. Как известно, напряжение при зарядке и разрядке конденсатора изменяется по экспоненциальному закону тем скорее, чем меньше произведение RC. Изменением сопротивления R регулируют скорость нарастания и спада модулированного импульса тока.



Фиг. 147. Программное модулирование импульса сварочного тока.

Рассмотрим действие прерывателей, управляющих процессом по параметрам, связанным с образованием сварной точки. Терморегулятор, разработанный в ЦНИИТМАШе, автоматически выключает сварочный ток при достижении в контакте электрод — деталь заданной температуры $T_э = (0{,}45 \div 0{,}55)\, T_{плав}$, т. е. 650—800° для стали. Температура измеряется одним из электродов (фиг. 148, *а*), превращаемым в термопару. Для этого в электрод Э вводится тонкая, изолированная стеклянным волокном константановая проволока, образующая с ним термопару медь — константан со спаем на контактной поверхности. При сварке термоэлектродвижущая сила электрода воздействует на безинерционный гальванометр В (вибратор от осциллографа). При заданной температуре световой луч от осветителя Л, отраженный зеркальцем гальванометра В, попадает на фотосопротивление ФС, которое через реле Р отключает сварочный ток. Терморегулятор уменьшает вероятность непровара при снижении сварочного тока. Прочность сварной точки не понижалась при изменении ступени включения трансформатора (фиг. 148, *б*), при увеличении диаметра $d_э$ контактной поверхности электрода (фиг. 148, *в*) или случайном повышении толщины деталей. В этих случаях автоматически удлиняется время сварки. Терморегулятор непригоден при сварке плохо очищенной стали и при электродах малого диаметра (из-за быстрого повреждения электрода — термопары) и при $t_{св} < 0{,}6$—$0{,}8$ сек. (из-за инерционности термопары). Терморегулятор усовершенствованной конструкции, объединенный с игнитронным прерывателем в виде термопрерывателя (ТП-88) был применен при сварке ответственных изделий из декапированной. При этом электрод с термопарой имел большой диаметр и практически не изнашивался.

При расплавлении металл в ядре точки расширяется. Так как ядро окружено относительно холодным, трудно деформируемым металлом, расширение идет главным образом в направлении оси электродов; в момент расплавления ядра расстояние между электродами заметно увеличивается; без его расплавления (при непроваре) это расширение намного меньше. В дилатометрическом



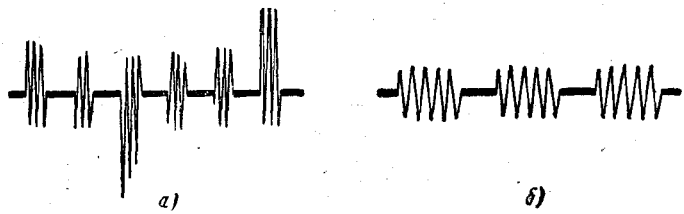
Фиг. 148. Терморегулятор точечной сварки:
а — схема; *б* — зависимость прочности точки от ступени включения трансформатора; *в* — то же от диаметра электрода.

прерывателе, разработанном одним из исследовательских институтов, рычажная система, связанная с верхним подвижным электродом, воздействует на прибор, отключающий сварочный ток при заданном расширении металла в ядре или сигнализирующий о недостаточном его расширении (непроваре).

§ 5. ПРЕРЫВАТЕЛИ И МОДУЛЯТОРЫ ДЛЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

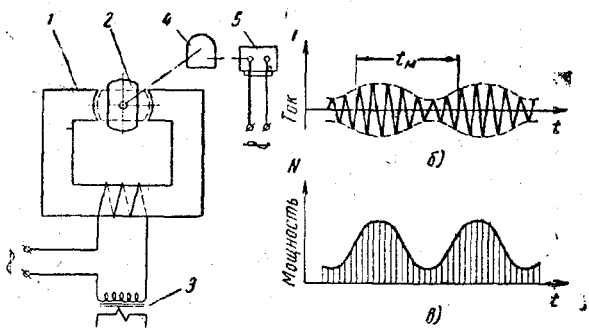
При роликовой сварке, как правило, кратковременные импульсы тока чередуются с паузами, и поэтому особенно важно синхронное включение, так как при асинхронном включении не обеспечивается стабильность режима (фиг. 149). В настоящее время при прерывистой роликовой сварке почти исключительно применяются

синхронные игнитронные прерыватели (типа ПИШ) с электронной схемой синхронизации. Так же, как в прерывателе для точечной сварки типа ПИТ (см. фиг. 145), прерыватель ПИШ имеет два игнитрона, зажигание которых управляется тиратронами. В триггер-



Фиг. 149. Осциллограммы первичного тока в сварочном трансформаторе при роликовой сварке с асинхронным (*а*) и синхронным (*б*) включением.

ной цепи прерывателя ПИШ предусмотрены два комплекта переключаемых сопротивлений, один из которых регулирует длительность сварочных импульсов, а второй — продолжительность пауз. Новейшие прерыватели ПИШ-2 автоматически стабилизируют эффективное напряжение.



Фиг. 150. Модулятор для роликовой сварки:
а — принципиальная схема; *б* — кривая изменения (модулирования) тока; *в* — кривая изменения мощности.

Удовлетворительные швы при прерывистой сварке могут быть получены не только при выключении тока на время пауз, но и при его резком периодическом уменьшении специальным модулятором. Простейший модулятор представляет собой дроссель *1* (фиг. 150, *а*) с вращающимся ярмом *2*. Дроссель включается в первичную цепь сварочного трансформатора *3*. Ярмо *2* через коробку скоростей *4* вращается синхронным электродвигателем *5*. Сопротивление магнитной цепи дросселя изменяется в зависимо-

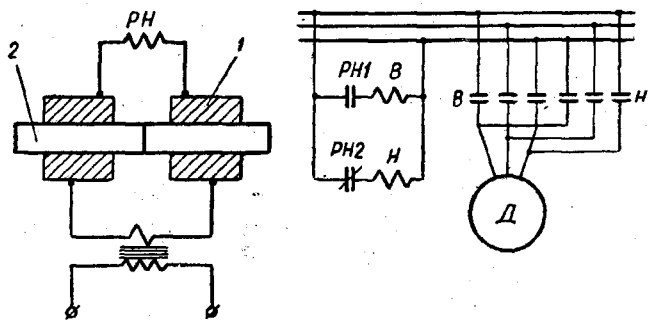
сти от положения ярма *2;* при большом зазоре в этой цепи ее сопротивление велико; при малом зазоре (пунктирное положение ярма) оно мало. В первом случае индуктивность дросселя и, как следствие, его сопротивление мало; в сварочной цепи машины протекает большой ток; во втором, наоборот, индуктивность дросселя велика и сварочный ток имеет минимальное значение. Длительность $t_м$ одного цикла изменения тока и мощности (фиг. 150, *б* и *в*) определяется числом оборотов ярма дросселя и регулируется переключением коробки скоростей, однако форма кривой модулированного тока остается неизменной. Известны более сложные модуляторы, позволяющие получить любое отношение продолжительности периодов максимального и минимального токов. Эти модуляторы более громоздки и менее совершенны, чем широко применяемые синхронные игнитронные прерыватели.

§ 6. АППАРАТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Большинство автоматических стыковых машин предназначено для сварки непрерывным оплавлением. При этом, как правило, кулачками задается жесткая программа процесса (величина и скорость оплавления, начало осадки, выключение сварочного тока). В отдельных случаях, например, при сварке деталей из легких сплавов продолжительность осадки при включенном токе ограничивается электронным реле времени, включаемым в начале осадки. Иногда при сварке деталей большого сечения целесообразно в процессе оплавления изменять напряжение (см. гл. III, § 6). Это наиболее просто осуществляется при включении сварочного трансформатора игнитронным контактором с управляемым поджиганием игнитронов. Возможно ступенчатое изменение напряжения при поочередном включении трансформатора двумя электромагнитными контакторами на двух различных ступенях.

Автоматизация сварки оплавлением с подогревом обычно основана на том, что возвратно-поступательное движение подвижного зажима машины (при подогреве), сопровождаемое кратковременными короткими замыканиями нагреваемых деталей, автоматически переходит в непрерывное поступательное движение (при оплавлении) в тот момент, когда подогрев деталей оказывается достаточным для поддержания непрерывного оплавления при заданной его скорости. Такая автоматизация осуществляется с помощью реле напряжения, катушка которого подключена к электродам машины. Если подвижной зажим *1* (фиг. 151) перемещается влево со скоростью, превышающей в данный момент возможную скорость оплавления, то торцы деталей *2* дойдут до упора. При этом напряжение между электродами резко снизится и катушка реле напряжения РН разомкнет его н. о. контакты РН1 и замкнет н. з. контакты РН2. Двигатель *Д* (или другой привод)

окажется включенным пускателем Н, и зажим *1* начнет перемещаться вправо (назад) до тех пор, пока контакт между деталями *2* не нарушится. В этот момент на катушке РН появится напряжение холостого хода, реле сработает и вновь переключит привод на сближение свариваемых деталей пускателем В. Как только возможная скорость оплавления достигнет скорости перемещения зажима, сближение деталей не будет сопровождаться коротким замыканием, реле РН останется включенным, и двигатель будет непре-



Фиг. 151. Схема автоматизации стыковой сварки оплавлением с подогревом.

рывно перемещать систему влево, оплавление продолжится до начала осадки.

Эта система имеет существенные недостатки: степень подогрева зависит от напряжения в сети и от точности торцовки свариваемых деталей. При пониженном напряжении и заданной скорости перемещения зажима переход от подогрева к оплавлению происходит при более высокой температуре, чем в случае номинального напряжения, — детали перегреваются; наоборот, при случайном повышении напряжения сети оплавление начинается при относительно холодных деталях. В обоих случаях качество сварки может ухудшаться.

Непараллельность торцов ведет к неравномерному подогреву и к резкому снижению его температуры из-за возбуждения оплавления на части сечения деталей при относительно низкой температуре. При большом перекосе торцов оплавление может возбудиться на холодных деталях, и сварка, нормально рассчитанная на определенную степень подогрева, окажется плохой. Поэтому иногда сварка с подогревом автоматизируется по жесткой программе: заданное количество импульсов подогрева определенной продолжительности, чередующихся со строго ограниченными паузами, сопровождается принудительным переходом к оплавлению. В этом случае подогрев управляется регулятором времени, а по окончании подогрева, как правило, уменьшается скорость перемещения

подвижного зажима, чем гарантируется безотказное возбуждение оплавления.

Из-за относительной сложности автоматизации сварки с подогревом и недостаточной стабильности ее результатов машины средней мощности (до 250 *ква*) работают по полуавтоматической схеме: управление подогревом не автоматизировано и производится сварщиком, а оплавление и осадка осуществляются автоматически по жесткой программе.

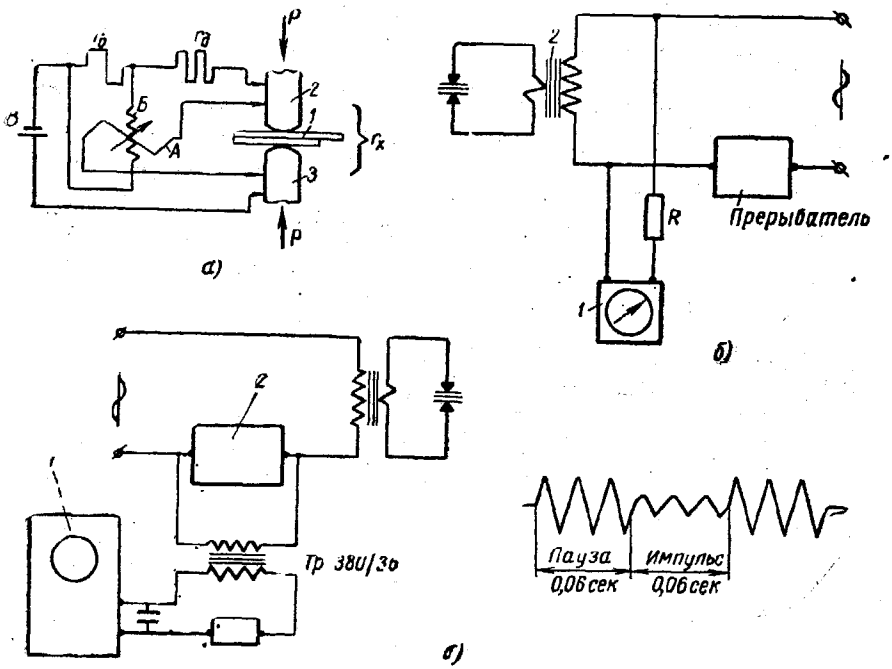
§ 7. КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

При контактной сварке, помимо универсальных приборов (например, вольтметров, осциллографов, манометров), применяется ряд специальных измерительных приборов: микроомметры для измерения малых сопротивлений и оценки этим путем качества подготовки поверхности деталей под сварку и состояния контактов сварочной машины; электросекундомеры для измерения продолжительности коротких импульсов сварочного тока; специальные амперметры для измерения этого тока; динамометры для измерения усилий, развиваемых между электродами.

Микроомметр (М246) имеет две рамки (*А* и *Б*), жестко связанные между собой (фиг. 152, *а*) и вращающиеся в зазоре между полюсами постоянного магнита. Детали *1*, сопротивление r_x которых должно быть измерено, зажимаются заданным усилием P (обычно 250 *кГ*) между электродами *2* и *3* специального приспособления. Сопротивление r_x включается последовательно с эталонным сопротивлением r_0 и добавочным сопротивлением $r_д$, ограничивающим ток в приборе, в цепь батареи *В* (возможно и непосредственное питание прибора от сети переменного тока). Ток в рамке *А*, включенной параллельно r_x, пропорционален этому сопротивлению. Ток в рамке *Б* пропорционален сопротивлению r_0. Рамки *А* и *Б* подключены так, чтобы токи в них вращали систему в противоположных направлениях. Результирующее отклонение системы пропорционально отношению $\frac{r_x}{r_0}$. Прибор проградуирован в омах. Микроомметром можно измерять и омическое сопротивление сварочной машины.

Продолжительность импульсов тока более 0,1 сек. достаточно точно измеряется электросекундометром *1* (например, ПВ-52), включенным параллельно сварочному трансформатору *2* через добавочное сопротивление R (фиг. 152, *б*). Более короткие импульсы измеряются по осциллограммам тока или подсчетом числа его полупериодов на экране катодного осциллографа с трубкой длительного послесвечения. В последнее время созданы счетчики импульсов (СИ-1), использующие декатронные лампы. Для измерения продолжительности импульса и паузы на роликовых машинах переменного тока катодный осциллограф *1* (фиг. 152, *в*) присоеди-

няется к вторичной обмотке вспомогательного трансформатора 380/36 *в*, первичная обмотка которого включена параллельно прерывателю *2*. При работе прерывателя на экране осциллографа появляется развертка с чередующимися участками, имеющими большую и малую амплитуду. Первый соответствует паузе (игнитроны не горят и напряжение между их катодом и анодом равно сетево-



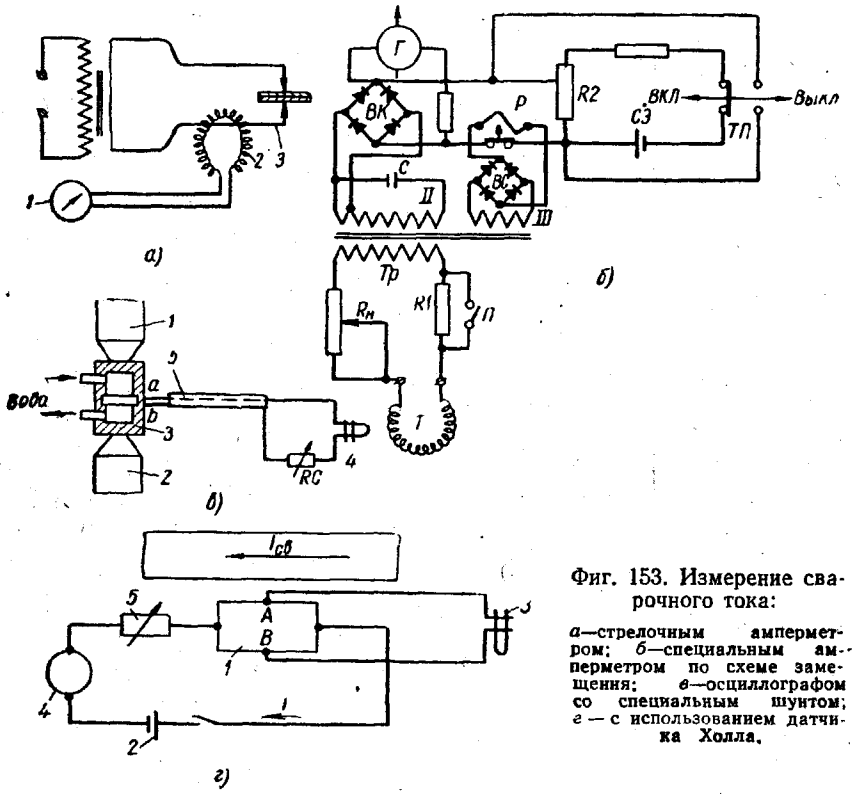
Фиг. 152. Схемы измерения:

а—сопротивления свариваемых деталей микроомметром М246; *б*—продолжительности сварочного импульса тока электросекундомером; *в* — продолжительности импульсов и пауз при роликовой сварке (катодным осциллографом).

му), второй — сварочному импульсу (напряжение на игнитронах снижается до 15—18 *в*). Наличие отдельных полупериодов с большой амплитудой на втором участке указывает на нечеткую работу прерывателя (пропуск в зажигании игнитронов).

Измерение тока при контактной сварке часто усложняется из-за малой длительности импульса и несинусоидальной кривой тока. В простейшей схеме, пригодной для измерения синусоидального тока при импульсах более 0,08 сек., используется обычный стрелочный амперметр *1* с регулируемым обратным упором. Прибор присоединяется к трансформатору тока в виде тороида *2*, надетого на хобот *3* сварочной машины (фиг. 153, *а*). Перед измерением тока

стрелка амперметра устанавливается упором в положение, соответствующее ожидаемому току. Если при сварке стрелка отбрасывается от упора, то фактический ток превышает ожидаемый, и упор переставляют в новое положение. Путем повторных включений подбирается положение упора, при котором в момент включе-



Фиг. 153. Измерение сварочного тока:

а—стрелочным амперметром; *б*—специальным амперметром по схеме замещения; *в*—осциллографом со специальным шунтом; *г* — с использованием датчика Холла.

ния тока стрелка только вздрагивает. Это положение дает приближенное значение измеряемого тока.

Более совершенный амперметр работает по схеме замещения (фиг. 153, *б*). Напряжение тороида *Т*, пропорциональное $\frac{dI}{dt}$, через реостат $R_н$ подается на трансформатор Тр. Его вторичная обмотка II с конденсатором С образует интегрирующий контур, напряжение в котором пропорционально не $\frac{dI}{dt}$, а сварочному току *I*. Это напряжение через выпрямитель ВК подается на гальванометр Г.

В паузах между импульсами сварочного тока на гальванометр подается напряжение от сухого элемента СЭ, снимаемое с потенциометра R2 через нормально закрытые контакты реле Р. Потенциометр устанавливается так, чтобы при отсутствии сварочного тока стрелка гальванометра стояла на нуле. При включенном сварочном токе напряжение на обмотке III трансформатора Тр возбуждает реле Р через выпрямитель ВС, и потенциометр R2 отключается от гальванометра. В это время гальванометр находится под напряжением выпрямителя ВК, пропорциональным измеряемому току. Во время паузы к гальванометру вновь подключается напряжение, снимаемое с потенциометра R2. Если средние напряжения, снимаемые с ВК и R2, одинаковы, то стрелка гальванометра остается на условном нуле. Это достигается регулировкой реостата $R_н$, проградуированного в амперах. Дополнительное сопротивление R1 вводится при разомкнутом переключателе П для расширения пределов измерения. Прибор имеет достаточную точность ($\pm 4\%$) для настройки обычных технологических процессов. Прибор включается кнопкой ТП.

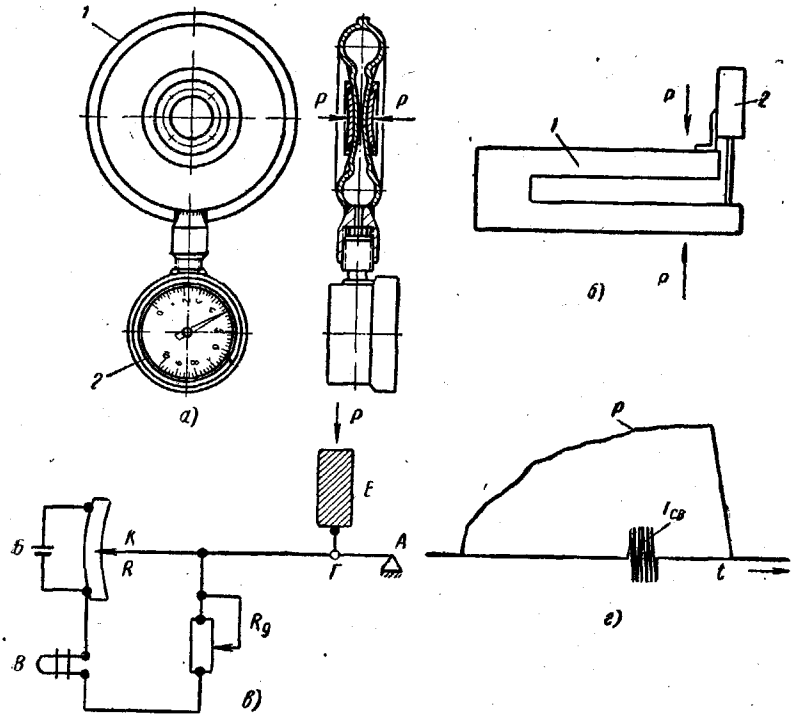
Этот же принцип использован в некоторых контрольных приборах, сигнализирующих при точечной или роликовой сварке о выходе фактической величины тока за установленные пределы. Такие приборы полезны при сварке особо ответственных изделий даже при стабилизации эффективного напряжения в первичной цепи, так как при $U_1 = \text{const}$ изменение сопротивления контура и свариваемых деталей (вследствие неодинаковой подготовки поверхности, введения в контур магнитного материала и др.) иногда приводит к недопустимым изменениям сварочного тока.

Полное представление о величине и форме кривой сварочного тока дает его осциллографирование. Чтобы не искажать кривой тока под влиянием индуктивности, необходимо применять шунт с большим отношением активного сопротивления к реактивному. При этом напряжение, снимаемое с шунта ($\Delta U \approx R_ш I_{св}$), пропорционально записываемому току и практически совпадает с ним по фазе. С этой целью между электродами *1* и *2* зажимается полый медный цилиндр *3* (фиг. 153, *в*) с местной выточкой малого сечения, обладающий относительно высоким активным сопротивлением.

Во избежание перегрева шунт изнутри охлаждается водой. Участок *ab* шунта соединяется с вибратором *4* осциллографа бифилярным кабелем *5*.

Сварочный ток можно записать осциллографом без специального шунта, используя прибор, разработанный ВНИИЭСО и основанный на принципе эффекта Холла. Рядом со сварочным контуром располагают германиевую пластинку *1* (фиг. 153, *г*), через которую протекает небольшой ток *I* от батареи *2*. Под действие магнитного поля, напряженность которого *H* пропорциональна току $I_{св}$ в сварочном контуре, между точками *A* и *B*

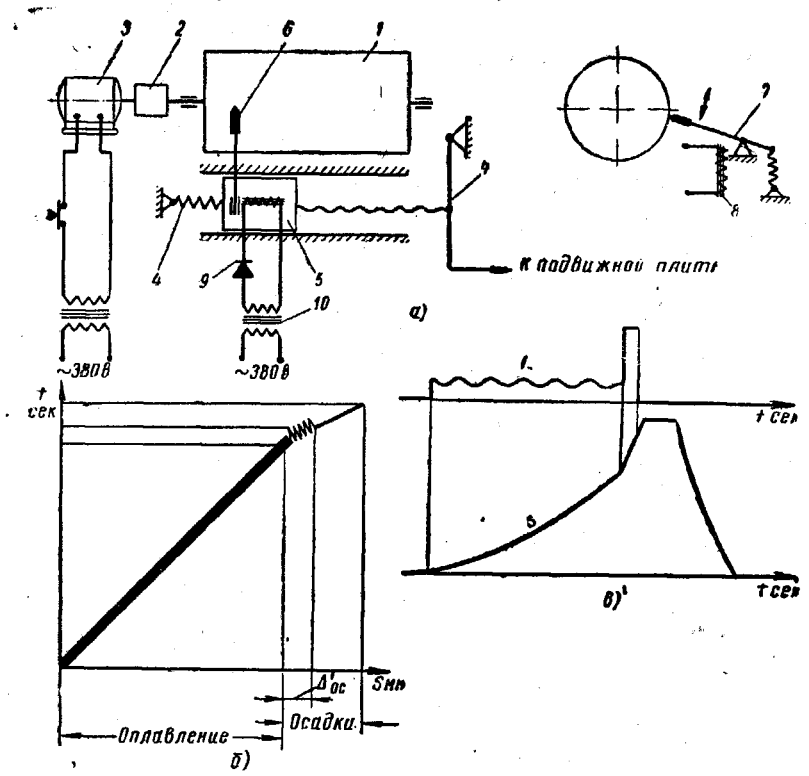
возникает э. д. с., пропорциональная произведению IH. Эта э. д. с. записывается вибратором *3* осциллографа и так как $I = \text{const}$, то ординаты получаемой осциллограммы пропорциональны сварочному току $I_{св}$ (ток *I* контролируется миллиамперметром *4* и устанавливается реостатом *5*). Датчик Холла можно использовать и для записи мощности. Для этого пластинка *1* через соответствующее сопротивление включается на напряжении U_2.



Фиг. 154. Измерение усилия на электродах:
а и *б* — статического, гидравлическим динамометром и пружинной скобой; *в* — динамического, осциллографированием прогиба нижнего хобота машины; *г* — осциллограмма усилия *P* и сварочного тока $I_{св}$.

Статические усилия на электроде измеряются гидравлическими или пружинными динамометрами. Гидравлический динамометр (фиг. 154, *а*) состоит из камеры-мембраны *1*, заполненной маслом, и манометра *2*. При нажатии на мембрану силы *P* ее величина отсчитывается по шкале манометра. При сжатии пружинного динамометра (фиг. 154, *б*) прогиб скобы *1*, пропорциональный усилию *P*, измеряется индикатором *2*, проградуированным в *кГ*. Динамические усилия осциллографируются, например, по схеме на фиг.

154, *в*. Рычаг *АК* в точке *Г* связан с нижним хоботом *Е*, а его точка *А* неподвижна. Прогиб хобота и поворот рычага пропорциональны *Р*. Конец рычага *К* перемещается по реохорду *R*, напряжение с ко-



Фиг. 155. Контроль процесса стыковой сварки:

а — схема прибора ГАЗа для записи перемещения подвижной плиты; *б* — запись процесса на приборе ГАЗа; *в* — запись тока (*I*) и перемещения (*s*) двухканальным прибором.

торого подают на вибратор осциллографа *В*. Через регулируемое сопротивление $R_д$ прибор питают батареей *Б*.

Одновременная запись усилия *Р* и тока $I_{св}$ (фиг. 154, *г*) позволяет установить фактическую величину усилия в момент включения тока и их взаимную синхронизацию (в частности, опережение или запаздывание ковочного давления по отношению к моменту выключения тока при точечной сварке).

При стыковой сварке полезны приборы, записывающие перемещение подвижной плиты при оплавлении и осадке. Один из таких приборов, разработанный на ГАЗе, имеет барабан *1* (фиг. 155, *а*) с бумажной лентой и с приводом через редуктор *2* от синх-

ронного двигателя *3*. Конец рычага *4* связан с подвижной плитой машины. При ее перемещении движется ползунок *5* с карандашом *6*. Карандаш укреплен на рычажке *7*, на который может воздействовать вибратор *8*, подключенный через выпрямитель *9* и трансформатор *10* к первичной обмотке сварочного трансформатора. При включенном токе карандаш прибора вычерчивает на барабане график перемещения плиты с зубчиками, полученными в результате вибрации карандаша (фиг. 155, *б*). По графику определяются величины и скорости оплавления и осадки, а также величина осадки под током (Δ'_{oc}). Более полная картина процесса сварки оплавлением получается при его записи двухканальным прибором ВНИИСТа, в котором на ленте синхронно записываются графики перемещения плиты и тока (фиг. 155, *в*). Запись тока позволяет приближенно оценить устойчивость процесса оплавления.

ГЛАВА XI

ИМПУЛЬСНЫЕ СХЕМЫ ПИТАНИЯ

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СХЕМ

Импульсными называются схемы питания, в которых энергия, потребляемая из сети переменного тока, расходуется на сварку не непосредственно (через понизительный трансформатор), а преобразуется в импульс тока специальной формы. В ряде импульсных схем потребление и расходование энергии не совпадают по времени. Энергия из сети сначала накапливается в одном из элементов схемы, а затем отдается в сварочную цепь; сварка осуществляется запасенной энергией. Главное ее преимущество состоит в том, что необходимая для сварки порция энергии забирается из сети медленно (т. е. при потреблении малой мощности), а расходуется быстро при технологически оптимальной мощности. Накопление энергии возможно в электростатическом поле конденсаторов, в электромагнитном поле трансформатора, в виде кинетической энергии вращающегося маховика специального генератора, в виде химической энергии аккумуляторов и др. Очень широко применяется точечная (а также роликовая и стыковая) конденсаторная сварка деталей малого сечения вследствие относительной простоты схемы и возможности строгого дозирования количества энергии, расходуемой на выполнение каждой сварочной операции при очень малой продолжительности импульса сварочного тока. Иногда применяется также конденсаторная точечная сварка деталей из легких сплавов толщиной более 1—1,5 *мм* и рельефная сварка трубчатых узлов (например, узлов велосипедной рамы). В этих случаях, помимо точного дозирования энергии, важна возможность ее накопления в конденсаторах с потреблением из сети небольшой мощности.

При точечной и роликовой сварке деталей из легких сплавов толщиной более 1—1,5 *мм* широко применяется синхронное преобразование энергии сети в специальный сварочный импульс (без ее накопления в схеме) с питанием сварочного трансформатора импульсом выпрямленного трехфазного тока. Вследствие индуктивности системы ток в первичной обмотке сварочного трансформатора при его включении на постоянное напряжение выпрямителя нарастает постепенно. При этом во вторичной обмотке трансфор-

матора индуктируется импульс плавно нарастающего тока (см. фиг. 158, *б*), форма которого благоприятна при сварке легких сплавов. Эта схема имеет энергетические преимущества, особенно существенные при потреблении большой мощности для сварки легких сплавов: равномерно загружается трехфазная сеть, отсутствуют пики мощности в момент включения, достигается высокий $\cos\varphi$ (вследствие малого индуктивного сопротивления контура при питании импульсом выпрямленного тока). Возможно и непосредственное питание сварочной цепи импульсом постоянного тока через полупроводниковый выпрямитель, включенный после понизительного трансформатора. Применение этой простой схемы затрудняется громоздкостью выпрямителей, которые в этом случае должны быть рассчитаны на большой сварочный ток.

§ 2. СХЕМЫ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИН

Существуют две схемы конденсаторной сварки: бестрансформаторная и с понизительным трансформатором. В бестрансформаторной схеме (фиг. 156, *а*), применяемой для стыковой сварки, батарея конденсаторов $C_1 — C_3$ после ее зарядки от генератора Г (или от сети через выпрямитель) ключом К непосредственно присоединяется к свариваемым деталям *1*. При их быстром сближении пружиной *2* (со скоростью 1,5—2 *м/сек*) конденсаторы разряжаются. Протекающий в сварочной цепи кратковременный импульс тока [длительностью $(4—10)\cdot 10^{-4}$ сек.] оплавляет торцы деталей, которые осаживаются и свариваются встык. В этой схеме зарядное напряжение достигает 1500 *в*, а емкость конденсаторов 1000 *мкф* и более.

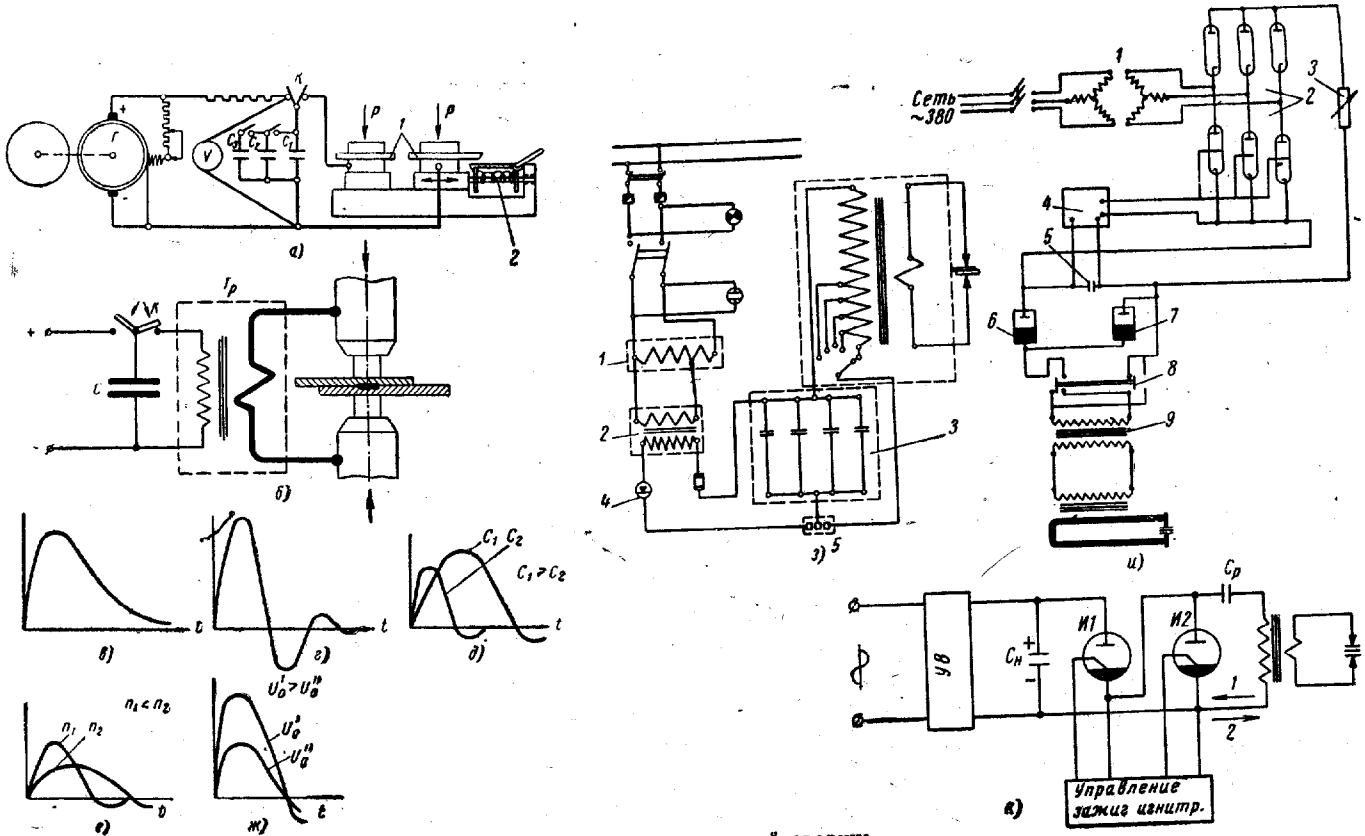
Применение высокого зарядного напряжения целесообразно потому, что количество энергии $W_к$, накапливаемой в конденсаторах, пропорционально квадрату напряжения

$$W_к = \frac{CU^2}{2} \qquad (104)$$

и при заданном $W_к$ с увеличением U быстро понижается необходимая емкость конденсаторов С.

Бестрансформаторная схема непригодна для точечной и роликовой сварки. Для того чтобы при малом сопротивлении деталей, зажатых между электродами, в зоне сварки выделилось достаточное количество тепла, требуется значительной ток при низком напряжении. Это достигается разрядом конденсаторов через понизительный сварочный трансформатор Тр (фиг. 156, *б*). При левом положении ключа К конденсаторы С заряжаются из сети, при правом разряжаются через трансформатор Тр в сварочную цепь.

В зависимости от электрических параметров трансформатора и сварочного контура разряд конденсаторов может быть апериоди-



Фиг. 156. Схемы конденсаторной сварки:

(*а*—без сварочного трансформатора; *б*—со сварочным трансформатором; *з* — при однофазном включении; *и*—при трехфазном включении) и кривые тока (*в* и *г*—апериодический и колебательный разряды конденсаторов; *д*, *е* и *ж*—зависимость кривой тока от емкости конденсаторов, коэффициента трансформации и зарядного напряжения); *к* — схема с накопительным конденсатором для роликовой сварки.

ческим (фиг. 158, *в*) или колебательным (фиг. 156, *г*). Первый наблюдается при

$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \qquad (105)$$

Второй при

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \qquad (106)$$

где R и L — омическое сопротивление (R_2) и индуктивность (L_2) сварочной цепи, приведенные к первичной цепи трансформатора ($R = n^2R_2$ и $L = n^2L_2$; n — коэффициент трансформации);

C — емкость конденсаторов.

В сварочных машинах соотношение R, L и C обеспечивает колебательный разряд, при котором основная часть накопленной энергии отдается концентрированно в течение первой полуволны. Иногда при большом сопротивлении свариваемых деталей колебательный разряд переходит в апериодический. При колебательном разряде в системе с идеальным трансформатором мгновенное значение сварочного тока равно

$$i_2 = \frac{nU_0}{\omega_0 L} e^{-\frac{b}{t}} \sin \omega_0 t, \qquad (107)$$

где U_0 — начальное напряжение на конденсаторе;

$b = \frac{R}{2L}$ — постоянная времени;

ω_0 — угловая частота;

n — коэффициент трансформации;

t — время.

Как следует из уравнения (104), $W_к$ можно регулировать изменением емкости включенных конденсаторов или зарядного напряжения. Форма и длительность импульса тока практически регулируется трояко: а) изменением емкости (при $C_1 > C_2$ растет максимальный ток и увеличивается длительность полуволны, фиг. 156, *д*); б) изменением коэффициента трансформации n (при $n_1 < n_2$ увеличивается максимальный ток и за счет этого уменьшается длительность импульса, фиг. 156, *е*, так как количество энергии, накопленной в конденсаторах и отдаваемой в сварочную цепь, от n не зависит) и в) изменением напряжения U_0 (максимальный ток пропорционален U_0, а длительность импульса от U_0 не зависит, фиг. 156, *ж*). Форма кривой тока зависит также от R и L, однако эти величины технологически не регулируются.

Конденсаторные машины малой мощности питаются по однофазной схеме (фиг. 156, *з*) через регулировочный автотрансформатор *1* и повысительный трансформатор *2*. Зарядный ток конденсаторов *3*

выпрямляется селеновым выпрямителем *4* (как показано на схеме) или ламповым выпрямителем. В зависимости от положения переключателя *5* происходит зарядка или разрядка конденсаторов. Потребляемая при зарядке мощность этих машин редко превышает 80—100 *вт*.

Мощные конденсаторные машины питаются от трехфазной сети (фиг. 156, *и*) через повысительный трансформатор *1* (380/3000 *в*), двухполупериодный ламповый выпрямитель *2*, регулируемое зарядное сопротивление *3* (определяющее продолжительность зарядки), регулятор напряжения *4*, ограничивающий напряжение на конденсаторах (для ускорения зарядки ее всегда приостанавливают напряжение выпрямленного тока). Батарея конденсаторов *5* (емкостью 2000—3000 *мкф*) при сварке разряжается перез игнитрон *6* непосредственно на сварочный трансформатор или через промежуточный трансформатор *9*, снижающий напряжение, подводимое к сварочной машине с 3000 *в* до 500—750 *в*. Вторая полуволна тока при колебательном разряде шунтируется через игнитрон *7*. Во избежание одностороннего повторного намагничивания трансформатора после каждой сварки переключатель *8* изменяет направление импульса разрядного тока.

Энергия, накопляемая при $C = 2000$ *мкф* и $U_0 = 3000$ *в*, составляет 9 *квт · сек*. При потреблении из сети 40—60 *ква* время зарядки не превышает 0,8 сек. и производительность машины достигает 40—50 точек в минуту. Максимальное значение тока (до 70 000 *а*) в мощных машинах достигается через 0,005—0,03 сек. от начала разряда.

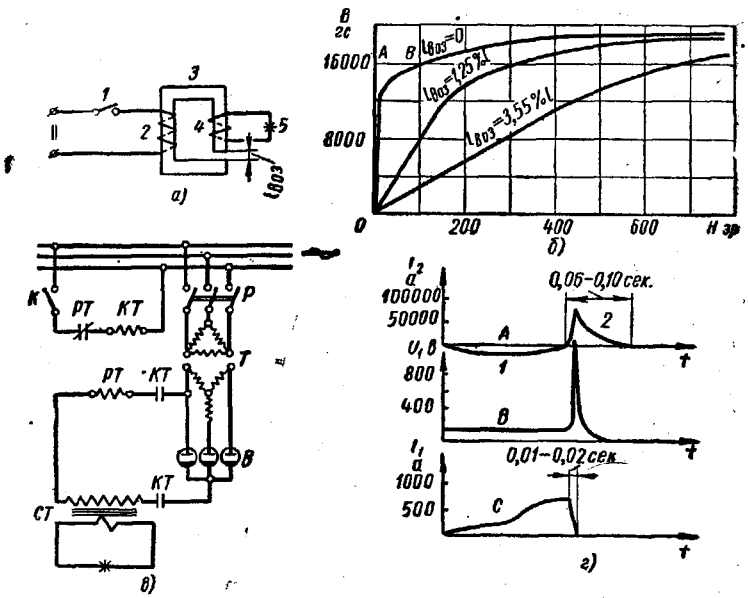
Применение конденсаторных точечных машин большой мощности очень ограничено из-за дороговизны высоковольтных конденсаторов, технических затруднений при использовании очень высокого напряжения и, наконец, вследствие технологически не вполне благоприятной формы быстро нарастающего импульса сварочного тока.

При сварке втавр труб емкость конденсаторов достигает 7000 *мкф*, а накапливаемая в них энергия 45—50 *квт · сек*. Конденсаторная схема применяется и для роликовой сварки при непрерывной или шаговой подаче свариваемых деталей. При этом в секунду осуществляется 20—50 циклов «зарядка — разряд», управляемых специальной электронной схемой. При такой частоте импульсов схема стабилизации напряжения не успевает срабатывать и колебания напряжения сети вызывают значительные изменения количества энергии, накапливаемой и отдаваемой конденсатором в каждом сварочном импульсе; создаются условия для нестабильного качества сварки. Во ВНИИЭСО разработана схема (фиг. 156, *к*), в которой энергия непрерывно запасается в накопительном конденсаторе $C_н$ относительно большой емкости через управляемый выпрямитель УВ, поддерживающий стабилизированное напряжение. Из $C_н$ энергия небольшими порциями поступает в рабочий конденсатор $C_р$.

Отношение $\frac{C_н}{C_р}=10\div15$. При зарядке рабочего конденсатора включается игнитрон И1, а при его разрядке игнитрон И2. Таким образом, и зарядный, и разрядный токи конденсатора $C_р$ используются для сварки. При этом достигается симметричная работа сварочного трансформатора (ток поочередно протекает по стрелкам *1* и *2*), что устраняет одностороннее намагничивание его сердечника.

§ 3. СВАРКА ЭНЕРГИЕЙ, НАКОПЛЕННОЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Если ключом *1* присоединить к источнику постоянного тока первичную обмотку *2* трансформатора (фиг. 157, *а*), то через нее потечет ток, постепенно увеличивающийся от нуля до своего устано-



Фиг. 157. Схемы машин для сварки энергией магнитного поля (*а*, *б*), кривые намагничивания при различных зазорах в магнитопроводе (*в*) и кривые тока и напряжения при сварке энергией магнитного поля (*г*).

вившегося значения. При этом в сердечнике *3* создается магнитное поле. Вторичная обмотка *4* замкнута на свариваемые детали *5*. Если теперь разомкнуть цепь обмотки *2*, то энергия, ранее затраченная на создание магнитного поля, возвращается в систему, так как при размыкании цепи магнитное поле исчезает и его энергия снижается до нуля. Эта энергия в основном отдается в замкнутую сварочную цепь, однако некоторая ее часть (не менее 20%) обязательно возвращается в первичную цепь. Чем медленнее разры-

вается эта цепь, тем больше потери в ней энергии. Сущность процесса состоит в том, что при отключении трансформатора постепенно исчезающий в сердечнике магнитный поток индуктирует в обеих его обмотках э. д. с., создающие в них токи.

Энергия магнитного поля равна

$$W_м = \frac{LI^2}{2} = \frac{10^{-8}}{0{,}4\pi} V \int_0^B HdB, \qquad (108)$$

где I — максимальный намагничивающий ток в первичной обмотке трансформатора в *а*;

L — индуктивность этой обмотки в генри;

V — объем сердечника в *см*^{3};

H — напряженность магнитного поля в эрстедах;

B — индукция в *гс*.

Легко показать, что площадь OAB на диаграмме намагничивания (фиг. 157, *б*) равна $\int_0^B HdB$. Энергия $W_м$ увеличивается при наличии в сердечнике воздушного зазора $l_{воз}$.

В обычном сердечнике при $l_{воз} \approx 0$ вследствие малой L удельная мощность магнитного поля мала (0,0018 *вт · сек/сек*^{3}). Для накопления в нем 20 *квт · сек*, необходимых для точечной сварки дуралюмина толщиной 4 *мм*, потребовался бы сердечник весом более 80 000 *кг*. Наибольшая удельная мощность поля (около 0,045 *вт · сек/см*^{3}) достигается при $l_{воз} \approx 0{,}03\, l_м$ ($l_м$ — средняя длина магнитопровода). При этом сердечник весом 3000 *кг* может отдать в сварочную цепь энергию до 14 *квт · сек*. Иногда для увеличения энергии, накапливаемой в системе, последовательно со сварочным трансформатором включается специальный дроссель, сердечник которого также имеет воздушный зазор.

Принципиальная схема машины для сварки энергией магнитного поля показана на фиг. 157, *в*. При замыкании ключа К контактор КТ подключает сварочный трансформатор СТ (с воздушным зазором в сердечнике) к выпрямителю В, питающемуся через трансформатор Т от трехфазной сети. Ток в первичной обмотке СТ и магнитный поток в его сердечнике нарастают постепенно в течение 0,5—0,8 сек. (кривая С, фиг. 157, *г*). При этом в замкнутой сварочной цепи индуктируется незначительный ток *1* (кривая *А*, фиг. 157, *г*). По достижении первичным током заданного значения, определяющего количество энергии, накопленной в магнитном поле [см. уравнение (108)], срабатывает реле тока РТ, быстро отключающее сварочный трансформатор. При этом возникает кратковременный импульс сварочного тока *2* (кривая *А*, фиг. 157, *г*). Обычно выпрямленное напряжение для питания сварочного трансформатора не превышает 150—160 *в*. Однако в момент отключения оно мгновенно растет до 1000—1500 *в* (кривая *В*, фиг. 157, *г*). Для быстрого раз-

рыва первичной цепи применяют специальные быстродействующие контакторы с выдуванием дуги струей сжатого воздуха. Главный недостаток рассматриваемой машины, ограничивающий ее применение, — зависимость количества энергии, непосредственно потребляемой на сварку и, как следствие, степени провара от работы выключающего устройства, определяющей потери энергии магнитного поля в первичную цепь.

Разработаны, но пока не применяются схемы с накоплением энергии в маховике. Сварочный трансформатор такой машины питается однофазным генератором, сидящим на одном валу с трехфазным двигателем и тяжелым маховиком. В интервале между сваркой число оборотов системы поднимается до номинального, а при включении сварочного трансформатора резкому торможению системы препятствует маховик, частично отдающий накопленную в нем энергию. Мощность, отдаваемая на сварку, может в 4—5 раз превышать потребляемую из сети в интервалах между сваркой.

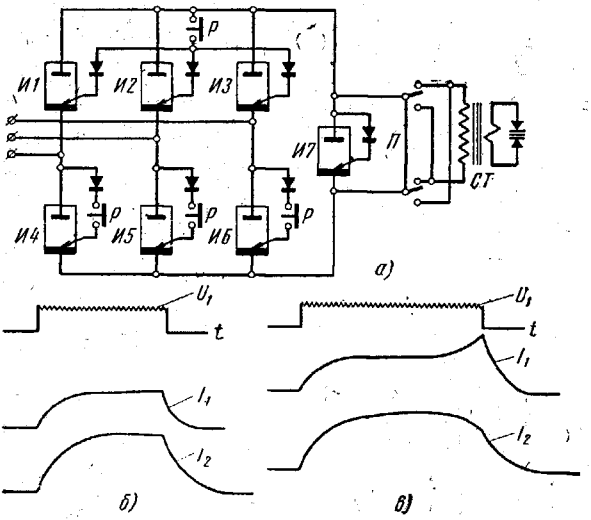
§ 4. СХЕМА СВАРКИ ИМПУЛЬСОМ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА

В этой схеме трехфазный ток через выпрямитель, собранный из шести игнитронов И1 — И6 (фиг. 158, *а*), поступает в первичную обмотку сварочного трансформатора СТ. Продолжительность импульса регулируется временем включения реле Р, управляющего поджиганием игнитронов. Игнитрон И7 шунтирует трансформатор и поглощает энергию, отдаваемую магнитным полем трансформатора в момент отключения тока. Переключатель П после каждой сварки изменяет направление тока в трансформаторе с тем, чтобы избежать насыщения его сердечника при повторном намагничивании в одном направлении. При нормальной продолжительности импульса (до 0,2—0,4 сек.) кривые тока имеют вид, показанный на фиг. 158, *б*. Чрезмерное его удлинение приводит к резкому увеличению тока I_1 и понижению сварочного тока (фиг. 158, *в*). В пределе $I_{1.\max} = \frac{U_1}{R_1}$ (R_1 — омическое сопротивление первичной цепи трансформатора) и $I_2 = 0$.

Эта схема имеет ряд достоинств, особенно важных при сварке легких сплавов. Плавное нарастание импульса тока уменьшает перегрев в контакте электрод — деталь, что сохраняет хорошую поверхность деталей и замедляет износ электродов. Равномерная загрузка трехфазной сети без пика в момент включения упрощает использование мощных машин (иногда до 1000 *ква*). При относительно медленном нарастании тока, соответствующем частоте $f = 1—2$ *гц*, индуктивное сопротивление сварочного контура $X_L = 2\pi fL$ мало. Поэтому машины с большим контуром, необходимые для сварки крупных узлов, при питании импульсом выпрямленного тока имеют высокий $\cos\varphi$ и умеренную мощность. Так как согласно уравнению (84) сечение сердечника обратно пропорцио-

нально частоте f, в машинах этого типа сердечник и весь трансформатор имеют большие размеры и вес. Импульсные машины типа МТПТ и МТИП выпускаются мощностью от 300 до 1000 *ква* при сварочном токе, достигающем 200 000 *а*.

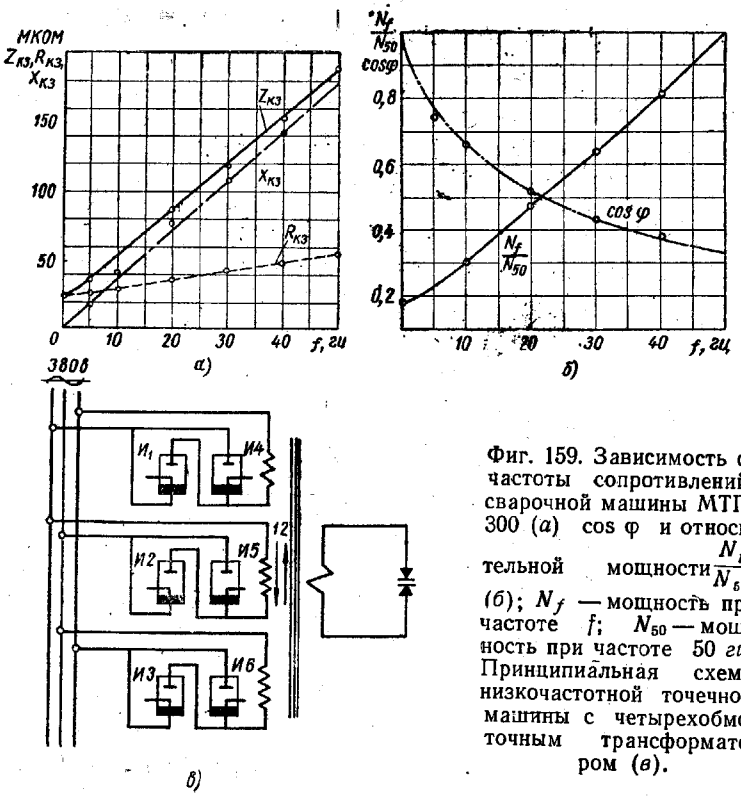
Точечная сварка стали большой толщины может успешно производиться на машинах пониженной частоты (3—5 *гц*), в которых



Фиг. 158. Схема машины для сварки импульсом выпрямленного тока (*а*) и кривые напряжения и токов при нормальной (*б*) и чрезмерной (*в*) продолжительности сварочного импульса.

в первичную обмотку сварочного трансформатора подаются чередующиеся по направлению импульсы выпрямленного тока, в результате чего в его первичной и вторичной обмотках индуктируются импульсы тока низкой частоты (см. фиг. 92, *б*). Эти машины имеют такие же преимущества, как описанные выше одноимпульсные машины для сварки легких сплавов. С уменьшением частоты снижается активное сопротивление машины $R_{кз}$ (фиг. 159, *а*) и резко уменьшается ее индуктивное и общее сопротивление ($X_{кз}$ и $Z_{кз}$). В результате этого растет cos φ и уменьшается потребляемая при сварке мощность (фиг. 159, *б*). При сварке стали на низкочастотных машинах введение в их контур тяжелых элементов почти не сказывается на сопротивлении контура и, как следствие, не влияет на электрические параметры процесса сварки. В современных низкочастотных машинах применяются трехфазно-однофазные сварочные трансформаторы с непосредственным включением (через три пары игнитронов) в трехфазную сеть (фиг. 159, *в*). При поджигании игнитронов И1 — И3 в трансформаторе протекает им-

пульс выпрямленного тока по стрелке *1*; при возбуждении игнитронов И4 — И6 направление тока изменяется, и он протекает по стрелке *2*.



Фиг. 159. Зависимость от частоты сопротивлений сварочной машины МТП-300 (*а*) cos φ и относительной мощности $\frac{N_f}{N_{50}}$ (*б*); N_f — мощность при частоте f; N_{50} — мощность при частоте 50 *гц*. Принципиальная схема низкочастотной точечной машины с четырехобмоточным трансформатором (*в*).

Импульсы выпрямленного тока, чередующиеся по направлению, успешно используются в машинах с шаговой подачей для роликовой сварки деталей толщиной более 1—1,5 *мм* из легких сплавов (машина МШШИ-400 и др.).

ГЛАВА XII

СТЫКОВЫЕ МАШИНЫ

§ 1. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ

На стыковой машине выполняются следующие операции: установка и закрепление свариваемых деталей зажимами и иногда упорами, их перемещение приводом подачи при подогреве, оплавлении и осадке, нагрев деталей током.

Как правило, все основные узлы машины устанавливаются на станине, снабженной направляющими, в которых перемещается подвижная плита с укрепленным на ней подвижным зажимом (см. фиг. 10).

Машины для стыковой сварки классифицируются:

1) по приводу подачи: рычажные, пружинные, пневматические, гидравлические, с электроприводом, с комбинированным приводом (например, рычажным при подогреве и электрическим — при оплавлении и осадке);

2) по роду действия: неавтоматические, автоматические и полуавтоматические (подогрев ведется неавтоматически, оплавление и осадка — автоматически);

3) по назначению: общего назначения и специализированные (например, машины для сварки широких листов).

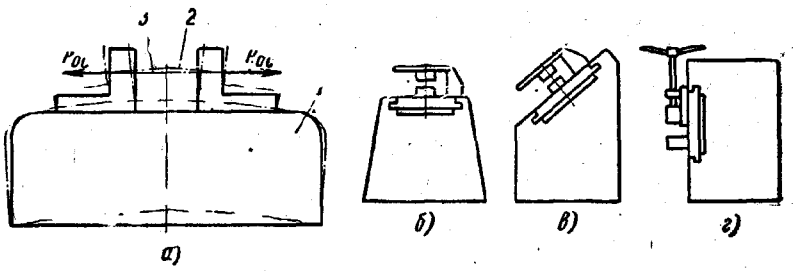
Неавтоматические машины пригодны как для сварки сопротивлением, так и для сварки оплавлением (с подогревом или без подогрева).

Автоматические машины бывают трех основных типов: а) для сварки сопротивлением (обычно мощностью до 10 *ква*); б) для сварки непрерывным оплавлением и в) для сварки оплавлением с подогревом, иногда допускающие и сварку непрерывным оплавлением. В этих машинах, как правило, автоматизирован только сварочный процесс, а установка, закрепление и съем свариваемых деталей не автоматизированы. В массовом производстве (сварных заготовок инструмента, котельных змеевиков, деталей автомобиля и др.) должны найти применение стыковые машины-автоматы с полной автоматизацией цикла, начиная с подачи исходных заготовок из бункера или с конвейера и кончая съемом с машины сваренных деталей. Такие автоматы уже применяются в производстве цепей, заготовок клапанов и др.

Стыковые машины обычно маркируются тремя буквами, например, МСР, МСГ, МСМ, МСТ, МСЛ. Третья буква указывает на род привода (Р — рычажный, Г — гидравлический, М — моторный), а в специализированных машинах — на их назначение (Т — машина для сварки труб; Л — машина для сварки ленты).

§ 2. СТАНИНЫ, НАПРАВЛЯЮЩИЕ И ПЛИТЫ СТЫКОВЫХ МАШИН

На станине укрепляются все основные узлы машины. Усилие осадки, превышающее в мощных машинах 100 *т*, обычно воспринимается станиной, которая должна быть достаточно прочной и

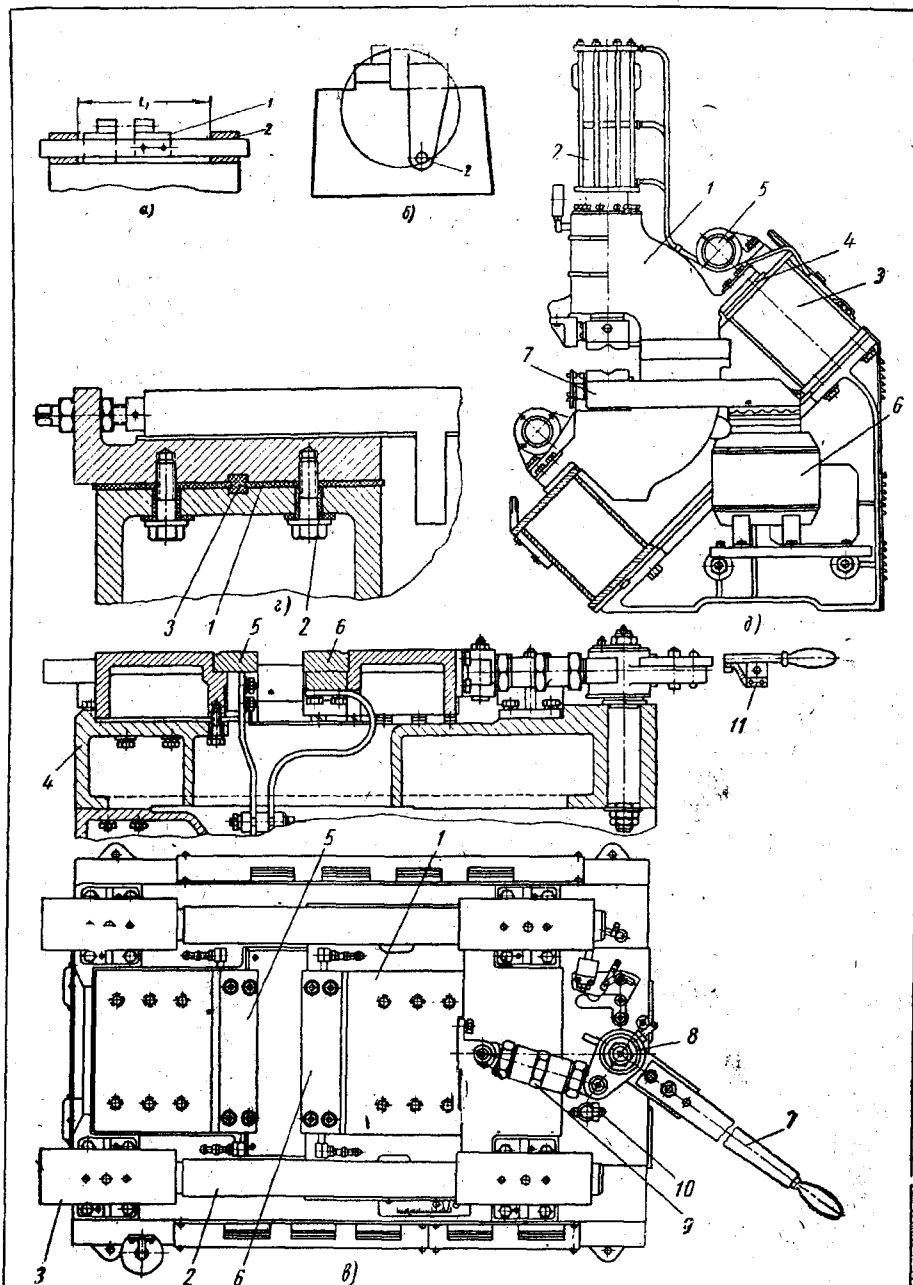


Фиг. 160. Деформация станины стыковой машины при осадке (*а*) и типы станин (*б — г*).

жесткой. Нежесткая станина заметно изгибается при осадке (фиг. 160, *а*) и нарушается соосность свариваемых деталей. Это иногда приводит и к трещинам в стыке. Укорочение зоны стыка при охлаждении, если оно идет до освобождения зажимов, приводит к падению усилия P_{oc} и возврату станины *1* в первоначальное положение. При этом сваренные детали изгибаются из положения *2* в положение *3*. Деформация станины часто используется для измерения тарированным индикатором фактических усилий осадки.

Стыковые машины имеют горизонтальный, наклонный или вертикальный стол (фиг. 160, *б—г*). Машины общего назначения мощностью до 150—200 *ква* выпускаются с горизонтальным столом. Наклонный стол несколько облегчает установку и съем свариваемых деталей и применяется в условиях массового производства на машинах мощностью 300—500 *ква*. Машины с вертикальным столом находят применение при сварке рельсов, толстостенных труб и других тяжелых деталей. Применяются чугунные или стальные (литые и сварные) станины. Часть станины (стол) с направляющими для подвижной плиты часто выполняется отдельно и крепится к собственно станине болтами. Это несколько упрощает механическую обработку станины.

Подвижная плита *1* с укрепленным на ней подвижным зажимом, как правило, перемещается прямолинейно в направляющих *2* (фиг. 161, *а*). Для уменьшения перекосов база направляющих L_1



Фиг. 161. Конструкция направляющих и плит стыковых машин.

в современных машинах делается по возможности длинной. Изредка при сварке колец подвижная плита *1* поворачивается вокруг оси *2* (фиг. 161, *б*). Стол стыковой машины средней мощности с направляющими, плитами и рычажным приводом показан на фиг. 161, *в*. Подвижная плита *1* крепится к жестким штангам *2* прямоугольного или круглого сечения. Эти штанги вместе с плитой перемещаются приводом в направляющих *3*, укрепленных на столе машины *4*. В плитах имеются отверстия для крепления зажимов и вырезы для бронзовых контактных колодок *5* и *6*. Плиты делают из чугуна или стали. Одна из плит (чаще неподвижная) электрически изолируется от стола и станины. Вариант изоляции текстолитовыми прокладками *1*, втулками *2* и шпонками *3* показан на фиг. 161, *г*.

В мощных машинах (например, МСГ-500) ползун *1* одновременно служит корпусом зажима *2* (фиг. 161, *д*). Неподвижная плита (зажим) крепится к жесткой коробчатой станине *3* через изоляцию *4*, а подвижная плита (зажим) крепится к круглым штангам — направляющим *5*; трансформатор *6* соединяется с нижними электрододержателями гибкими шинами *7*.

§ 3. ПРИВОД СТЫКОВЫХ МАШИН

Неавтоматические машины обычно имеют рычажный привод (см. фиг. 161, *в*). При повороте сварщиком коленчатого рычага *7* вокруг неподвижной оси *8* регулируемая по длине тяга *9*, шарнирно соединенная с рычагом и подвижной плитой *1*, перемещает ее в требуемом направлении. Поворот рычага ограничивается упором *10*.

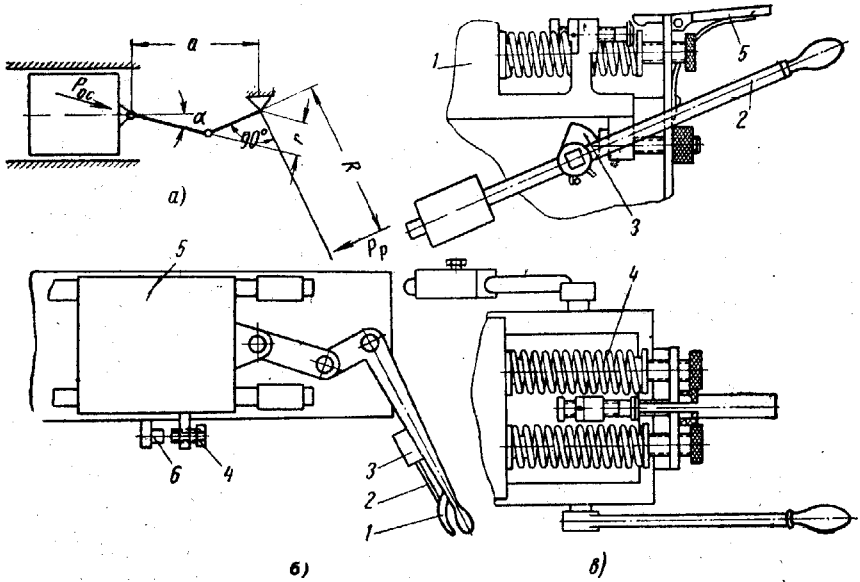
Если к концу рычага приложено усилие P_p (фиг. 162, *а*), то по условию равновесия ($\Sigma M_B = 0$) усилие осадки будет равно

$$P_{oc} = \frac{P_p R}{r} = \frac{P_p R}{a \sin \alpha} \qquad (109)$$

Отсюда следует, что P_{oc} растет с уменьшением угла α (при $\alpha = 0$, т. е. в мертвом положении рычагов теоретически $P_{oc} = \infty$). Реально достижимое усилие осадки в рычажной системе с ручным управлением не превышает 3000—4000 *кГ*. Ее достоинство — простота; недостатки — непостоянство развиваемого усилия, зависящего от P_p и α в момент осадки, относительно малая скорость осадки (до 15—20 *мм/сек*), утомляемость сварщика. Все это ограничивает применение рычажного привода машинами мощностью до 100 *ква*.

Рычаг одновременно используется для управления включением тока. При нажатии на рукоятку *1* включающего устройства (фиг. 162, *б*) тяга *2* замыкает контакт кнопки *3* (см. поз. *11* на фиг. 161, *в*), включающей сварочный трансформатор через магнитный

контактор. Контактор остается замкнутым и трансформатор включенным при нажатой рукоятке до тех пор, пока болт *4*, укрепленный на подвижной плите *5*, не разомкнет н. з. контакты конечного выключателя *6*, смонтированного на станине машины. Болт *4* регулируется так, чтобы отключение тока произошло автоматически после осадки на заданную величину. Без такого устройства каче-



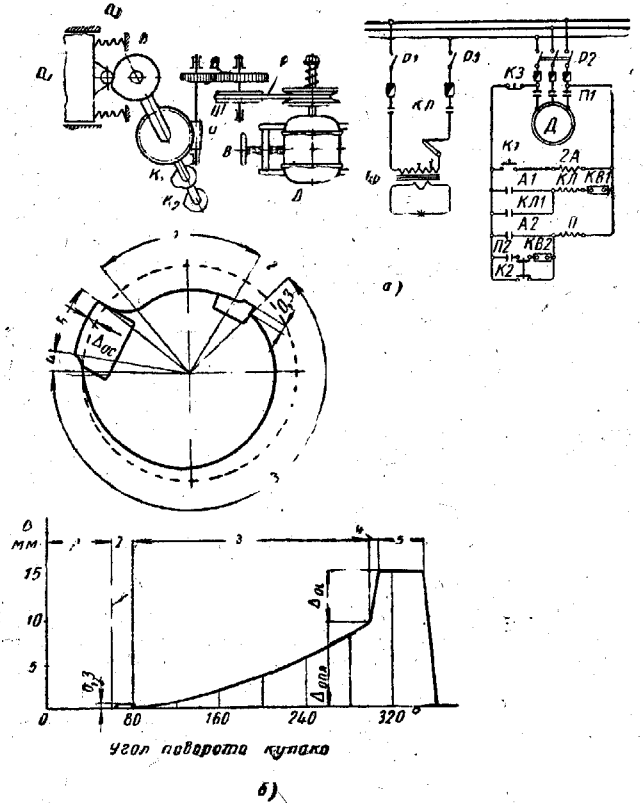
Фиг. 162. Рычажный и пружинный привод осадки стыковых машин:
а — силы, действующие в рычажном приводе; *б* — включающие устройства рычажного привода; *в* — конструкция пружинного привода.

ственная сварка оплавлением невозможна, так как при быстрой осадке не удается выключить сварочный ток «на глаз» в заданный момент. Величина осадки определяется положением рычагов в момент ее окончания и усилием, приложенным сварщиком.

В машинах для сварки сопротивлением обычно применяется пружинный привод. До закрепления свариваемых деталей подвижная плита *1* (фиг. 162, *в*) отводится в исходное положение рычагом *2* с эксцентриком *3*. При этом зажимаются пружины *4*, развивающие усилие 75—100 *кг*. Исходное положение плиты фиксируется защелкой *5*. После зажатия свариваемых деталей нажимается защелка и одновременно включается сварочный ток. По мере разогрева зоны сварки пружины сближают зажимы. При заданной деформации автоматически выключается ток. Усилие, развиваемое пружинным приводом, уменьшается к концу процесса, в то время как технологически желательно обратное. Этого недостатка нет в электромагнитном приводе, разработанном в Уральском по-

литехническом институте, в котором усилие, развиваемое магнитом, растет по мере его втягивания в катушку.

В автоматических машинах для сварки непрерывным оплавлением обычно применяется электропривод, а в мощных машинах — гидропривод. Простое решение дает моторно-кулачковый привод



Фиг. 163. Моторно-кулачковый привод стыковой машины:
а — кинематическая и электрическая схемы; *б* — профиль и развертка кулака.

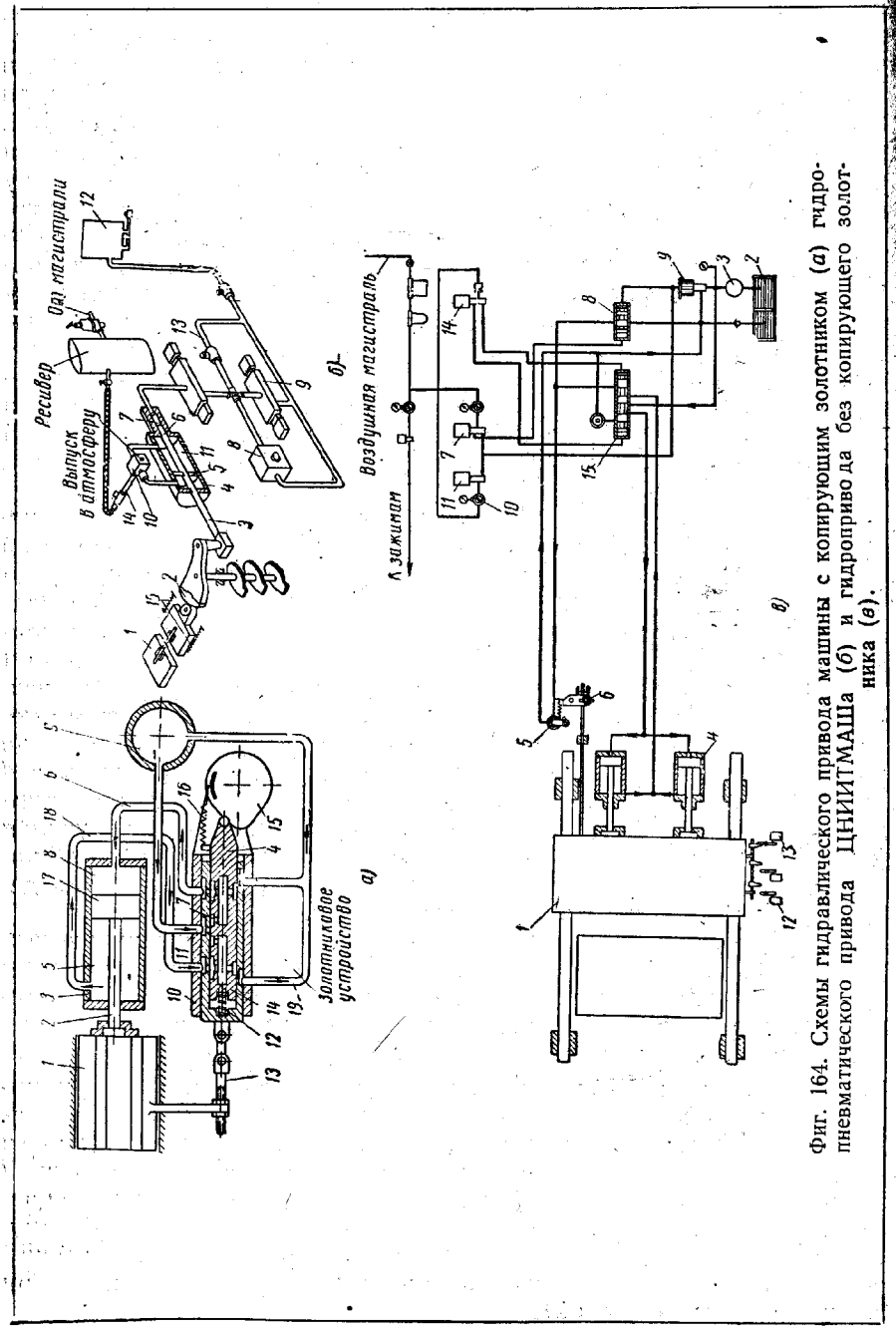
(фиг. 163, *а*). Подвижная плита машины Пл перемещается кулаком К, к которому она прижимается пружинами Пр. Его профиль соответствует заданным скоростям оплавления и осадки. Двигатель Д вращает кулак через червячный редуктор Ч, шестерни Ц и клиноременную передачу Р. Винтом В можно изменять межцентровое расстояние шкива Ш и двигателя Д. При этом плавно регулируется скорость вращения кулака К. Один его оборот соответствует полному циклу сварки. Включение и выключение сварочного тока, а также остановка двигателя Д синхронизируются с переме-

щением плиты. Для этого при заданном угле поворота кулака К вспомогательные кулачки $К_1$ и $К_2$ воздействуют на путевые включатели. После включения в начале работы рубильников Р1 и Р2 и зажатия свариваемых деталей нажимается кнопка К1. Контакты промежуточного реле А1 замыкают цепь катушки контактора КЛ, включающего сварочный трансформатор Тр и блокирующего себя контактами КЛ1. Одновременно контакты А2 включают катушку магнитного пускателя П, который контактами П1 включает двигатель Д, а контактами П2 блокирует себя. Сварочный ток остается включенным, пока вспомогательный кулачок не разомкнет контакты путевого включателя КВ1. В конце осадки двигатель останавливается путевым включателем КВ2, разрывающим цепь блокировки катушки пускателя П. После освобождения сваренных деталей система возвращается в исходное положение нажатием сдвоенной кнопки К2. Этой кнопкой включается пускатель и рвется цепь его блокировки; двигатель Д вращается только при нажатой кнопке К2. Нажатием аварийной кнопки К3 обесточиваются все цепи управления.

Профиль кулака К подбирают так, чтобы оплавление было непрерывным (см. гл. III, § 4), а осадка происходила с требуемой скоростью на заданную величину. Типовой кулак и его развертка показаны на фиг. 163, *б*. До начала сварки ролик подвижной плиты располагается на участке *1*. При работе кулак вращается против часовой стрелки. В начале сварки выступ *2* плотно обжимает холодные торцы свариваемых деталей, а затем несколько их разводит. Это необходимо для возбуждения оплавления. Затем, по мере вращения кулака, подвижная плита перемещается с постепенно возрастающей скоростью (участок оплавления *3*). На участке *4* происходит быстрая осадка на величину $\Delta_{ос}$, а на участке *5* — торможение системы после выключения двигателя. Большие усилия развиваются кулаком только на участках предварительного обжатия деталей и осадки. Эти участки быстро изнашиваются и их делают сменными в виде закаленных вставок.

В полуавтоматических машинах дополнительное рычажное устройство служит для возвратно-поступательного перемещения плиты при неавтоматическом подогреве. По окончании неавтоматизированного подогрева включается электропривод, автоматически осуществляющий оплавление и осадку.

Достоинства моторно-кулачкового привода — простота и надежность; его недостатки — ограниченная скорость осадки (обычно до 20—25 *мм/сек*) из-за того, что при переходе от работы без нагрузки (при оплавлении) к работе со значительной нагрузкой (при осадке) в приводе выбираются люфты, и при чрезмерной крутизне кулака на участке осадки система заклинивается. Поэтому, если требуется очень быстрая осадка, иногда применяют комбинированный привод (при оплавлении моторно-кулачковый, а при осадке — пневматический).



Фиг. 164. Схемы гидравлического привода машины с копирующим золотником (*а*) гидропневматического привода ЦНИИТМАШа (*б*) и гидропривода без копирующего золотника (*в*).

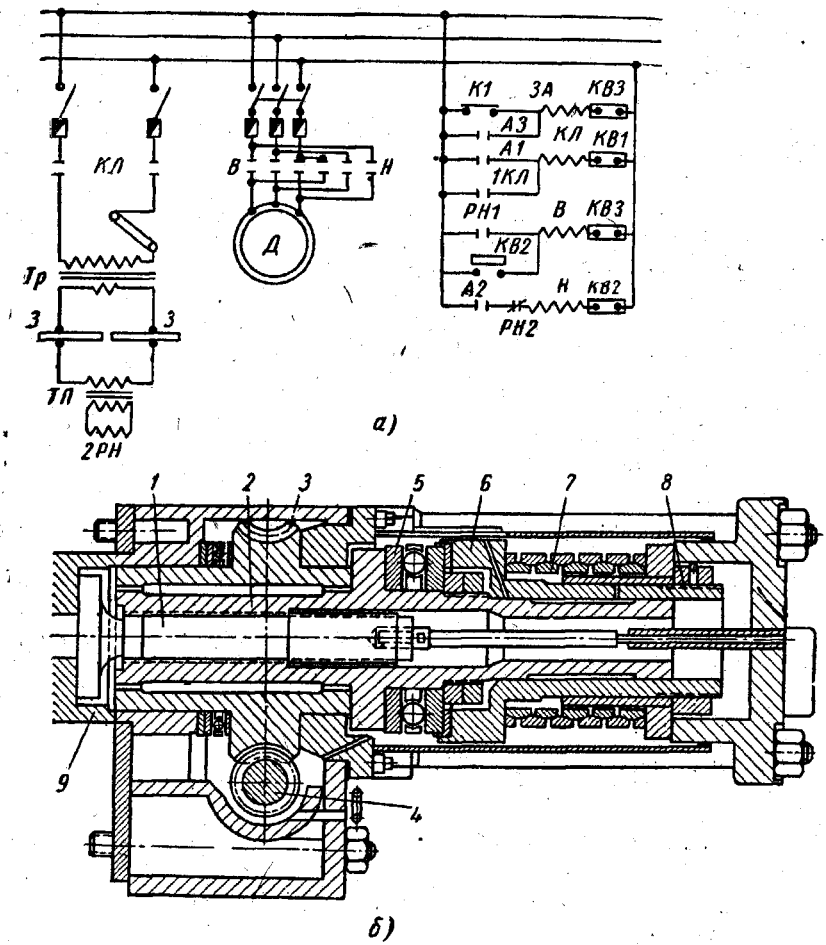
Гидропривод развивает практически любые усилия осадки и легко приспосабливается как для автоматической и полуавтоматической работы, так и для ручного управления (например, в машинах КТСА для сварки в полевых условиях труб диаметром до 529 *мм*). Его недостаток — относительная сложность изготовления в эксплуатации. Процесс управляется кулачком *15* (фиг. 164, *а*) через золотниковое устройство *4*. Кулачок имеет электропривод с регулируемым числом оборотов или рукоятку для ручного управления. Подвижная плита *1* соединена штоком *2* с поршнем *17* рабочего цилиндра *3*. Масло в него подается насосом *9* через золотниковое устройство *4*. Последнее состоит из корпуса *10*, укрепленного на станине, втулки *12*, связанной тягой *13* с подвижной плитой *1*, и золотника *14*, перемещаемого кулачком *15* (золотник всегда прижимается к кулачку пружиной *16*).

В положении, показанном на схеме, поршень *17* и плита *1* неподвижны, так как отверстия золотника перекрыты. При вращении кулачка по часовой стрелке золотник *14* перемещается влево. Как только отверстие *7* станет против трубы *11*, масло из насоса поступит по трубе *6* в заднюю камеру цилиндра *8*. Одновременно масло из камеры *5* будет вытекать по трубам *18* и *19*. Поршень *17* начнет двигаться влево, перемещая плиту *1*. Это движение продолжается до тех пор, пока втулка *12*, перемещающаяся вместе с плитой *1*, не закроет доступ масла из насоса в заднюю камеру цилиндра *8*. При перемещении золотника *14* вправо плита также перемещается вправо.

Таким образом, плита копирует движение золотника. Направление и скорость перемещения плиты задаются профилем и числом оборотов кулачка *15*. Его профиль строится так же, как для кулачков в машинах с электроприводом. Усилие осадки зависит от давления масла и диаметра рабочего цилиндра. Оно не зависит от величны осадки. Обычно это усилие лежит в пределах 10—100 *т* при давлении масла 50—60 *кГ/см²*. Скорость осадки определяется профилем кулачка, пропускной способностью золотника и соединительных трубопроводов, а также производительностью насоса. Иногда при осадке для увеличения ее скорости масло подается из специального аккумулятора. Принципиальная электрическая схема управления гидроприводом при автоматической сварке непрерывным оплавлением аналогична описанной выше схеме моторно-кулачкового привода.

Большие скорости осадки (до 100—200 *мм/сек*) относительно легко получить в машинах средней мощности с помощью пневмогидравлического привода. В одном из них, разработанном в ЦНИИТМАШе, подвижная плита *1* (фиг. 164, *б*) перемещается кулачковым сектором *2*, вращаемым штоком *3* рабочего цилиндра *4*. Движение поршня *5* вправо соответствует рабочему ходу плиты. Его скорость определяется скоростью выхода масла, вытесняемого плунжером *6* из небольшого масляного цилиндра *7*. Во время

оплавления масло медленно проходит через регулируемый дроссель *8*. При осадке электроклапан *9* открывает свободный выход масла из цилиндра *7*, система быстро перемещается влево, совершая осадку. Для возвратного движения плиты *1* воздух подается



Фиг. 165. Принципиальная электросхема автоматической стыковой машины для сварки оплавлением с подогревом с моторным приводом осадки (*а*) и узел этого привода (*б*).

клапаном *10* в заднюю камеру *11* цилиндра *4*. Масло при этом всасывается в цилиндр *7* из бачка *12*, через обратный клапан *13*. Воздушный дроссель *14* ограничивает скорость обратного хода с тем, чтобы система успела заполниться маслом без образования недо-

пустимого вакуума. Плита *1* всегда прижата к кулачку *2* пружинами *15*. Автоматические машины для сварки с подогревом имеют электрический или гидравлический (иногда пневмогидравлический) привод. Обычно для автоматизации процесса подогрева используется реле напряжения, катушка которого включается на напряжение между электродами (непосредственно или через повысительный трансформатор). Простейшая схема электропривода такой машины показана на фиг. 165, *а*. При нажатии пусковой кнопки К1 промежуточное реле ЗА контактами А1 включает контактор КЛ и замыкает цепь катушки Н реверсивного пускателя двигателя Д (при включении Н двигатель вращается назад, раздвигая через соответствующие механизмы плиты машины, при включении катушки В — вперед, сближая плиты). При отсутствии контакта между свариваемыми деталями *3* на вспомогательный трансформатор ТП подается напряжение холостого хода. При этом срабатывает реле напряжения 2РН, включается катушка пускателя В (контакты РН1 замыкаются, а РН2 размыкаются), и начинается сближение свариваемых деталей. При их соприкосновении замыкается сварочная цепь. По мере сближения деталей контакт между ними улучшается, а напряжение на электродах падает. Когда это напряжение становится недостаточным для удержания якоря реле напряжения во втянутом положении, якорь отпадает и двигатель переключается с прямого хода на обратный — плиты раздвигаются до тех пор, пока контакт между деталями *3* не нарушится и напряжение на электродах вновь не повысится до напряжения холостого хода, при котором опять срабатывает реле 2РН. При каждом сближении деталей через них протекает импульс сварочного тока длительностью 0,5—2,0 сек. Продолжительность этих импульсов зависит от конструкции машины и от настройки реле напряжения. При достаточном подогреве автоматически возбуждается непрерывное оплавление (см. гл. III, § 3 и 4) и дальнейший процесс управляется путевыми включателями КВ1 — КВ3. КВ2 предупреждает реверсирование двигателя в начале осадки; КВ1 отключает сварочный трансформатор, а КВ3 останавливает двигатель привода.

В некоторых мощных машинах с электроприводом (например, в рельсосварочных машинах РСКМ) применяется винтовой механизм перемещения плиты. Винт *1* (фиг. 165, *б*), соединенный с подвижной плитой *9*, приобретает поступательное движение при вращении гайки *2*, которая через червячную пару *3—4* связана с электродвигателем. Червячное колесо *3* не двигается вдоль винта, а гайка *2*, упирающаяся в подпятник *5*, может под действием осевого усилия перемещаться, передавая это усилие втулкой *6* на пружинящие кольца динамометра *7*, предварительно стянутые гайкой *8*. Привод контролирует степень осадки по усилию. Усилие осадки ограничивается сжатием динамометра *7*; при заданном его укорочении срабатывает конечный выключатель, отключающий двигатель привода. Для перехода от малой скорости подвижной плиты

при оплавлении к относительно большой ее скорости при осадке применяются двухскоростные двигатели или два раздельных двигателя с самостоятельными передачами. При этом оплавление производится с постоянной скоростью (иногда со ступенчатым ее изменением при использовании двухскоростных двигателей). Применение двигателя постоянного тока облегчает программное регулирование скорости оплавления, особенно необходимое при сварке легированных сталей. В некоторых автоматических машинах для сварки с подогревом (например, МСГА-500) применяется гидропривод без копирующего золотника и кулачкового управления (см. фиг. 164, *в*). Подвижная плита *1* при оплавлении и подогреве перемещается маслом, подаваемым из бака *2* насосом *3* в два цилиндра *4* через гидроаппаратуру, как показано на схеме стрелками. Дроссель *5* регулирует скорость выхода масла из цилиндра *4* и скорость перемещения плиты. В процессе оплавления собачка *6*, укрепленная на штанге, связанной с плитой *1*, нажимает на рукоятку дросселя и увеличивает скорость оплавления. В момент осадки электропневматический клапан *7* переключает гидроклапан *8* и масло из цилиндров *4* получает свободный выход, минуя дроссель *5*. При этом давление в системе устанавливается регулировочным клапаном *9* на величину около 65 *кГ/см²*. Этим обеспечиваются требуемые скорость и усилие осадки. При оплавлении и подогреве давление масла ограничивается 10—30 *кГ/см²* и устанавливается воздушным редуктором *10*, через который клапаном *11* воздух подается в верхнюю камеру регулировочного клапана *9*. В конце осадки концевые выключатели *12* и *13* выключают сварочный ток и прекращают осадку. Обратный ход плиты достигается переключением реверсивного золотника *15* с помощью клапана *14*.

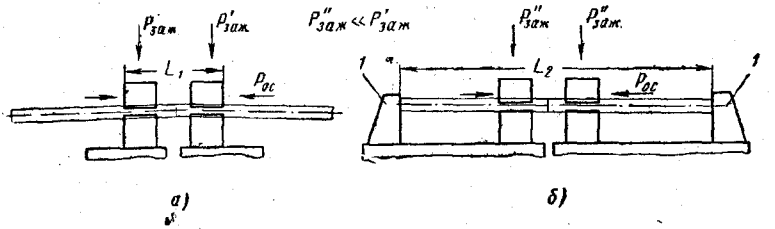
Подогрев автоматически управляется с помощью реле напряжения. При соприкосновении торцов свариваемых деталей реле напряжения выключается и включается реле времени, настраиваемое на 0—14 сек. В течение заданного времени соприкасающиеся детали сжимаются небольшим усилием и нагреваются. После этого гидросистема переключается автоматически на реверс. Как только напряжение на реле достигнет напряжения холостого хода, система вновь переключится на прямую подачу и процесс повторится. Оплавление начинается после подогрева до температуры, достаточной для его возбуждения с заданной скоростью, определяемой настройкой дросселя *5*. Для описанной системы характерны ступенчатое изменение скорости оплавления в процессе сварки и возможность ограничения степени осадки как по ее величине, так и по усилию.

§ 4. ЗАЖИМНЫЕ И УПОРНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Применяются два способа установки и закрепления свариваемых деталей в стыковой машине: без упоров (фиг. 166, *а*) и с упорами (фиг. 166, *б*). При сварке без упоров зажимные приспособле-

ния должны обеспечивать правильную установку деталей, передавать усилие осадки (силами трения, развиваемыми между электродами и деталями под действием силы зажатия $P'_{заж}$) и подводить к деталям ток.

Во втором случае усилие осадки $P_{ос}$ в основном передается жесткими упорами *1*. Облегчается также правильная установка деталей благодаря увеличению установочной базы ($L_2 > L_1$). При этом усилие $P''_{заж}$ должно только обеспечивать хороший контакт электродов с деталями и может быть значительно меньше, чем при сварке без упоров. Без упоров сваривают длинные трубы, рельсы,



Фиг. 166. Схема стыковой сварки без упоров (*а*) и с упорами (*б*).

листы, замкнутые кольца. В остальных случаях рекомендуется применять упоры.

Конструкция зажима во многом зависит от формы и размеров свариваемых деталей, поэтому в универсальных машинах зажимы обычно сменные. Для их крепления в плитах предусматриваются отверстия под болты, а иногда Т-образные станочные пазы.

Применяются зажимы с ручным, пневматическим, пневмогидравлическим, гидравлическим и электрическим приводом. Тип зажима существенно влияет на производительность сварки. Он определяется величиной необходимого усилия зажатия и характером производства (индивидуальный, массовый).

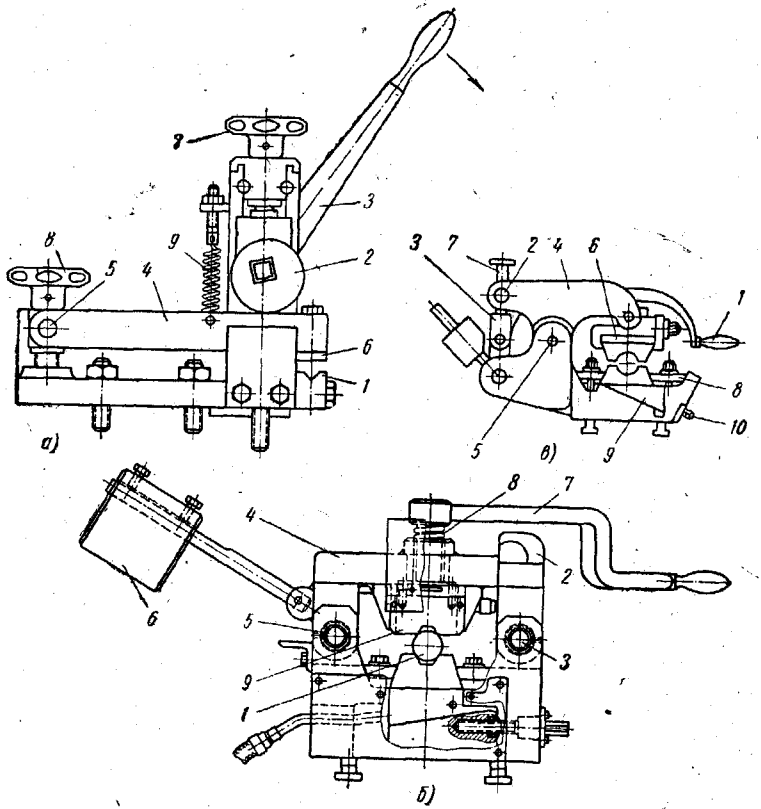
На машинах малой и средней мощности применяются ручные или пневматические зажимы, на машинах большой мощности — пневмогидравлические, гидравлические или зажимы с электроприводом.

Зажим должен быть быстродействующим. Развиваемое усилие не должно заметно изменяться при неизбежных отклонениях в размерах зажимаемых деталей.

Ручные зажимы могут быть эксцентриковыми, винтовыми и рычажными. Эксцентриковые зажимы — однооперационные (зажатие достигается одним поворотом рукоятки) и быстродействующие. Их недостаток — ограниченная величина усилия. Эти зажимы применяются в машинах мощностью до 5—10 *ква*. Корпус зажима и нижний электрод *1* (фиг. 167, *а*) крепятся на плите машины. Эксцентрик *2* при повороте ручки *3* нажимает на рычаг *4*, вращающийся вокруг оси *5*. При этом опускается верхний электрод *6*. Рас-

стояние между электродами в момент полного зажатия регулируется винтами *7* и *8*. Пружина *9* удерживает рычаг *4* в поднятом положении при освобожденном эксцентрике.

На машинах средней мощности (до 100 *ква*) при сварке деталей изменяющегося сечения часто применяются универсальные



Фиг. 167. Ручные зажимы стыковых машин:
а — эксцентриковый; *б* — винтовой; *в* — рычажный.

винтовые зажимы (фиг. 167, *б*). Для зажатия детали *1* серьга *2* поворачивается вокруг оси *3* и набрасывается на конец рычага *4*, вращающегося вокруг оси *5* (при раскрытом зажиме противовес *6* поднимает рычаг *4*). После этого рукояткой *7* вращают винт *8*, опускающий верхнюю прижимную колодку *9* (при одностороннем подводе тока — стальную), и деталь зажимается. Недостатки винтового зажима — многооперационность и малая производительность при большой затрате физического труда; ограниченное усилие зажатия (до 3000—4000 *кГ*). Его преимущество — универсальность и надежность.

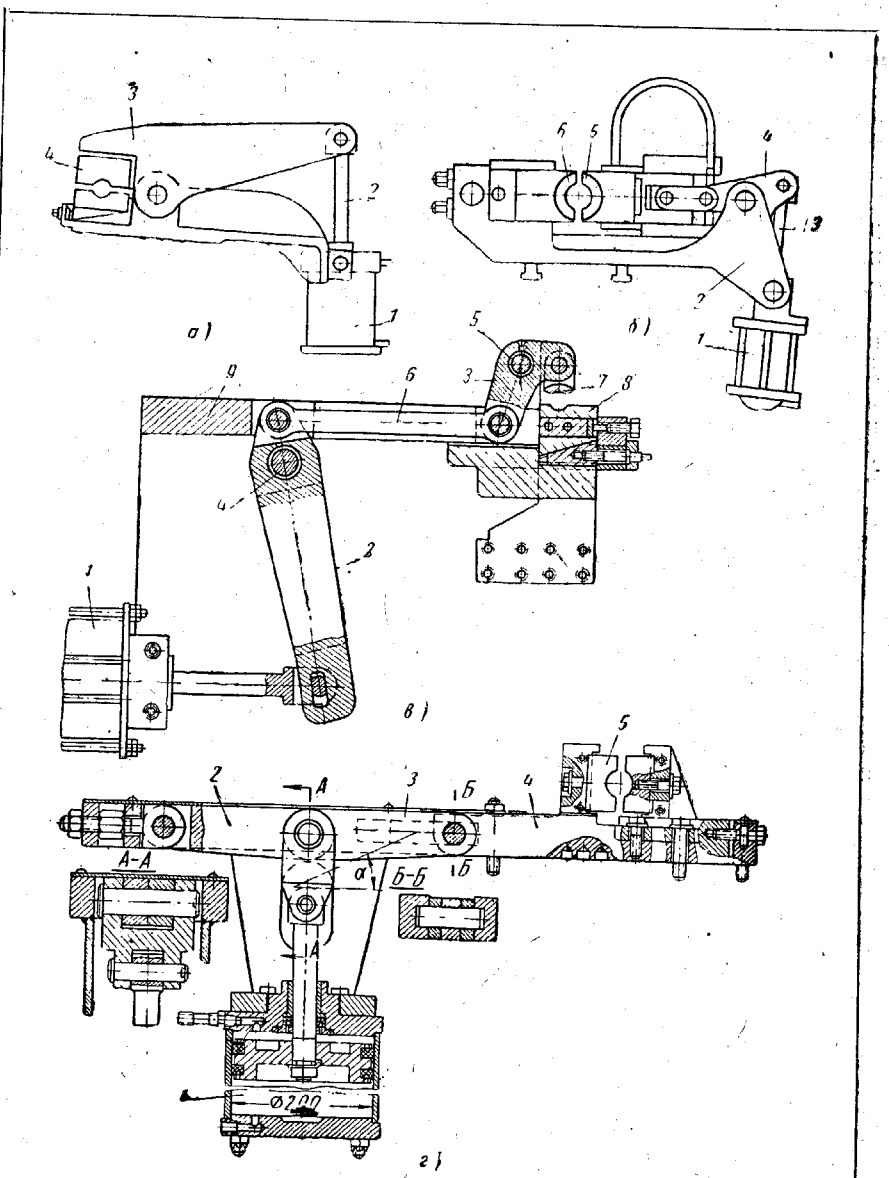
В условиях массового производства одинаковых деталей удобны однооперационные рычажные зажимы. В одном из них (фиг. 167, *в*) зажатие осуществляется поворотом рукоятки *1* вокруг оси *2*. При этом рычаги *3* спрямляются. При повороте коромысла *4* вокруг оси *5* верхний электрод *6* опускается. Степень нажатия, зависящая от положения рычагов *3*, регулируется винтом *7*. Положение нижнего электрода, удерживаемого планками *8*, регулируется клином *9* с помощью винта *10*. Недостаток рычажных зажимов — изменение усилия при отклонениях в размерах свариваемых деталей.

В настоящее время в машинах средней мощности широко применяются различные быстродействующие пневматические зажимы. Для уменьшения диаметра цилиндра, ограниченного расстоянием между осями подвижного и неподвижного зажимов, как правило, применяют рычажную систему. Зажим с обычным двуплечим рычагом *3* (фиг. 168, *а*), конец которого связан со штоком *2* шарнирно укрепленного воздушного цилиндра *1*, развивает на электродах *4* усилие, не зависящее от размеров зажимаемых деталей. Его недостаток — ограниченная величина усилия зажатия. Такой зажим удобен при сварке с упорами, когда не требуется больших усилий. Передача усилия от цилиндра *1* (фиг. 168, *б*), шарнирно укрепленного на кронштейне *2*, штоком *3* через систему рычагов *4* позволяет развить на электродах *5* и *6* усилие до 3000—5000 *кГ*.

Рычажно-пневматический зажим завода «Красный котельщик» (фиг. 168, *в*) для сварки трубчатых змеевиков развивает усилие до 10 000 *кГ*. Усилие от поршня цилиндра *1* через рычаги *2* и *3*, вращающиеся вокруг осей *4* и *5*, соединенные тягой *6*, передается шарнирно укрепленной стальной губке *7*, прижимающей свариваемую трубу к нижнему электроду *8*. Над корпусом зажима *9* выступает только небольшой кронштейн с электродами. Это позволяет сваривать змеевики с малым расстоянием между параллельными ветвями труб. В этом зажиме колебания в диаметре труб не влияют на усилие зажатия.

Компактный рычажно-пневматический зажим (фиг. 168, *г*) с горизонтальным ходом разработан для сварки труб Подольским машиностроительным заводом им. Орджоникидзе. При подъеме поршня цилиндра *1* распрямляются рычаги *2* и *3*, электрододержатель *4* перемещается в направляющих вправо и труба зажимается. Направляющие обеспечивают некоторую свободу вертикальных перемещений держателя, поэтому электрод *5* самоустанавливается по зажимаемой трубе. При заданном давлении воздуха усилие зажатия определяется положением рычагов *2* и *3* и зависит от фактического диаметра трубы.

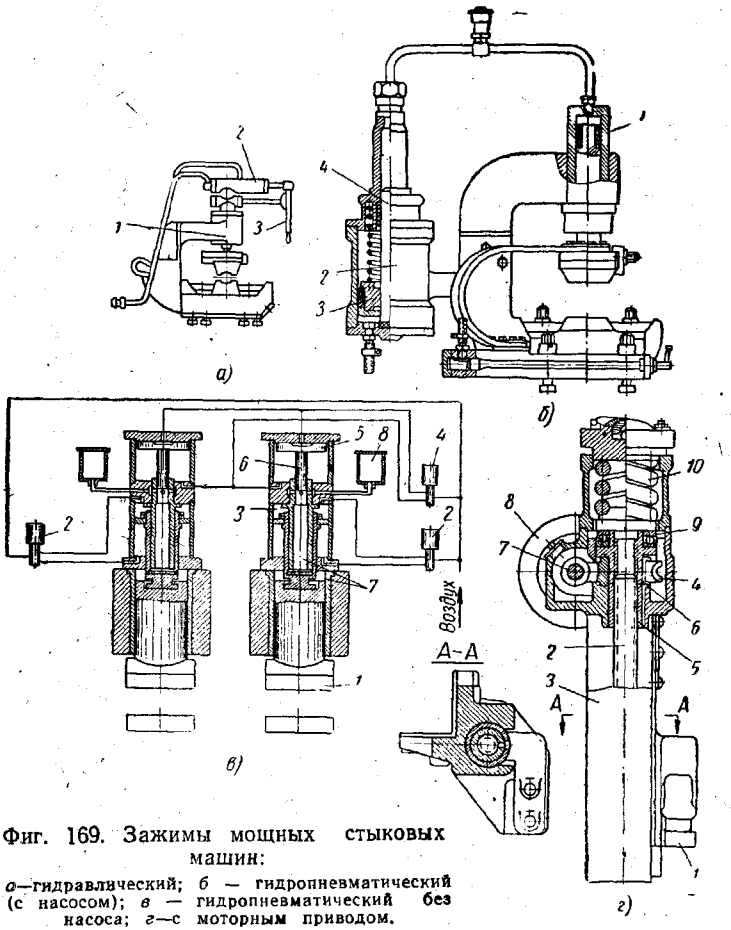
В простейшем гидравлическом зажиме (фиг. 169, *а*) усилие, развиваемое в цилиндре *1*, непосредственно передается электродам. Золотник *2* с помощью рукоятки *3* управляет подачей масла в верхнюю или нижнюю полости цилиндра. Для получения достаточного



Фиг. 168. Пневматические зажимы стыковых машин:

а — с простым рычагом; *б* — с выламывающими рычагами; *в* — для сварки змеевиков (конструкция ТКЗ); *г* — для сварки змеевиков (конструкция Подольского машиностроительного завода).

усилия давление масла обычно не должно быть ниже 50—200 *кГ/см²*. В этих зажимах усилие не зависит от толщины свариваемых деталей. Недостаток гидравлических зажимов — относительная сложность и необходимость в насосе. Они, как правило, применяются в



Фиг. 169. Зажимы мощных стыковых машин:

а—гидравлический; *б* — гидропневматический (с насосом); *в* — гидропневматический без насоса; *г*—с моторным приводом.

мощных машинах с гидроприводом осадки при отсутствии упоров, когда требуются очень большие усилия зажатия (например, при сварке полос из нержавеющей стали сечением 1500×4 *мм* каждый зажим должен развивать $P_{заж}=500$ *т*).

Для уменьшения давления масла, подаваемого насосами, применяются пневмогидравлические зажимы. Детали предварительно зажимаются небольшим давлением при непосредственной подаче масла насосом в рабочий цилиндр *1* (фиг. 169, *б*), а затем включа-

ется пневмогидравлический цилиндр *2*, поднимающий давление в рабочем цилиндре. При давлении воздуха на поршень *3* большого диаметра под небольшим плунжером *4* создается высокое давление масла (до 200 *ат*), передающееся в цилиндр *1*. Так как до этого детали уже были зажаты, небольшого количества масла, вытесняемого плунжером *4*, достаточно для компенсации упругих деформаций зажима и создания необходимого усилия. Применяются и безнасосные системы пневмогидравлических зажимов (например, в машинах МСГА-300 и 500). Верхние электроды *1* (фиг. 169, *в*) поднимаются и опускаются сжатым воздухом, управляемым электроклапанами *2*. При поступлении воздуха в камеру *3* электрод *1* опускается. После предварительного зажатия деталей электроклапан *4* подает воздух в верхнюю камеру цилиндра. Поршень *5* опускается и связанный с ним плунжер *6* сначала перекрывает отверстие, соединяющее гидравлический цилиндр *7* с бачком *8*, а затем создает высокое давление масла в этом цилиндре, необходимое для окончательного зажатия деталей. При подъеме и предварительном зажатии каждый зажим управляется раздельно (двумя клапанами *2*). Это облегчает установку свариваемых деталей. Окончательное зажатие осуществляется одновременно обоими зажимами при срабатывании одного клапана *4*.

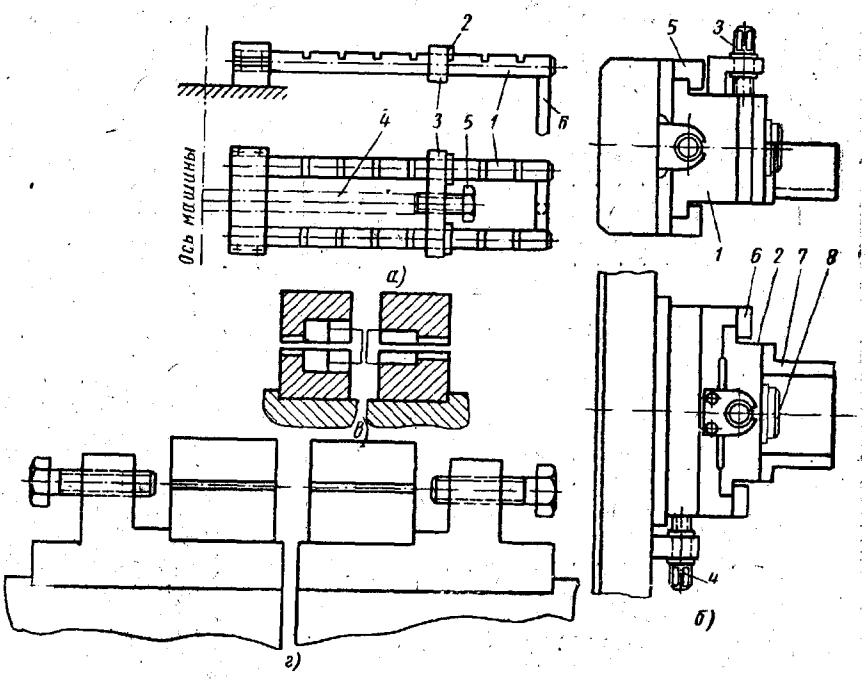
В мощных машинах с электроприводом осадки часто применяют винтовые зажимы с электрическим приводом (фиг. 169, *г*). Верхний электрод *1* укреплен в ползуне, перемещаемом винтом *2* в направляющих *3*. Винт движется поступательно при вращении червячным колесом *4* гайки *5*, скользящей по шпонке *6*. При вращении червяка *7* двигателем *8* винт опускает электрод до упора в зажимаемую деталь (рельс, трубу). Дальнейшее вращение двигателя приводит к свертыванию гайки *5* с неподвижного винта и ее подъему с нажатием через подпятник *9* на пружинный динамометр *10*. При заданном его сжатии конечный выключатель останавливает двигатель. Этим ограничивается усилие зажатия и предупреждается возможность перегрузки и поломки зажима.

Все зажимы при работе без упоров рассчитываются по формуле (36) в предположении, что усилие осадки передается силами трения, развиваемыми в двух плоскостях (между свариваемой деталью и каждым из электродов).

Для того чтобы верхний электрод, укрепленный на подвижном электрододержателе, воспринимал свою часть усилия осадки, зажим должен обладать достаточной боковой жесткостью и не иметь существенных люфтов.

Упоры устанавливаются на плитах машины, а при сварке длинных деталей — на специальных направляющих (фиг. 170, *а*). Штанги *1* имеют вырезы. При подъеме планок *2* траверса *3* свободно перемещается. При опущенных планках траверса с упорным винтом *4* служит упором для свариваемой детали *5*. Оси винта и детали совпадают. При их несовпадении изгибаются штанги. Свободный конец

длинных направляющих поддерживается кронштейном или отдельной стойкой *6*. Иногда положение упора регулируется в вертикальном и поперечном (по отношению к продольной оси машины) направлениях. Это усложняет упорные приспособления, но позволяет точнее устанавливать свариваемые детали. Центрирующий упор



Фиг. 170. Упорные приспособления:
а — выносной упор; *б* — центрирующий упор; *в* — упор в электродах; *г* — упор в корпусе зажимов.

(фиг. 170, *б*) обычно имеет два ползуна *1* и *2*, которые могут перемещаться на 5—10 *мм* винтами *3* и *4* во взаимно-перпендикулярных направляющих *5* и *6*. Свариваемая деталь укладывается в желобок *7* или надевается на штырь *8*. При сварке коротких деталей упоры объединяются с зажимными приспособлениями и усилие осадки передается через заплечики в электродах (фиг. 170, *в*) или через упорные винты, связанные с корпусом зажима (фиг. 170, *г*).

§ 5. ХАРАКТЕРИСТИКА СТЫКОВЫХ МАШИН ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Стыковые машины общего назначения могут быть отнесены к одной из четырех основных групп:

а) автоматические машины малой мощности для сварки сопротивлением;

Характеристика стыковых

Параметры	Показатели	Единица измерения	Автоматические машины для сварки сопротивлением			
			МС-0,75	МС-3	АСИФ-5	АСП-10
Электрические	Первичное напряжение	в	220	380	220 или 380	220 или 380
	Номинальная мощность	ква	0,75	3	5	10
	Номинальная продолжительность включения (*ПВ*)	%	8	20	20	8
	Номинальный ток в первичной цепи	а	3,4	8	23 или 13	45 или 26
	Число ступеней регулирования	шт.	7	7	4	8
	Пределы регулирования вторичного напряжения	в	0,49—1,10	0,97—1,94	1,16—2,2	1,2—3,2
	Ориентировочный наибольший ток в сварочной цепи при подогреве и осадке	а	700	1600	2800	3200
Механические	Характер действия машины	—	Автоматический			
	Привод подачи	—	Пружинный			
	Максимальный ход подачи	мм	7	10	18	12
	Наибольшее расстояние между зажимами	»	7	10	18	16

Таблица 21

машин общего назначения

Машины неавтоматического действия				Автомат для сварки непрерывным оплавлением	Автоматические машины для сварки оплавлением с подогревом		
МСР-25	МСР-50	МСР-75	МСР-100	МСМ-150-3	МСГА-300	МСГА-500	РСКМ-320У
220 или 380	220 или 380	220 или 380	220 или 380	220 или 380	380	380	380
25	50	75	100	150	300	500	320
20	20	20	20	20	20	30	20
114 или 66	227 или 131	340 или 198	455 или 263	680 или 395	790	1320	800
8	8	8	12	16	16	16	16
1,9—3,6	2,7—5,1	3,2—5,9	3,3—6,3	4,0—8,1	5,42—10,84	7,9—15,8	5,4—10,8
7000	10 000	12 000	14 000	19 000	30 000	35 000	32 000
Неавтоматический или автоматический*	Неавтоматический			Автоматический или полуавтоматический	Автоматический		
Рычажный и пружинный*	Рычажный			Электрический	Гидравлический		Электрический
20	30	30	40	20	170	170	50
50	80	80	80	100	200	200	175

Параметры	Показатели	Единица измерения	Автоматические машины для сварки сопротивлением			
			МС-0,75	МС-3	АСИФ-5	АСП-10
Механические	Максимальное усилие осадки . . .	*кГ*	3	18	120	50
	Тип зажимов . . .	—	Пружинно-рычажный	Пружинно-рычажный	Эксцентриковый	Рычажный
	Максимальное усилие зажатия . .	*кГ*	7	60	500	150
Технологические	Наибольшее сечение деталей из малоуглеродистой стали, свариваемых при интенсивной работе	*мм²*	1,2	7	50	50
	Соответствующее число сварок в час	шт.	540	300	100	180
	Наибольшее сечение свариваемых деталей при работе с перерывами	*мм²*	—	10	60	—
	Вес машины . . .	*кг*	17	60	100	205
	Габаритные размеры:					
	высота	*мм*	1120	1400	685	1242
	ширина . . .	»	515	440	688	650
	длина	»	610	650	400	635

* При сварке сопротивлением.

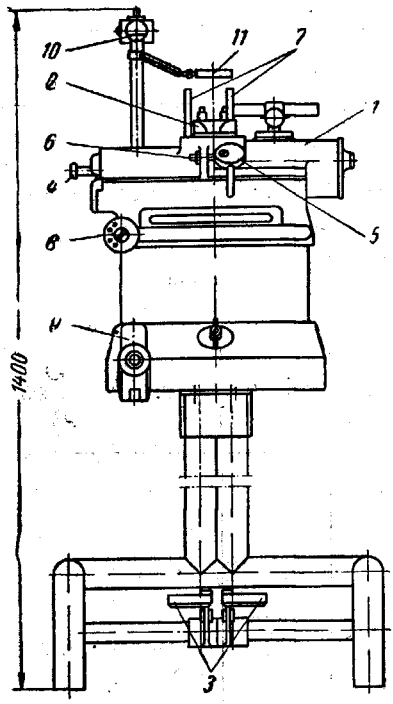
Продолжение табл. 21

Машины неавтоматического действия				Автомат для сварки непрерывным оплавлением	Автоматические машины для сварки оплавлением с подогревом		
МСР-25	МСР-50	МСР-75	МСР-100	МСМ-150-3	МСГА-300	МСГА-500	РСКМ-320У
~2000 или 150*	~3000	~3000	~5000	6500	25 000	25 000	25 000
Эксцентриковый	Рычажно-винтовой			Пневматический	Пневмогидравлический		Винтовой с электроприводом
800	5000	5000	5000	10000	35 000	35 000	35 000
300	400	600	1000	1000	5 000	8 000	6 000
110	90	75	30	80	20	20	5—15
500	700	1000	1600	2000	7 000	10 000	10 000
260	335	390	545	2000	7 500	8 000	13 000
1270	1100	1100	1650	1300	2 200	2 200	2 910
1250	1570	1570	1800	1580	1 600	1 600	1 890
880	1115	1115	1410	2000	3 590	3 590	3 040

б) неавтоматические машины средней мощности с рычажным управлением;

в) автоматические машины для сварки непрерывным оплавлением (иногда допускающие полуавтоматическую сварку с подогревом);

г) автоматические машины большой мощности для сварки с подогревом.

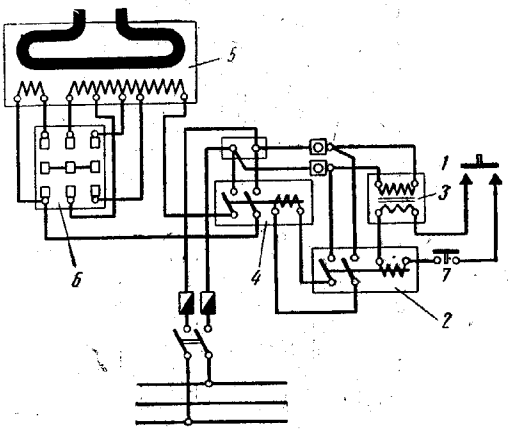


Фиг. 171. Машина МС-3 для стыковой сварки проволоки.

Автоматы мощностью от 0,75 до 10 *ква* в основном используются для сварки встык сопротивлением проволоки различного диаметра (табл. 21). Новейшие машины этого назначения (МС-0,7; МС-3) имеют шариковые направляющие подвижной плиты *1*, рычажно-пружинные зажимы *2*, разжимаемые педалями *3* в машине МС-3 (фиг. 171). Механизм осадки — пружинный с регулированием усилия нажатия винтом *4*. Подвижная плита отводится в исходное положение эксцентриком *5*. Установочная длина регулируется винтом *6*. Машина имеет дополнительные зажимы *7* для отжига сваренного стыка, нож *8* для перпендикулярной обрезки проволоки перед сваркой и приспособление *9* для рихтовки конца проволоки. Расстояние между зажимами *7* регулируется в широких пределах, так чтобы отжиг производить на той же ступени, на которой осуществлялась сварка. Лампочка *10* и лупа *11* облегчают установку концов проволоки. Ток включается кнопкой; выключение тока при сварке автоматическое (толкателем, связанным с подвижной плитой), а при отжиге — кнопочное. Институтом электросварки им. Патона разработан прибор, автоматически регулирующий цикл термической обработки стыка.

Во вторую группу входят машины мощностью от 25 до 100 *ква* (типа МСР). Машина МСР-25 имеет эксцентриковые зажимы и снабжена наряду с рычажным приводом пружинным приводом подачи. Это облегчает выполнение на ней сварки как оплавлением, так и сопротивлением. Более мощные машины этой серии снабжены только рычажным приводом и рычажно-винтовыми зажимами (см. фиг. 10 и 167, *б*). При нажатии кнопки *1* (фиг. 172) срабатывает

промежуточное реле *2*, катушка которого по условиям техники безопасности питается напряжением 36 *в*, от вспомогательного трансформатора *3*. При этом контактор *4* включает сварочный трансформатор *5* через переключатель *6*. После оплавления и осадки на заданную величину размыкаются н. з. контакты конечного выключателя *7* и сварочный ток выключается. Трансформатор (с водяным охлаждением) и вся электроаппаратура размещены в станине машины.



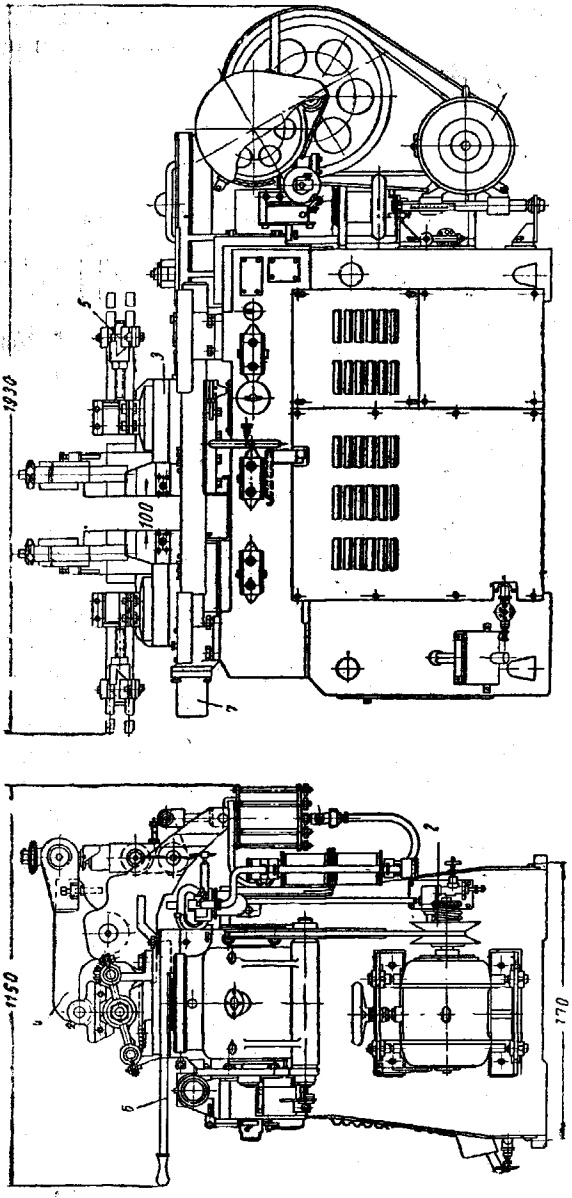
Фиг. 172. Электрическая схема стыковой неавтоматической машины МСР-100.

К третьей группе относится машина МСМ-150-3 (фиг. 173), а также машина СМ-50-1 мощностью 50 *ква*. Машина МСМ-150 имеет электропривод двигателем *1* с клиноременной передачей *2*, позволяющей регулировать число оборотов кулака, перемещающего подвижную плиту *3* при оплавлении и осадке. Машина снабжена быстродействующими пневматическими зажимами *4* и упорами *5*. При полуавтоматической сварке с подогревом рычагом *6* осуществляется возвратно-поступательное движение подвижной плиты. Плита возвращается в исходное положение и прижимается к кулаку сжатым воздухом, постоянно поступающим в цилиндры *7*. Машина МСМ-150 наиболее приспособлена для автоматической сварки непрерывным оплавлением с упорами коротких деталей в массовом производстве.

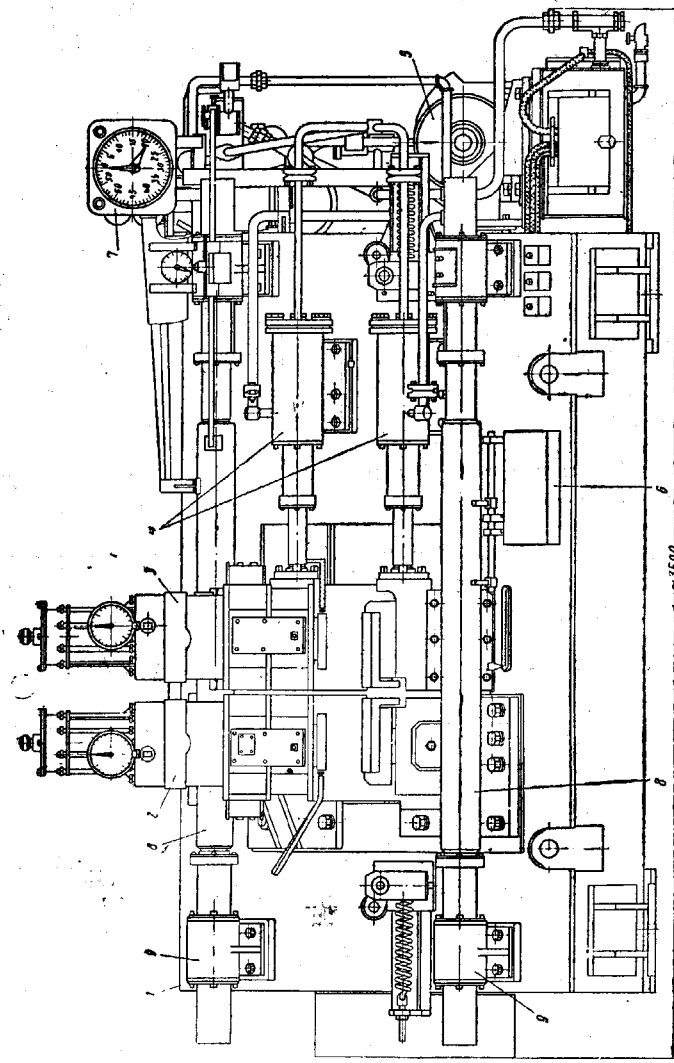
Применение машины МСМ-150 для сварки некоторых высоколегированных сталей ограничивается относительно небольшой скоростью осадки, связанной с работой кулачка.

Автоматические машины для сварки с подогревом стержней, труб большого диаметра и рельсов выпускаются с гидравлическим или электрическим приводом. Машины МСГА-300 и 500 (фиг. 174) имеют наклонный стол *1*, вертикальные пневмогидравлические зажимы *2* и *3*, два гидравлических цилиндра осадки *4*, насос *5*, выключающее устройство *6* (см. фиг. 164, *а*) и указатель перемещения подвижной плиты *7*. Подвижной зажим укреплен на жестких штангах *8*, перемещающихся в направляющих *9*.

Для сварки рельсов, стержней и труб диаметром до 120 *мм* нашла применение машина РСКМ-320У (фиг. 175) с электроприводом механизма подачи и зажимов. Механизм подачи имеет два

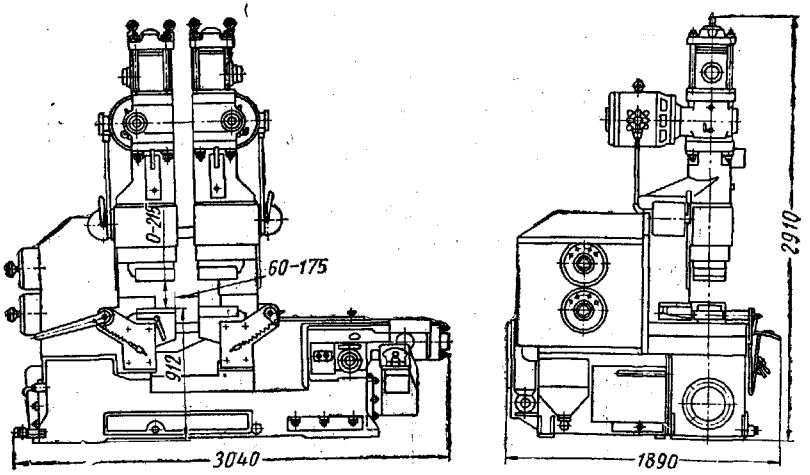


Фиг. 173. Автоматическая стыковая машина МСМ-150-3 для сварки непрерывным оплавлением



Фиг. 174. Автоматическая стыковая машина МСГА-500 с гидроприводом для сварки оплавлением с подогревом.

двигателя с двумя червячными редукторами, связанными с ходовым винтом. Один двигатель мощностью 1,7 *квт* используется при подогреве и оплавлении; осадка производится более мощным двигате-



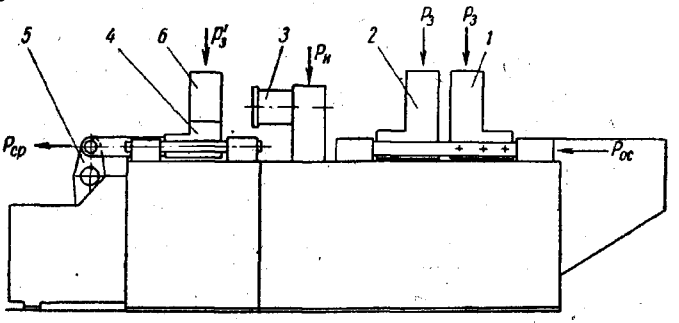
Фиг. 175. Автоматическая стыковая машина РСКМ-320У с электроприводом для сварки оплавлением с подогревом.

лем (17 *квт*). Для повышения коэффициента мощности машина комплектуется статическими конденсаторами, включаемыми в первичную цепь сварочного трансформатора.

§ 6. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СТЫКОВЫЕ МАШИНЫ

К этой группе относятся машины для сварки широких полос, применяемые в прокатных цехах (см. фиг. 7); автоматы для сварки цепей; автоматы для сварки заготовок инструмента; машины для для сварки монтажных стыков трубопроводов; специализированные машины для сварки в заводских и полевых условиях рельсов, машины для сварки ободов автомобильных колес и др. Для специализированных стыковых машин характерна тенденция к механизации и автоматизации вспомогательных операций (установки в машине свариваемых заготовок, их перемещения, удаления грата и т. д.) с постепенным переходом к автоматическим установкам и линиям. Например, для сварки встык полос шириной 30—245 *мм* и толщиной 0,8—3,5 *мм* разработана машина МСЛ-200-2 (фиг. 176), правая часть которой представляет собой стыковую машину с пневмогидравлическими зажимами (подвижным *1* и неподвижным *2*) и комбинированным приводом (рычажно-кулачковым при оплавлении и пневмогидравлическим при осадке), а левая — гратоснимающую машину. Последняя состоит из двух основных узлов: гратоснимаю-

щих ножей, прижимаемых к сваренной ленте силой $P_н$, развиваемой пневматическим цилиндром *3*, и каретки *4* с моторно-кулачковым приводом *5* и пневматическим зажимом *6*, захватывающим сваренную полосу. После сварки полоса перемещается отдельными тянущими роликами так, чтобы ее стык расположился несколько правее гратоснимателя. Затем полоса зажимается в каретке *4*, усилием $P'_з$, включается ее привод и стык протягивается силой $P_{ср}$



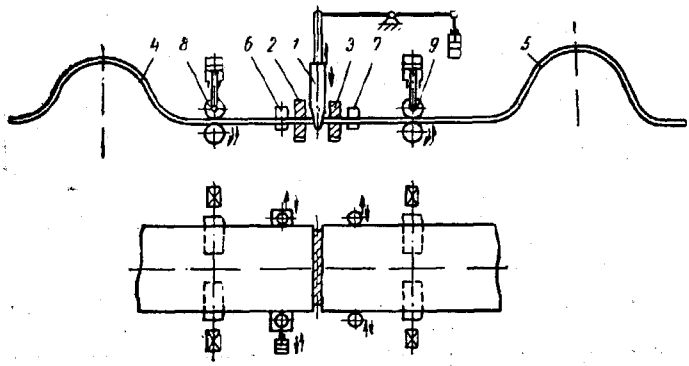
Фиг. 176. Схема машины МСЛ-200-2 с гратоснимающим устройством для стыковой сварки полос.

между ножами гратоснимателя. При оплавлении подвижная плита машины перемещается рычагом, на который воздействует кулак, вращаемый через червячный редуктор двигателем постоянного тока с регулируемым числом оборотов. В момент осадки воздух подается в пневмогидравлический цилиндр, в котором создается высокое давление масла. Наличие ресивера обеспечивает быстрое заполнение цилиндра воздухом и осадку со скоростью до 30 *мм/сек*. Машина развивает $P_{бс} = 7000$ *кГ* при $P_{заж} = 14\,000$ *кГ*. Производительность машины — до 45 сварок в час. В этом приводе сочетается очень жесткая кинематическая связь при оплавлении, характерная для моторно-кулачкового механизма, с большой скоростью и значительным усилием осадки, развиваемыми пневмогидравлической системой. Машины большей мощности (МСЛ-300-2 и МСЛ-500-2) сваривают полосы шириной до 500 *мм* при толщине до 6 и 8 *мм*. Они не имеют встроенного гратоснимателя.

Большие машины (разработанные бывш. ЦКБММ ЦНИИТМАШ и изготовленные ЭЗТМ) мощностью 1300—1500 *ква*, предназначены для сварки полос шириной до 1500—1550 *мм*, при толщине до 4 *мм*. Отдельная гратоснимающая машина расположена рядом со стыковой машиной. Эти стыковые машины имеют гидравлические зажимы с несколькими цилиндрами, установленными вдоль электродов, и гидравлический привод, управляемый при оплавлении копирующим золотником. Во время осадки масло подается в рабочие цилиндры минуя золотник из специального аккумулятора, где оно находится под давлением сжатого газа. Этим достигается высокая скорость осадки (до 50 *мм/сек*). Для умень-

шения размеров сварочного контура и, как следствие, повышения устойчивости оплавления машины снабжаются двумя или тремя сварочными трансформаторами, расположенными внутри станины вдоль зажимов.

Качественная сварка широких полос возможна только при точном совмещении их кромок, зависящем от установки электродов. Выверка длинных электродов непосредственно в машине затруднена. Поэтому нижние электроды иногда устанавливают и закреп-



Фиг. 177. Схема устройств для установки широких полос в листосварочных машинах.

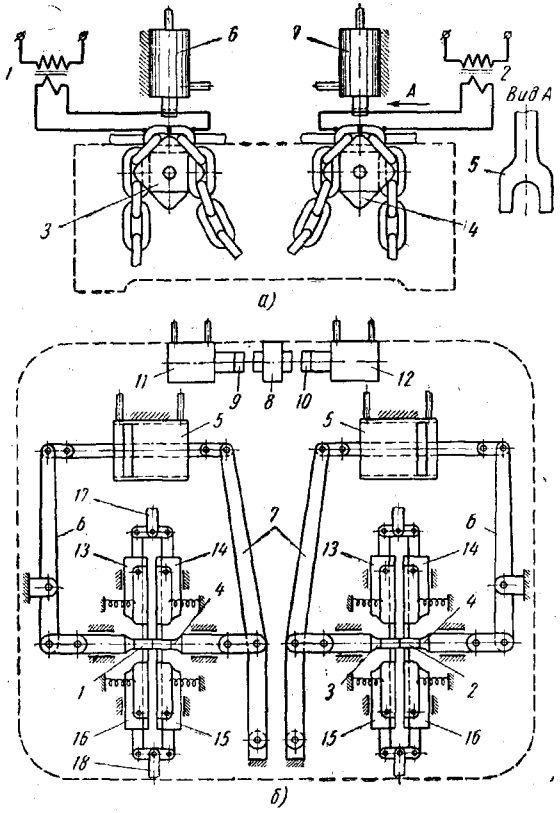
ляют на подушке, которая при износе или повреждении электродов выкатывается из рабочего пространства машины, и на ее место ставят взаимо-заменяемую подушку с предварительно установленными и тщательно выверенными электродами.

При сварке широкой полосы много времени идет на установку ее концов в машине. Для облегчения этой операции в листосварочных машинах имеется установочный нож *1* (фиг. 177), опускающийся перед сваркой в зазор между зажимами *2* и *3*. Концы полос *4* и *5* подводят до упора в этот нож, что обеспечивает их одинаковую установочную длину. Конец полосы при установке можно перемещать системой направляющих (*6* и *7*) и тянущих роликов *8* и *9*. Последние могут вращаться в одинаковом направлении, подводя полосу к ножу или в разных направлениях (если нужно устранить перекос конца полосы).

Для автоматической сварки оплавлением с подогревом рельсов заводом «Электрик» выпущена машина МСГР-500 с гидроприводом. Институт им. Патона разработал для сварки рельсов непрерывным оплавлением подвесную машину К-134 (с электромеханическим программным управлением циклом) и стационарную машину К-135 с игнитронным регулятором напряжения.

Комплексная автоматизация стыковой сварки и связанных с ней заготовительных и вспомогательных операций достигается в авто-

матах для сварки цепей. Цепи диаметром до 20 *мм* изготовляют на двух автоматических машинах, в первой — пруток разрезается на части требуемой длины, вхолодную загибаются звенья и вяжется цепь; во второй — сваривают сопротивлением стыки звеньев и обжимают утолщение в месте стыка.

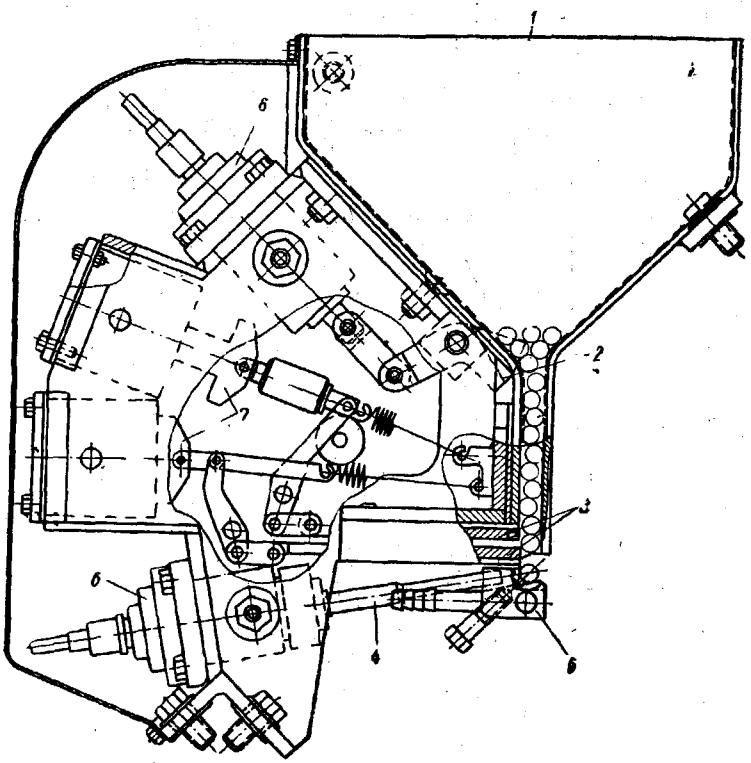


Фиг. 178. Автомат для сварки сопротивлением цепей:

а — схема подачи цепи к двум трансформаторам; *б* — механизм зажатия и осадки.

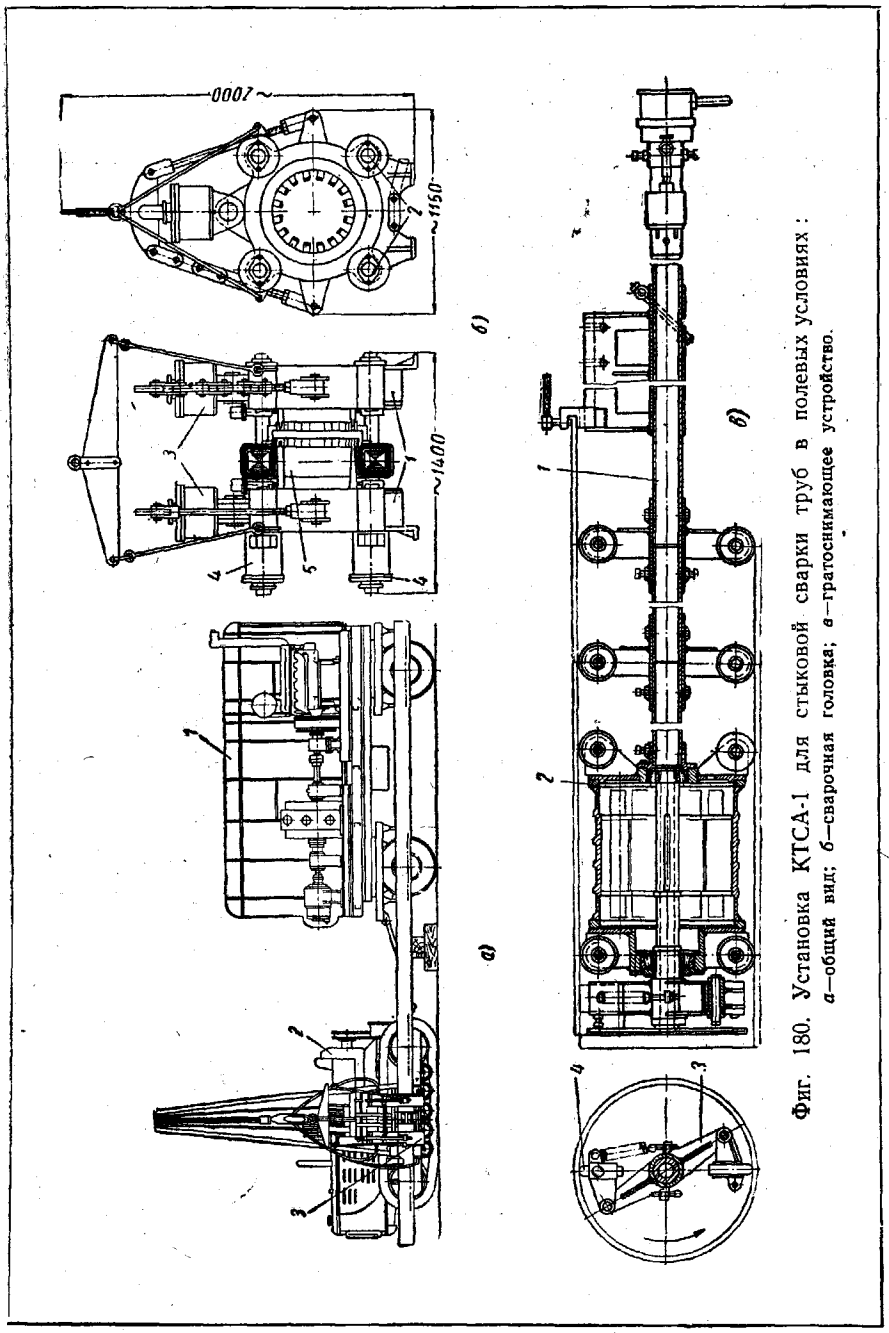
Сварочная машина имеет два трансформатора *1* и *2* мощностью 175 или 250 *ква* при $ПВ = 50\%$. Ее часовая производительность 380—520 звеньев. Цепь подается под сварку квадратными звездочками *3* и *4* (фиг. 178, *а*). При их повороте на 90° (с помощью храпового механизма с гидравлическим приводом) устанавливается под сварку очередное звено. Как видно из схемы, звенья при сварке располагаются в вертикальной плоскости. Поэтому они свариваются поочередно под левым и правым трансформаторами. После

сварки утолщение в стыке обжимается пуансоном *5*, связанным с гидравлическими цилиндрами *6* и *7*. Звенья *1* и *2* (фиг. 178, *б*) зажимаются между изолированными стальными колодками *3* и *4* с помощью гидравлических цилиндров *5*. Их штоки связаны через серьги с рычагами *6* и *7*. При перемещении штока левого цилиндра влево звено зажимается. В момент осадки в цилиндр *5* быстро по-



Фиг. 179. Механизм автоматической подачи заготовок.

дается масло под повышенным давлением из гидравлического аккумулятора. Подвод тока к каждому звену осуществляется четырьмя электродами *13—16*, связанными рычагами *17* и *18* с соответствующими гидравлическими цилиндрами. Сварочные трансформаторы включаются поочередно контакторами, управляемыми контактами *8*, *9* и *10*, которые замыкаются при подаче масла в цилиндры *11* и *12*. Работа всех механизмов автомата синхронизируется кулачковым командоаппаратом. Выпущены и более простые однотрансформаторные машины (А622 и др.), в которых цепь диаметром 6—20 *мм* сваривают в два прохода (сначала звенья, лежащие в одной плоскости, а после поворота цепи на 90° — осталь-



Фиг. 180. Установка КТСА-1 для стыковой сварки труб в полевых условиях:
а—общий вид; *б*—сварочная головка; *в*—гратоснимающее устройство.

ные звенья). Цепи диаметром более 20 *мм* можно сваривать оплавлением из полузвеньев в поточных линиях. Поточная линия состоит из отрезного станка, нагревательной установки, пресса для горячей гибки полузвеньев, пресса для подготовки торцов полузвеньев под сварку, установки для очистки окалины перед сваркой, сварочной машины и пресса для срезки грата. Цепи диаметром 20—38 *мм* свариваются со скоростью 120—70 звеньев в час.

Примером сварочного автомата с механизацией всех вспомогательных операций являются машина для сварки заготовок клапанов (созданная Институтом электросварки им. Е. О. Патона совместно с Ярославским моторным заводом) и машина для сварки заготовок инструмента, построенная Всесоюзным инструментальным институтом. В этих машинах круглые стержни требуемой длины автоматически подаются из бункеров в зажимы, свариваются и сваренные заготовки автоматически выбрасываются из машины. Часовая производительность автомата для сварки достигает 400 заготовок клапанов, что более чем вдвое выше производительности машин с неавтоматизированной установкой и съемом заготовок.

В автомате для сварки заготовок клапанов стержни, встряхиваемые в бункере *1* (фиг. 179) ворошителем *2*, подаются поочередно работающими отсекателями *3* на опорную призму *5*. В нужный момент выбрасыватель *4*, управляемый гидроцилиндром *6*, подает стержень в зажим. Отсекатели приводятся в действие электромагнитами *7*.

Особую группу специальных стыковых машин образуют передвижные агрегаты для сварки в полевых условиях труб. Установка КТСА-1 (фиг. 180, *а*), разработанная Институтом электросварки им. Е. О. Патона для сварки стыков магистральных трубопроводов диаметром до 529 *мм*, состоит из передвижной дизельной электростанции *1* с однофазным генератором мощностью 400 *ква*, трактора-трубоукладчика *2* и сварочной головки *3*. Головка (фиг. 180, *б*), подвешенная к стреле трубоукладчика, представляет собой два хомута *1* для зажатия концов свариваемых труб и их сближения при оплавлении и осадке по четырем направляющим *2*. Зажатие производится гидроцилиндрами *3*, а осадка цилиндрами *4*. В головке вмонтирован кольцевой трансформатор *5*. Установка комплектуется приспособлением для удаления внутреннего грата. Это приспособление (фиг. 180, *в*) вводится в трубу на длинной штанге *1*, на конце которой в корпусе 2 смонтирован электродвигатель, соединенный с траверсой *3*. На траверсе шарнирно укреплены бойки *4*. По окончании сварки она совмещается с плоскостью стыка, и включается двигатель. При вращении траверсы бойки сбивают грат. Разрабатываются машины и для сварки встык труб большего диаметра.

ГЛАВА XIII

ТОЧЕЧНЫЕ МАШИНЫ И СВАРОЧНЫЕ ПРЕССЫ

§ 1. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТОЧЕЧНЫХ МАШИН

Машины для точечной и рельефной сварки (сварочные прессы) не имеют принципиальных отличий. Точечную машину достаточной мощности можно использовать для рельефной сварки и, наоборот, сварочные прессы иногда применяются для точечной сварки толстого материала.

Точечные машины общего назначения состоят из станины или корпуса, механизма сжатия, сварочного контура и трансформатора с пускорегулирующей аппаратурой.

Специализированные машины могут иметь приспособления для закрепления и перемещения свариваемых деталей, устройства для механизации вспомогательных операций (например, установки деталей под сварку), устройства для резки, гибки, правки, очистки свариваемых деталей и т. д.

Машины для точечной сварки классифицируются:

1) по назначению:

а) универсальные (общего назначения) и б) специализированные;

2) по числу одновременно свариваемых точек:

а) одноточечные; б) двухточечные и в) многоточечные;

3) по способу подвода тока:

а) для двухсторонней и б) односторонней сварки;

4) по приводу механизма сжатия:

а) машины с педальным приводом; б) с моторно-кулачковым приводом; в) с пневматическим, гидравлическим или пневмогидравлическим приводом;

5) по направлению перемещения подвижного электрода:

а) с вертикальным ходом и б) с радиальным ходом (электрод перемещается по дуге окружности);

6) по роду действия:

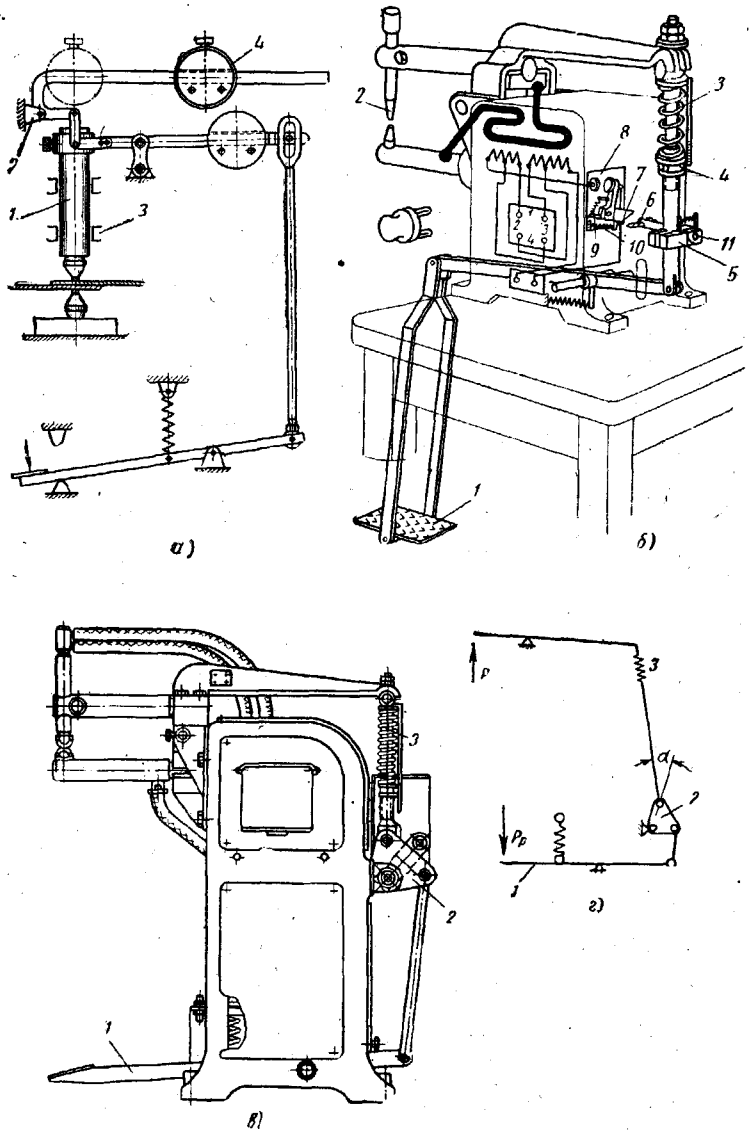
а) автоматические и б) неавтоматические;

7) по способу установки:

а) стационарные и б) передвижные;

8) по способу питания:

а) однофазные переменного тока и б) импульсные.



Фиг. 181. Педальный привод точечных машин:
а — ТКМ-4; *б* — АТА-5; *в* и *г* — АТП-10.

§ 2. МЕХАНИЗМЫ СЖАТИЯ ТОЧЕЧНЫХ МАШИН И СВАРОЧНЫХ ПРЕССОВ

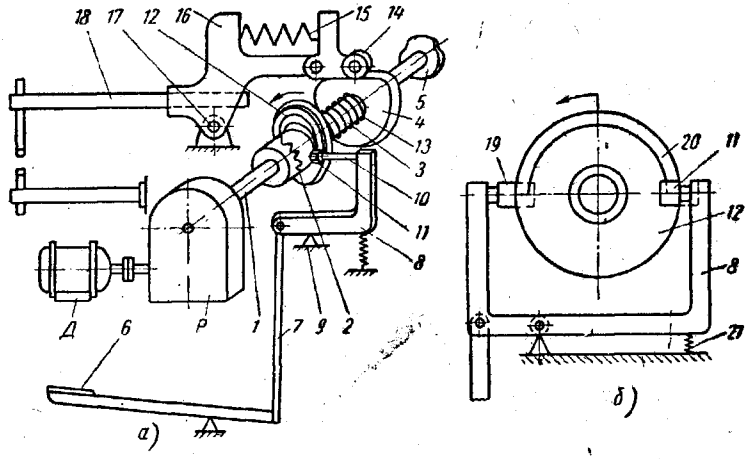
В одноточечной машине общего назначения (см. фиг. 11, *а*) нижний электрод при работе неподвижен, а верхний перемещается, сжимая свариваемые детали. Обычно механизм сжатия сблокирован с устройствами, включающими сварочный ток. Для перемещения свариваемых деталей в машине расстояние между разжатыми электродами должно быть не менее 15—40 *мм* (рабочий ход электродов). В некоторых машинах возможен также установочный ход электрода на 100—200 *мм*, облегчающий установку больших узлов. Принципиальная схема механизма сжатия зависит от сварочного цикла. В простейшем цикле усилие сжатия во время сварки постоянно (см. фиг. 71, *б*). Тип привода определяется необходимым усилием сжатия и темпом работы. При небольшом усилии (до 150—200 *кГ*) часто применяется педальный привод. При сварке очень тонких деталей усилие сжатия невелико (обычно не более 10—20 *кГ*, а иногда меньше 0,5 *кГ*), но должно точно выдерживаться. В этом случае удобен педально-грузовой привод (фиг. 181, *а*), использованный в конденсаторных машинах типа ТКМ. Для уменьшения сил трения электрододержатель *1* шарнирно соединен с рычагами *2* и свободно ходит в направляющих *3*. Усилие регулируется перемещением груза *4*.

Педально-пружинный механизм применяется в неавтоматических машинах мощностью до 25 *ква*. Простейший механизм такого типа показан на фиг. 181, *б* (машина АТА-5). При нажатии на педаль *1* электроды *2* сначала сближаются, а затем по мере сжатия пружины *3* между ними развивается необходимое усилие, регулируемое степенью предварительного сжатия пружины гайками *4*. Машина имеет механический включатель тока. При подъеме хомутика *5*, связанного со штангой педального устройства, палец *6* упирается в собачку *7* и замыкает контакты *8* усилием, регулируемым пружиной *9*. Начинается сварка. По достижении требуемого нагрева сварщик дожимает педаль, палец *6* соскакивает с собачки, а пружина *10* быстро разрывает цепь — сварка заканчивается. При освобождении педали хомутик возвращается в исходное положение. Свободный проход пальца обеспечивается его поворотом вокруг оси *11*. Таким образом, ток быстро выключается при увеличенном усилии на электродах.

В машинах АТП-10 и МТП-25М (фиг. 181, *в* и *г*) при нажатии на педаль *1* поворачивается сектор *2* и сначала электроды приходят в соприкосновение, а затем при нажатии усилием P_0 между ними развивается усилие P, регулируемое сжатием пружины *3*. Чем меньше угол α в момент окончания сжатия, тем больше P. Ток, как и в машине АТП-5, выключается механическим включателем, размыкаемым при дожатии педали. Достоинство педального привода — простота; недостатки — неавтоматическое действие, непосто-

янство развиваемого усилия, утомляемость сварщика. В настоящее время точечные машины мощностью более 25 *ква* выпускаются только с механизированным приводом.

Моторно-кулачковый привод (фиг. 182, *а*) применяется в машинах с радиальным ходом мощностью 50 и 75 *ква* (МТМ-50М и МТМ-75М). Двигатель *Д* через червячный редуктор *Р* вращает вал *1*, сцепляющийся зубчатой муфтой *2* с кулачковым валом *3*,



Фиг. 182. Кинематическая схема моторно-кулачкового привода точечной машины:

а — при автоматической работе; *б* — при неавтоматической.

на котором закреплены кулачок давления *4* и кулачок включения тока *5*. Кулачок *5* воздействует на механический включатель (не показанный на схеме), включающий сварочный трансформатор на требуемый отрезок времени или на путевой включатель, управляющий электромагнитным контактором. Кулачок *5* состоит из трех шайб, раздвигая которые веером, можно регулировать продолжительность импульса тока.

При нажатии на педаль *6* тяга *7* поворачивает рычаг *8* вокруг шарнира *9*. При этом палец *10* с роликом *11* сходит с выступа на упорной шайбе *12;* пружина *13* включает муфту *2*, и начинает вращаться кулачковый вал *3* (двигатель *Д* вращается непрерывно). Кулачок *4* через ролик *14* и предварительно сжатую пружину *15* поворачивает рычаг *16* вокруг оси *17*, опуская верхний хобот *18*. Усилие на электродах определяется степенью сжатия пружины *15*. Шайбы кулачка *5* устанавливаются так, чтобы включение тока произошло по достижении полного давления на электродах, а его выключение до снятия этого давления.

Если нажать педаль и быстро ее отпустить, то кулачковый вал сделает только один оборот, так как при вращении упорной шайбы

12 ее выступ набежит на ролик *11* и выведет муфту *2* из зацепления. Кулачковый вал после полного оборота, соответствующего одному циклу сварки, остановится. Для сварки следующей точки надо повторно нажать педаль. Если педаль непрерывно нажата, то муфта *2* все время находится в зацеплении и цикл сварки повторяется многократно с ритмом, соответствующим числу оборотов кулачкового вала (например, 50 об/мин).

Обычно рычаг *8* имеет П-образную форму (фиг. 182, *б*) и на нем закреплены два пальца с роликами *11* и *19*. При нажатии на педаль *6* тяга *7* переводит эти ролики в положение, показанное пунктиром. Ролик *11* сходит с выступа *20* упорной шайбы *12*, и кулачковый вал начинает вращаться по стрелке. При нажатой педали вал делает полоборота, после чего ролик *19* выводит муфту из зацепления. При таком положении вала электроды сжаты и включен сварочный ток. Это продолжается до тех пор, пока сварщик не отпустит педали, возвращая ролики *11* и *19* в их исходное положение (под действием пружины *21*). Кулачковый вал повернется еще на 180° в исходное положение. При этом выключится ток и будет снято усилие с электродов. Так осуществляется неавтоматический цикл сварки (его продолжительность определяется временем нажатия педали).

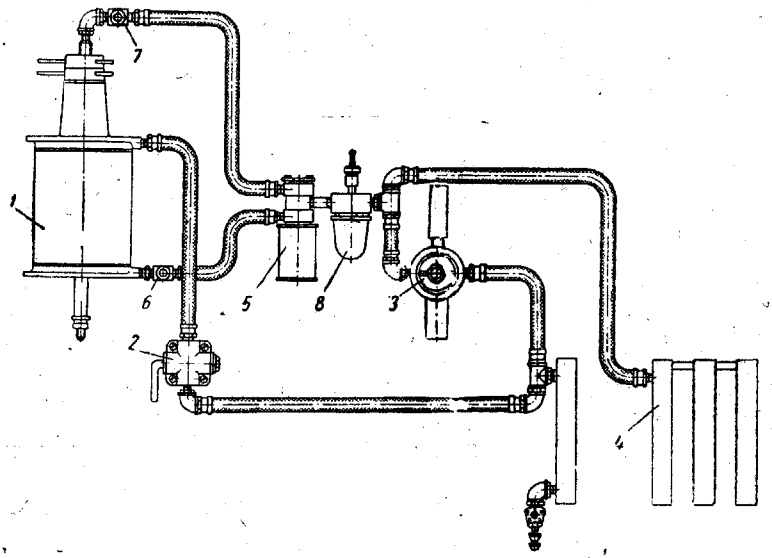
Для перехода к автоматической работе достаточно вывернуть палец с роликом *19*.

Преимущества моторно-кулачкового привода — простота и надежность в работе; его недостатки — нерегулируемая длительность цикла, превышающая в 4—6 раз время непосредственного включения сварочного тока, что иногда тормозит рост производительности труда, и трудность поддержания постоянства усилия сжатия (оно изменяется при изменении длины электродов и толщины свариваемых деталей). От этих недостатков в основном свободен пневматический привод, очень распространенный в современных точечных машинах и сварочных прессах средней и большой мощности (75 *ква* и выше).

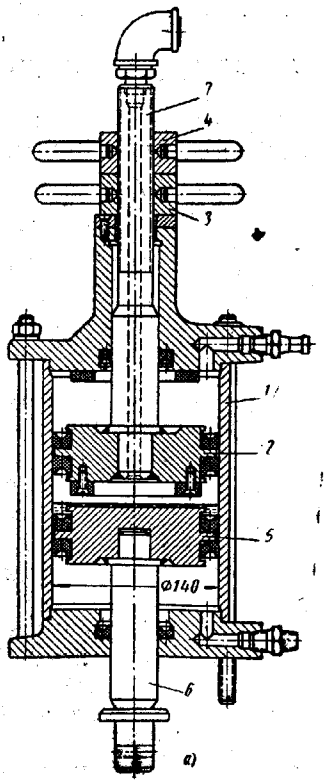
Обычный пневматический привод с рабочим и установочным ходом имеет трехкамерный цилиндр *1* (фиг. 183, *а*) с двумя поршнями. Ход верхнего поршня *2* ограничивается гайкой и контргайкой *3* и *4*. Поршень *2* является упором, ограничивающим рабочий ход нижнего поршня *5*, связанного штоком *6* с верхним электрододержателем. При подаче воздуха через трубку *7* в среднюю камеру электрод опускается, совершая рабочий ход; при подаче воздуха в нижнюю камеру электрод поднимается.

Для установочного хода воздух выпускается из верхней камеры и подается в нижнюю; оба поршня поднимаются до упора в верхнюю крышку цилиндра.

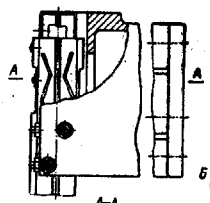
При нормальной работе верхняя камера цилиндра *1* (фиг. 183, *б*) краном *2* присоединяется к воздушной магистрали. Одновременно воздух через редуктор *3*, регулирующий усилие

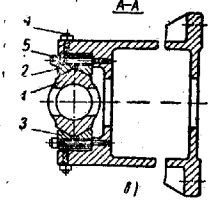


б)

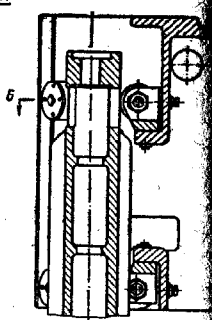


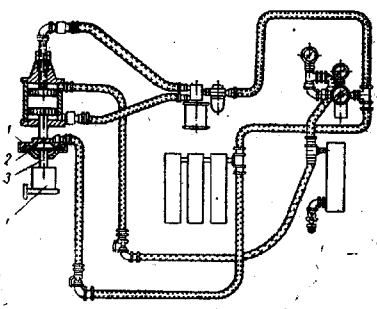
а)



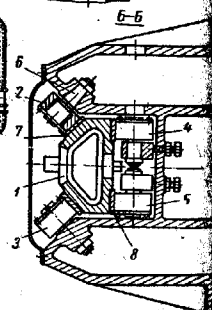


в)

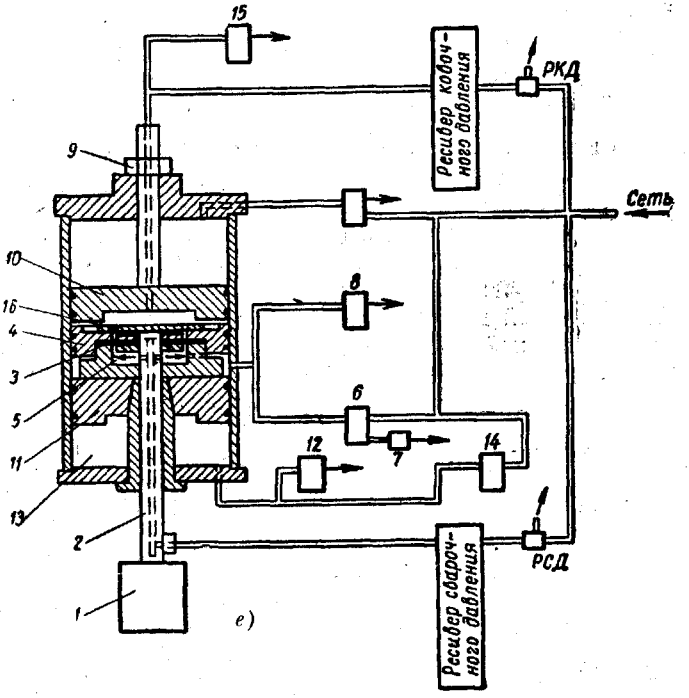


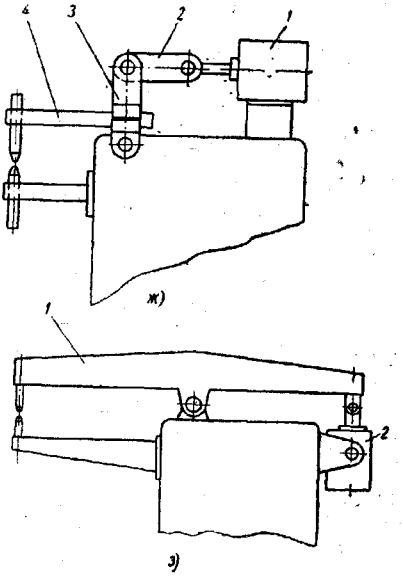


д)



г)





Фиг. 183. Механизм сжатия точечных машин с пневматическим приводом:

а—цилиндр рабочего и установочного хода; *б*—схема привода машины МТП-75; *в*—направляющие МТП-75; *г*—роликовые направляющие; *д* — схема машины МТП-200А с диафрагменным устройством; *е*—схема машины МТИП-300 с устройством для ковочного давления; *ж* и *з*—пневматический привод машин с радиальным ходом.

сжатия электродов, заполняет ресивер *4*, встроенный в корпус машины. Из ресивера, давление в котором всегда, по крайней мере на 0,7 *ати*, меньше, чем в сети, четырехходовой электроклапан подает воздух в среднюю или нижнюю камеру цилиндра. Для уменьшения ударов скорость заполнения цилиндра ограничивают дросселями *6* и *7*, проходное отверстие которых регулируют винтом. Для смазки манжет служит лубрикатор *8*, проходя через который воздух захватывает и распыляет каплю масла, оседающего на стенках цилиндров.

Электромагнит клапана управляется электронным регулятором времени, синхронизирующим весь цикл сварки. При установочном ходе воздух из верхней камеры цилиндра *1* краном *2* выпускается в атмосферу. Описанный привод работает без ковочного давления.

Шток цилиндра передает усилие ползуну, перемещающемуся в направляющих, на конце которого укреплен электрододержатель. Для поддержания неизменного усилия на электродах трение в направляющих должно быть минимальным. При работе на очень «жестких» режимах подвижные части должны быть легкими с тем, чтобы уменьшить силы инерции, возникающие при их быстром перемещении, вызываемом изменением толщины свариваемых деталей при нагреве и пластической деформации.

В машинах общего назначения длинный чугунный ползун *1* (фиг. 183, *в*) ходит в стальных призматических направляющих *2* и *3* с закаленными и шлифованными рабочими поверхностями. Направляющие планки регулируют винтами *4* и закрепляют шпильками *5*.

В прессах для рельефной сварки, где особенно важно отсутствие перекосов контактных плит, находят применение роликовые направляющие (фиг. 183, *г*). Чугунный ползун *1* ходит между четырьмя парами роликов 2—5, закрепленных на осях *6*. Каленые стальные планки *7* и *8* уменьшают износ ползуна.

Для уменьшения инерции подвижной системы (при сварке легких сплавов) между рабочим цилиндром и ползуном вводится диафрагменное устройство *1* (фиг. 183, *д*), соединяемое с легким силуминовым ползуном *4*, перемещающимся в роликовых направляющих (машина МТП-300А). После зажатия свариваемых деталей в малых перемещениях верхнего электрода участвуют только ползун и диафрагма *2* с тарелкой *3*. Отсутствие в диафрагменном устройстве манжет исключает трение в нем, что способствует стабильности развиваемого усилия.

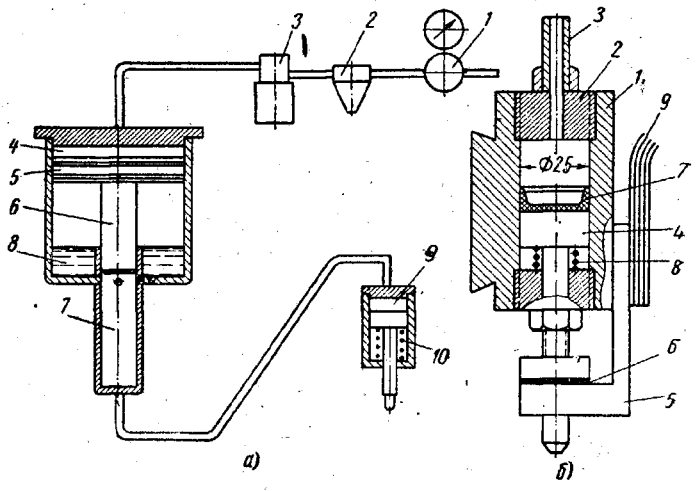
Пневматический привод с диафрагмой и устройством для ковочного давления (фиг. 183, *е*) имеет ползун *1* с электрододержателем, перемещающийся в роликовых направляющих. Он связан с концом штока *2*, закрепленным на резиновой диафрагме *3*. Усилие сжатия электродов при нагреве определяется площадью диафрагмы $F_д$ и давлением на нее воздуха (регулируется редуктором РСД). Ковочное давление определяется площадью $F_к$ среднего

поршня *4* и давлением воздуха над этим поршнем (регулируется редуктором РКД). Обычно $\frac{F_к}{F_д} = 2 \div 3$. При работе полости между поршнем *10*, крышкой *16* и диафрагмой *3* всегда заполнены сжатым воздухом. Для рабочего хода электрода выпускают воздух из поддиафрагменной полости *5* сначала медленно через клапан *6* и дроссель *7*, а затем, после соприкосновения электрода со свариваемыми деталями, быстро — через клапан *8* в обход дросселя. Это обеспечивает высокий темп работы без ударов. Обычно поршень *4* зажимают между поршнями *10* и *11* и рабочий ход (около 15 *мм*) достигается прогибом диафрагмы *3*. Однако установкой гайки *9* можно раздвинуть поршни *10* и *11* с соответствующим увеличением рабочего хода (и понижением темпа работы). Для создания ковочного давления в нужный момент срабатывает клапан *12* с большим проходным отверстием, поршень *11* опускается и перестает поддерживать средний поршень *4*, передающий ковочное усилие на электроды. Для заполнения полостей *5* и *13* служат клапаны *6* и *14*. Установочный ход достигается выпуском воздуха из верхней полости клапаном *15*.

В машинах с радиальным ходом (их преимущество — компактность рабочих частей) при небольшом полезном вылете (машина МТП-75Р) горизонтальный цилиндр *1* через серьгу *2* воздействует на рычаг *3* с закрепленным в нем хоботом *4* (фиг. 182, *ж*). При значительном вылете (машина МТПР-600/1200) применяется жесткое коромысло *1* (фиг. 182, *з*) с размещенным на конце приводом *2* (для рабочего хода служит диафрагменное устройство и для установочного — обычный пневмоцилиндр).

Если требуется малый вес механизма сжатия электродов (в подвесных машинах) или его особая компактность (в многоточечных машинах с близким расположением электродов), то для уменьшения размеров рабочих цилиндров применяется гидравлический или пневмогидравлический привод. В подвесных машинах чаще применяется пневмогидравлический привод без масляного насоса. Для зажатия свариваемых деталей воздух из сети подается через редуктор *1*. (фиг. 184, *а*), лубрикатор *2* и электроклапан *3* в верхнюю камеру *4* преобразователя давления. При этом его поршень *5* опускается. Сначала плунжер *6* перекрывает отверстия, соединяющие камеру *7* с резервуаром масла *8*, а затем создает давление масла, превышающее давления воздуха соответственно отношению площадей поршней. Масло вытесняется в рабочий цилиндр *9*. При обратном ходе воздух из камеры *4* выпускается в атмосферу, а масло из рабочего цилиндра вытесняется пружиной *10* и поднимает поршень преобразователя давления. Сварочная головка многоточечной машины с гидравлическим приводом показана на фиг. 184, *б*. В стальной корпус *1* с ласточкиным хвостом для удобного крепления к станине ввернута крышка *2* с трубкой *3* для подачи масла. Поршень *4* связан с электрододержателем *5* через

изоляционную прокладку *6*. Уплотнение достигается севанитовой манжетой *7* (севанит — специальная маслостойкая резина для манжет). Для уменьшения трения в рабочем цилиндре его пор-



Фиг. 184. Схема гидропневматического привода подвесной машины (*а*) и рабочий гидроцилиндр многоточечной машины (*б*).

шень часто делают с лабиринтным уплотнением (без манжет). Обратный ход осуществляется пружиной *8*. Рабочий ход достигает 50 *мм*. При давлении масла 100 *ат* и диаметре поршня 25 *мм* развивается усилие около 500 *кГ*. Гибкий провод *9*, соединяет электрододержатель *5* со сварочным трансформатором.

§ 3. СТАЦИОНАРНЫЕ ОДНОТОЧЕЧНЫЕ МАШИНЫ И СВАРОЧНЫЕ ПРЕССЫ

Серийно выпускаемые одноточечные машины могут быть отнесены к одной из следующих групп:

1) машины для сварки очень тонких деталей (часто конденсаторные);

2) однофазные машины переменного тока малой мощности (до 25 *ква*) общего назначения (с педальным приводом);

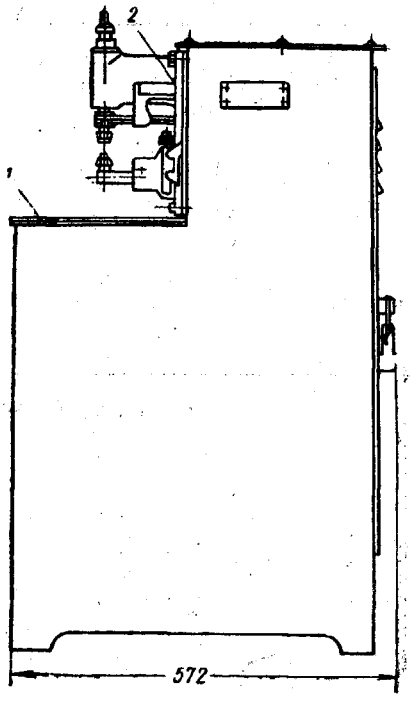
3) однофазные машины средней мощности (25—75 *ква*) для автоматической или полуавтоматической работы;

4) однофазные автоматические машины большой мощности общего назначения;

5) однофазные автоматические машины для сварки легких сплавов;

6) трехфазные импульсные машины.

Машины первой группы (табл. 22) предназначаются для сварки деталей толщиной от нескольких микрон до 0,2 —0,5 *мм*. Они снабжаются батареей конденсаторов емкостью 500—700 *мкф* при зарядном напряжении до 500—750 *в*. Энергия, накапливаемая в конденсаторах, достигает 200 *вт·сек* (обычно до 60 *вт·сек*). Она регулируется изменением емкости включенных конденсаторов, а иногда зарядного напряжения. Электроды сжимаются педально-грузовым (см. фиг. 181, *а*), педально-пружинным или электромагнитным приводом (с регулированием усилия пружиной). Машина представляет собой рабочий столик *1* (фиг. 185) с установленной внутри электроаппаратурой. На переднем щитке *2* размещены органы управления и приборы. Некоторые машины (например, МТК-2) могут работать по автоматическому циклу с ритмом 20—90 сварок в минуту, регулируемым электронным реле времени.



Фиг. 185. Конденсаторная точечная машина для сварки тонких деталей.

Машины второй группы (табл. 23) предназначены для сварки малоуглеродистой стали толщиной от 0,3—0,5 *мм* до 1—2 *мм*. Все эти машины имеют радиальный ход (см. фиг. 181, *б* — *г*). Машина АТП-5 устанавливается на верстаке; остальные на полу.

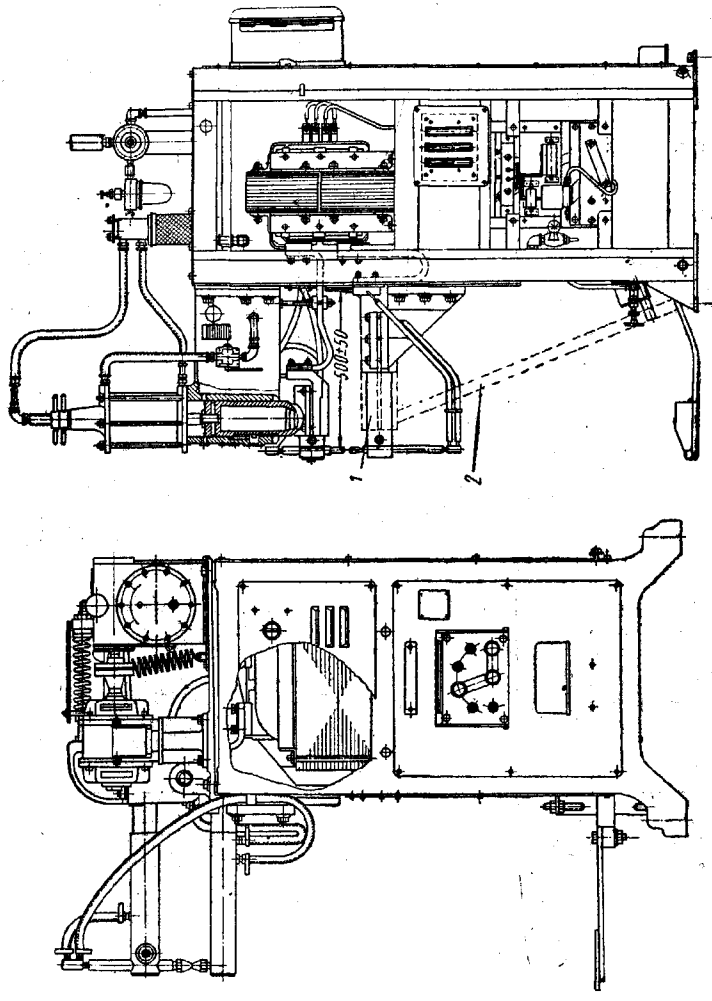
Наиболее широко применяются в крупносерийном и массовом производстве машины третьей и четвертой групп. Машины с моторно-кулачковым приводом (фиг. 186, *а*) имеют радиальный ход и приспособлены для работы по автоматическому и неавтоматическому циклу (см. фиг. 182). Машины с пневматическим приводом (фиг. 186, *б*) обычно имеют вертикальный ход и снабжаются асинхронным игнитронным контактором (типа КИА, см. фиг. 143, *г*).

Машины, предназначаемые для сварки ответственных изделий из легированных сталей, могут комплектоваться синхронными прерывателями (типа ПИТ, см. фиг. 145). В машинах мощностью свыше 100 *ква*, развивающих на электродах значительные усилия, для уменьшения прогиба нижнего хобота *1* ставятся подкосы *2* регулируемой длины. Машины нормальной серии имеют полезный

Таблица 22

Характеристика конденсаторных машин для точечной сварки тонких деталей

Параметры	Показатели	Единица измерения	Тип машины ТКМ-7	Тип машины МТК-2
Электрические	Напряжение сети	*в*	220	220
	Средняя потребляемая мощность	*вт*	200	200
	Максимальный зарядный ток	*а*		4
	Емкость конденсаторов	*мкф*	800	500
	Напряжение зарядки конденсатора	*в*	600	500
	Число ступеней регулирования сварочного трансформатора	шт.	4	5
	Тип выпрямителя	—	Селеновый	Селеновый
Механические	Характер действия	—	Неавтоматический	Автоматический и неавтоматический
	Привод механизма сжатия	—	Педально-грузовой	Электромагнитный и педально-пружинный
	Полезный вылет	*мм*	150	80
	Максимальный ход электродов	*мм*	15	5 — при автоматической 20 — при неавтоматической работе
	Пределы регулирования усилия сжатия	*кГ*	1,0—56,0	2,0—15,0
Технологические	Максимальная толщина свариваемых деталей	*мм*	0,7+0,7	0,3+0,3
	То же, минимальная	»	0,02+0,02	0,1+0,1
	Производительность	сварок/мин.	до 20	20—90
Габаритные размеры:				
	высота	*мм*	1350	1095
	ширина	»	800	650
	длина	»	685	572
Вес машины		*кг*	190	150



Фиг. 186. Точечные машины с моторно-кулачковым и пневматическим приводом:
а — машина МТМ-50М; *б* — машина МТП-75.

Характеристика одноточеч

Параметры	Показатели	Единицы измерения	Машины с педальным приводом			Машины с моторным приводом	
			АТП-5	АТП-10	МТП-25М	МТМ-50М	МТМ-75М
Электрические	Первичное напряжение	*в*	220 или 380	220 или 380	220 или 380	220 или 380	220 или 380
	Номинальная мощность	*ква*	5	10	25	50	75
	Номинальная продолжительность включения (*ПВ*)	%	20	20	20	20	20
	Номинальный ток в первичной цепи	*а*	23 или 13	46 или 26	114 или 66	227 или 131	340 или 197
	Число ступеней регулирования	шт.	4	8	8	8	8
	Пределы регулирования вторичного напряжения	*в*	~1,1—2,2	1,5—2,9	1,9—3,6	2,7—5,1	3,2—5,9
	Ориентировочный наибольший сварочный ток	*а*	3000	4000	7500	10 000	12 000
	Тип контактора		Механический				
	Продолжительность включения сварочного тока	сек.	Произвольная			0,16—0,36 (при автоматической работе)	0,16—0,36 (при автоматической работе)
Механические	Характер действия машины	—	Неавтоматический			Автоматический и неавтоматический	
	Полезный вылет	*мм*	200	250	250	350	350
	Суммарный ход верхнего электрода (В — вертикальный, Р — радиальный)	*мм*	15—Р	20—Р	20—Р	20—Р	20—Р
	Привод механизма сжатия электродов	—	Педальный			Моторно-кулачковый	
	Максимальное усилие сжатия	*кГ*	70	250	155	200	350

Таблица 23

ных машин общего назначения

Машины с пневматическим приводом							
МТП-75	МТП-100	МТП-150	МТП-200	МТП-300	МТП-400	МТП-75Р	МТП-150/1200
380*	380*	380*	380*	380	380	380*	380*
75	100	150	200	300	400	75	150
20	20	20	20	20	20	20	20
197	262	394	524	786	1048	197	394
8	16	16	16	16	16	8	8
3,12—6,24	3,4—6,8	4,05—8,1	4,42—8,85	4,87—9,75	5,42—10,84	3,12—6,24	6,34—12,65
12 000	16 000	19 000	23 000	31 000	37 000	12 000	12 500
Игнитронный асинхронный или синхронный				Игнитронный асинхронный			Игнитронный синхронный
От 0,04 до 6,75 (при асинхронном контакторе) и от 0,02 до 0,38 (при синхронном)				0,65—20,0	0,65—20,0	0,04—6,75	0,02—0,38
Автоматический							
500	500	500	500	500	500	600—800	1200
80—В	80—В	180—В	100—В	120—В	120—В	80—Р	130—В
Пневматический							
540	640	1400	1400	3200	3200	400	1200

Параметры	Показатели	Единицы измерения	Машины с педальным приводом			Машины с моторным приводом	
			АТП-5	АТП-10	МТП-25М	МТМ-50М	МТМ-75М
Технологические	Максимальная толщина свариваемых деталей при автоматической работе с асинхронным контактором	*мм*	—	—	—	2+2	2,5+2,5
	То же, при работе с синхронным прерывателем	»	—	—	—	—	—
	То же, при неавтоматической работе в серийном производстве	»	1+1	1,5+1,5	2+2	2,5+2,5	3+3
	Число ходов в час при автоматической работе	сварок / час	—	—	—	3000	3000
	Максимальное число сварок в час при неавтоматической работе	»	900	900	900	1500	1500
Габаритные размеры:							
	высота	*мм*	482	1054	1103	1332	1332
	ширина	»	345	455	455	610	630
	длина	»	612	980	980	986	986
Вес машины		*кг*	93	180	210	365	450

* Для включения в сеть напряжением 220 *в* поставляются с автотрансформатором

** При сварке деталей из нержавеющей стали.

Продолжение табл. 23

Машины с пневматическим приводом							
МТП-75	МТП-100	МТП-150	МТП-200	МТП-300	МТП-400	МТП-75Р	МТП-150/1200
2,5+2,5	4+4	5+5	6+6	7+7	8+8	2+2	—
2+2	2,2+2,2	2,5+2,5	3+3	—	—	—	1,5+1,5**
—	—	—	—	—	—	—	—
4200	4200	3900	3900	2400	2400	4200	4800
—	—	—	—	—	—	—	—
2120	2120	2270	2270	2550	2550	1805	2340
680	680	785	785	840	840	794	880
1370	1370	1427	1427	1610	1610	1875	2135
650	750	980	1025	1300	1360	1090	1770

220/380 *в*.

Характеристика машин для точечной сварки деталей из легких сплавов

Таблица 24

Параметры	Показатели	Единицы измерения	Однофазная машина	Импульсные машины*		
			МТП-300А	МТПТ-400	МТПТ-600	МТИП-1000
Электрические	Напряжение питающей сети	*в*	380	380	380	380
	Номинальная мощность	*ква*	300	400	600	1000
	Номинальная продолжительность включения	%	20	8,2	8,2	5,4
	Число ступеней регулирования	шт.	16	20	20	20
	Максимальный сварочный ток на номинальной ступени	*а*	30 000	73 000	102 000	160 000
	Пределы регулирования вторичного напряжения	*в*	5,42—10,84	2,17—5,9	2,3—6,3	2,5—6,9
	Продолжительность включения сварочного тока	сек.	0,02—0,38	0,1—0,64	0,1—0,63	~0,1—0,7
	Тип прерывателя	—	Синхронный игнитронный с модулированием кривой тока	Игнитронный трехфазный		
Механические	Полезный вылет	*мм*	450—550	1500	1500	1500
	Ход верхнего электрода при работе диафрагмы	*мм*	5—20	30	30	30
	Полный ход электрода	*мм*	115	300	300	~130
	Привод механизма сжатия электродов	—	Пневматический с диафрагменным устройством			
	Пределы регулирования усилия при сварке	*кГ*	200—800	300—1500	500—2600	2000—9000
	То же, при проковке	*кГ*	—	700—3500	1300—6500	4000—16000
Технологические	Максимальная толщина свариваемых деталей из алюминивых сплавов	*мм*	2,5+2,5	3,0+3,0	4,5+4,5	7,0+7,0
	Максимальное количество сварок в час	сварок / ас	2400	2400	1200	480—1800
	Габаритные размеры	*мм*				
	высота		2565	3190	3480	4150
	ширина		830	1240	1365	1800
	длина		1582	3880	4210	5300
	Вес	*кг*	1540	7200	13500	30000

* Выпущены также машины типа МТИП-300, МТИП-[illegible] и МТИП-[illegible]

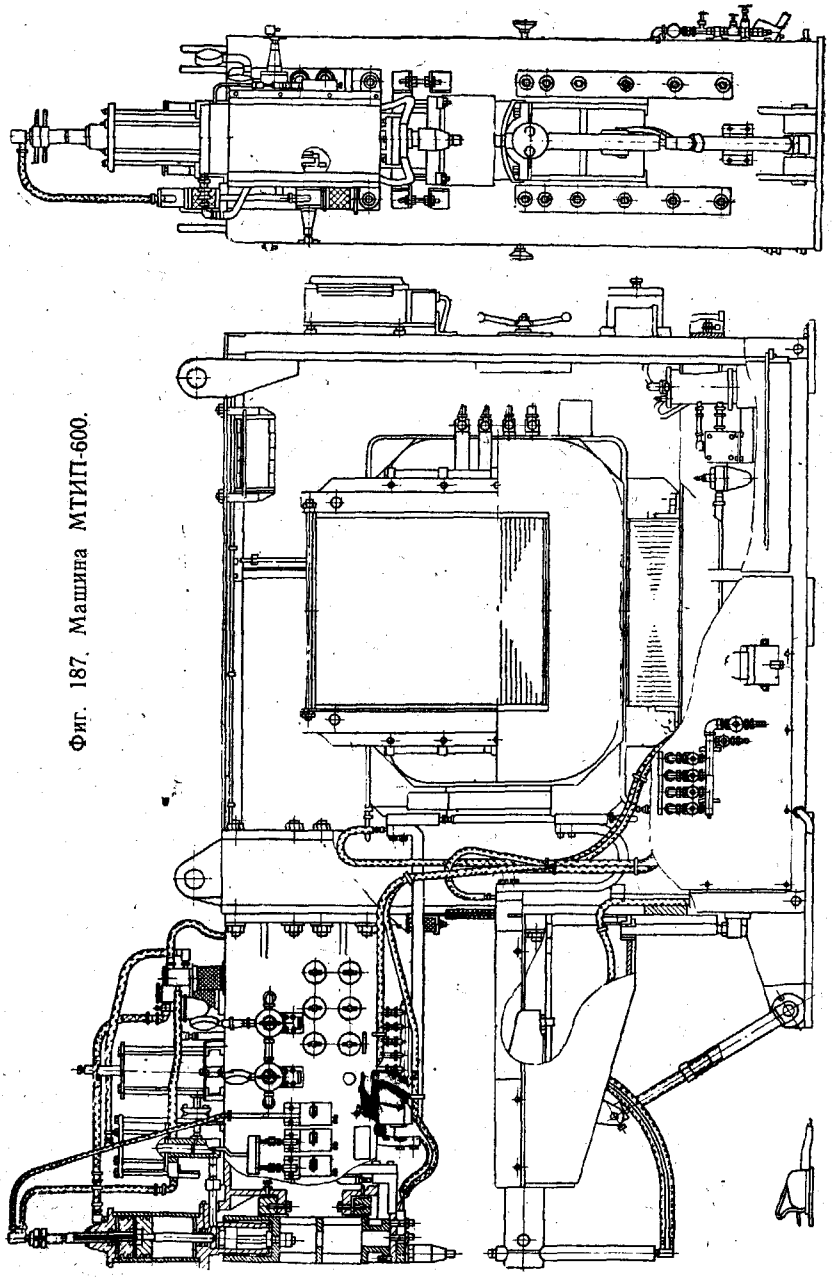
вылет 500 ± 50 *мм*. Выпускаются машины (МТП-150/1200) с вылетом, увеличенным до 1200 *мм*. Оригинальна конструкция корпуса машин типа МТП. Он сваривается из стальных труб, служащих ресивером для сжатого воздуха, угольников и массивной передней плиты. Сбоку корпус закрывается дверцами, обеспечивающими удобный доступ к размещенному в нем электрооборудованию.

Для сварки стальных деталей большой толщины (до $10 + 10$ *мм*, и выше) целесообразны машины низкой частоты (~ 3 *гц*), в которых предварительно выпрямленный трехфазный ток направляется в сварочный трансформатор в виде чередующихся по направлению импульсов. При низкой частоте резко уменьшается индуктивное сопротивление сварочного контура, повышается коэффициент мощности машины (до 0,9) и потребляемая мощность снижается в 2—3 раза по сравнению с мощностью обычных точечных машин (см. фиг. 159). Такую схему имеет машина МТНЧ-250.

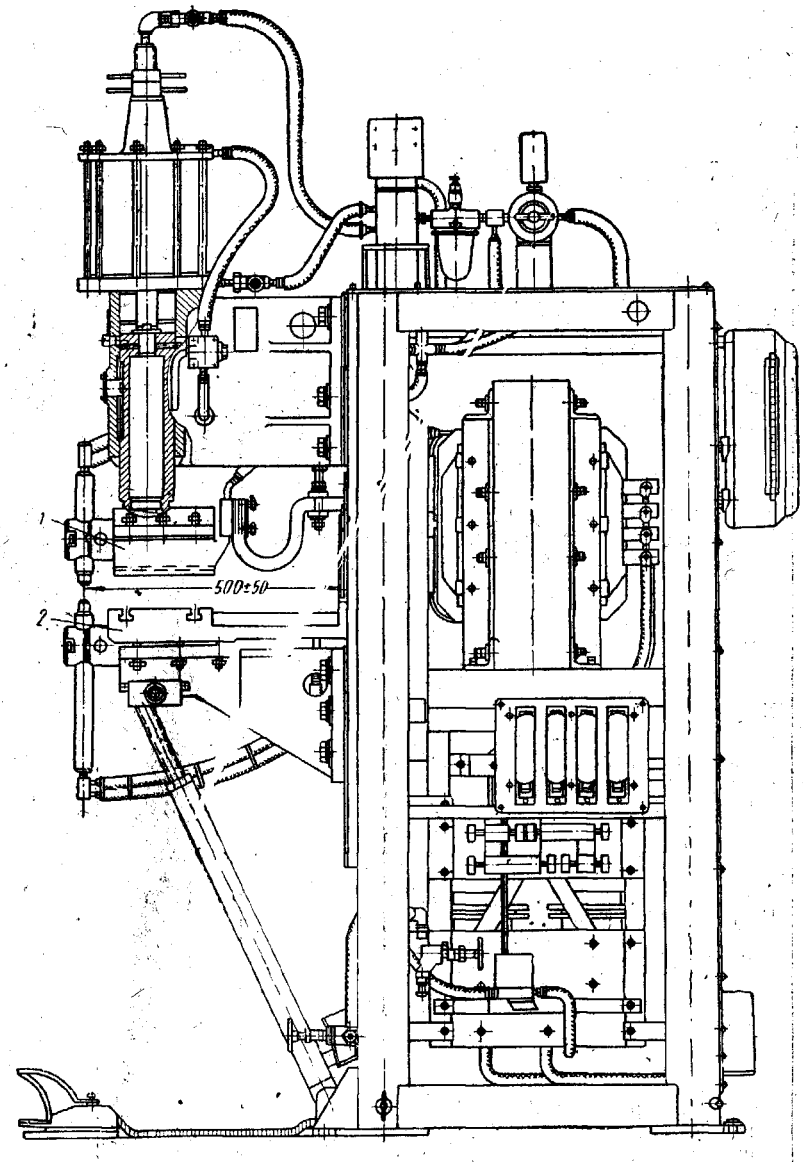
Для сварки легких сплавов (табл. 24) выпускается однофазная машина МТП-300А, отличающаяся от обычных машин серии МТП наличием диафрагменного привода, уменьшающего инерцию подвижных частей машины (см. фиг. 183, *д*). Машина комплектуется синхронным прерывателем типа ПИТМ с модулированием сварочного импульса (постепенным его нарастанием и спадом).

Для точечной сварки легких сплавов широко используются трехфазные импульсные машины типа МТПТ и МТИП номинальной мощностью 300—1000 *ква* (фиг. 187). Их принципиальная электрическая схема была показана на фиг. 158, *а*. Схема пневматического привода машины МТИП-300 приведена на фиг. 183, *е*. Новая серия машин МТПТ, а также машина МТИП-1000 имеют малоинерционный трехдиафрагменный привод механизма сжатия для рабочего хода верхнего электрода. Его дополнительный ход производят специальным электроприводом, поднимающим всю верхнюю электродную часть вместе с диафрагменным приводом. Характерны очень большие размеры сварочного трансформатора этих машин, вызываемые низкой частотой сварочных импульсов (при заданной индукции сечение сердечника обратно пропорционально частоте).

Сварочные прессы типа МРП (фиг. 188) мощностью 150—600 *ква* (табл. 25) отличаются от точечных машин серии МТП наличием дополнительных контактных плит *1* и *2* с взаимно-перпендикулярными Т-образными пазами для установки электродов-приспособлений при рельефной сварке. Прессы большой мощности снабжаются аппаратурой для осуществления пульсационного режима (см. фиг. 92, *а*). Для более равномерного распределения тока по площади свариваемых деталей иногда применяют прессы с двумя трансформаторами, симметрично расположенными относительно центра контактных плит; одновременное уменьшение мощности достигается при использовании контурного (кольцевого) трансформатора, вторичные витки которого присоединяют равномерно по периметру свариваемого изделия.



Фиг. 187. Машина МТИП-600.



Фиг. 188. Сварочный пресс МРП-200.

Таблица 25

Характеристика прессов для рельефной сварки

Параметры	Показатели	Единицы измерения	МРП-150 (МРП-200)	МРП-300 (МРП-400)	МРП-600
Электрические	Первичное напряжение	*в*	380	380	380
	Номинальная мощность	*ква*	150 (200)	300 (400)	600
	Номинальная продолжительность включения *ПВ*	%	20	20	20
	Номинальный ток в первичной цепи	*а*	394 (524)	788 (1048)	1576
	Число ступеней регулирования	шт.	16	16	16
	Пределы регулирования вторичного напряжения	*в*	4,05—8,1 (4,42—8,83)	4,63—9,27 (5,15—10,30)	6,8—13,6
	Ориентировочный наибольший сварочный ток	*а*	17 000 (23 000)	32 000 (38 000)	45 000
	Тип контактора	—	Асинхронный, игнитронный		
	Продолжительность включения сварочного тока	сек.	0,04—6,75	0,04—6,75 (возможен пульсационный режим)	0,65—20,0
Механические	Характер действия машины	—	Автоматический		
	Полезный вылет (до центра плит)	*мм*	340	340	300
	Суммарный ход верхней плиты	*мм*	100	120	150
	Привод механизма сжатия	—	Пневматический		
	Максимальное усилие сжатия	*кГ*	1250	3500	5500
	Число ходов в час максимальное	сварок/час	3900	2400	1800
	Габаритные размеры: высота	*мм*	2270	2550	3030
	ширина	»	785	840	900
	длина	»	1427	1610	1610
	Вес машины	*кг*	980 (1025)	1300 (1360)	2500

§ 4. МЕХАНИЗАЦИЯ СВАРКИ НА ОДНОТОЧЕЧНЫХ МАШИНАХ И ПРЕССАХ

Продолжительность сварочного цикла автоматических точечных машин и прессов относительно мала. Их производительность можно существенно повысить только механизацией вспомогательных операций. Часто при этом достигается и улучшение качества сварки за счет более правильной установки свариваемых деталей по отношению к электродам и более точного размещения точек. Обычно выполняются следующие вспомогательные операции: подача деталей в машину, их поддержание, установка и перемещение при сварке.

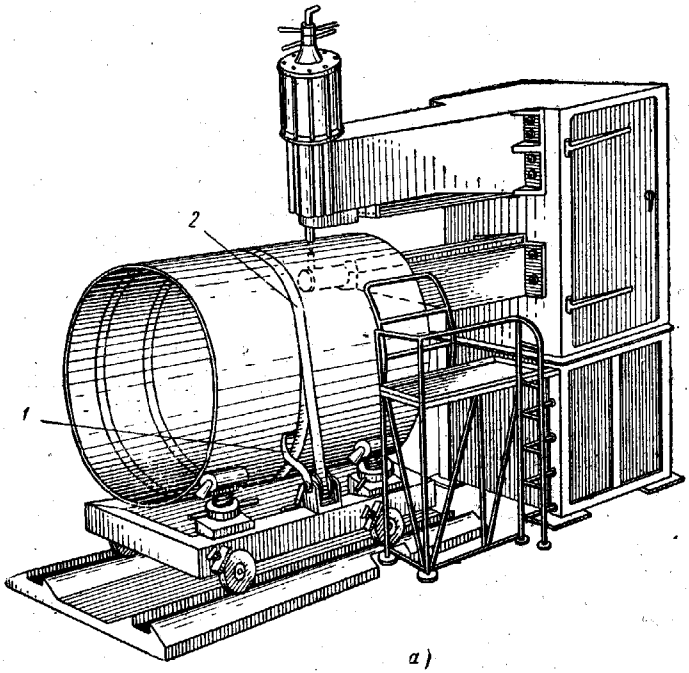
Поддерживающее приспособление при точечной сварке большой обечайки (фиг. 189, *а*), снабженное лентой *2* для ее вращения и указателем *1* для правильной установки с заданным шагом, существенно облегчает вспомогательные операции, хотя они и не механизируются.

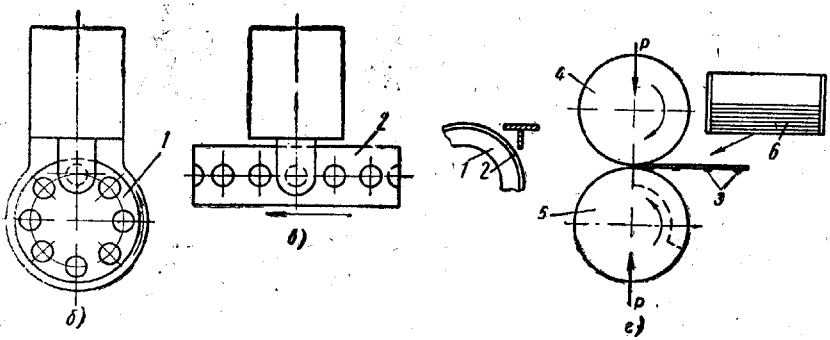
Еще больший эффект дают операторы, механизирующие установку и перемещение свариваемого узла. Такой оператор при сварке на ГАЗе роторов гидромуфты, представляющих собой штампованные чашки с 48 или 44 лопатками, каждая из которых приваривается тремя точками, более чем втрое повысил производительность труда сварщика.

Оператор, установленный на машине МТП-75, имеет массивное медное кольцо, в которое закладывается чашка гидромуфты с собранными лопатками. Это кольцо, являющееся промежуточным электродом, поворачивается на шаг лопаток синхронно с работой сварочной машины по циклу: сварка при неподвижном кольце, подъем верхнего электрода с поворотом кольца, снова сварка и т. д.

Более сложные механические операторы разработаны для поддержания, перемещения и установки в правильное положение больших панелей двойной кривизны из легких сплавов. Панель закрепляется на стенде, имеющем систему электрических щупов, воздействующих на двигатели его вертикального подъема таким образом, что поверхность панели в месте сварки всегда устанавливается перпендикулярно к оси электродов сварочной машины. Программное управление обеспечивает перемещение стенда с панелью на заданный шаг в продольном и поперечном направлениях. Существуют установки с программным управлением, обеспечивающие автоматическое выполнение всего комплекса вспомогательных операций при точечной сварке крупногабаритных изделий, включая периодическую зачистку электродов. Такие установки, оправдывающие себя в крупносерийном производстве, позволяют в 5—6 раз повысить производительность труда.

Для наблюдения за состоянием нижней поверхности свариваемых точек на крупногабаритных изделиях могут применяться телевизионные камеры.





Фиг. 189. Механизация точечной и рельефной сварки:

а — приспособление для вращения большой обечайки; *б* — вращающийся стол пресса; *в* — конвейер к прессу; *г* — схема бункерной подачи деталей при сварке тормозных колодок.

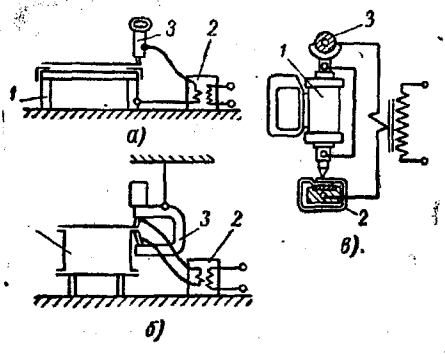
Большой эффект дает механизация подачи свариваемых деталей в машину. При рельефной сварке небольших изделий применяются вращающиеся столы *1* (фиг. 189, *б*) или конвейеры *2* (фиг. 189, *в*), перемещение которых синхронизировано с работой пресса. Роль сварщика при этом ограничивается установкой деталей в гнезда стола или конвейера. Все остальные операции, включая съем сваренных узлов, автоматизированы. Еще большее повышение производительности достигается при комплексной механизации заготовительных, сборочных и сварочных операций, например, при изготовлении тормозных колодок легкового автомобиля. Готовая колодка имеет тавровое сечение и состоит из ребра *1* (фиг. 189, *г*) и планки *2*, загибаемой в процессе рельефной сварки. В планке имеются рельефы *3*, по которым она сваривается с ребром по мере вращения дисковых электродов пресса *4* и *5*. Механизированная подача планки *2* из бункера *6* взамен ее установки вручную повысила производительность машины примерно с 400 до 600 сваренных колодок в час.

§ 5. ПЕРЕНОСНЫЕ ТОЧЕЧНЫЕ МАШИНЫ

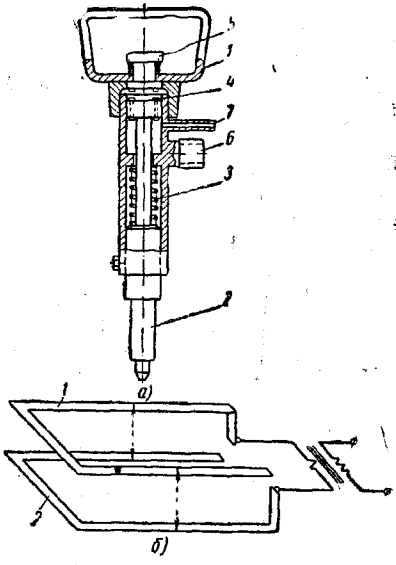
Часто подача большого изделия к стационарной точечной машине и его установка в нужное положение затруднены, а использование специализированных многоточечных машин не окупается из-за ограниченного объема производства. В этом случае выгодны различные переносные и подвесные установки. Следует отметить, что как переносные, так и многоточечные машины в основном разработаны для сварки стали. Большая потребляемая мощность и сложный цикл сжатия затрудняют (хотя, по-видимому, не исключают) их применение для сварки легких сплавов.

Существует два основных типа переносного оборудования для точечной сварки. В первом изделие собирается и сваривается в кондукторе *1* с медной шиной (фиг. 190, *а*), соединяемой с одним из выводов сварочного трансформатора *2*, второй вывод которого соединяется гибким проводом с рабочим инструментом, — пистолетом *3*, устанавливаемым в месте сварки. Иногда кондуктор отсутствует и провод от трансформатора присоединяется непосредственно к изделию. В оборудовании второго типа (фиг. 190, *б*) изделие *1* собирается свободно или в приспособлении, электрически не связанном с трансформатором *2*, оба вывода которого соединяются гибким бифилярным кабелем с рабочим инструментом — клещами *3*. Преимущество пистолета — высокая производительность (достигающая 90—120 точек в минуту), обусловленная его легкостью; недостатки — сложность кондуктора (а при его отсутствии — малая надежность сварки) и ограниченная толщина свариваемых деталей из-за малого усилия сжатия, обычно развиваемого сварщиком вручную. У распорных пистолетов *1* с пневматическим или гидравлическим приводом (фиг. 190, *в*) это ограниче-

ние отпадает. Изделие укладывается на шину кондуктора *2*. Пистолет упирается в шину *3*, параллельную кондуктору. Преимущества сварочных клещей — универсальность и отсутствие необходимости в сложных кондукторах; их недостатки — пониженная производительность труда и утомляемость сварщика из-за относительно большого веса клещей и жесткости кабеля. Применение клещей со встроенным малогабаритным трансформатором облегчает работу сварщика и удешевляет эксплуатацию из-за отсутствия быстро изнашивающегося охлаждаемого кабеля



Фиг. 190. Переносное оборудование для точечной сварки:
а — установка с ручным пистолетом; *б* — установка с клещами; *в* — установка с распорным пистолетом.



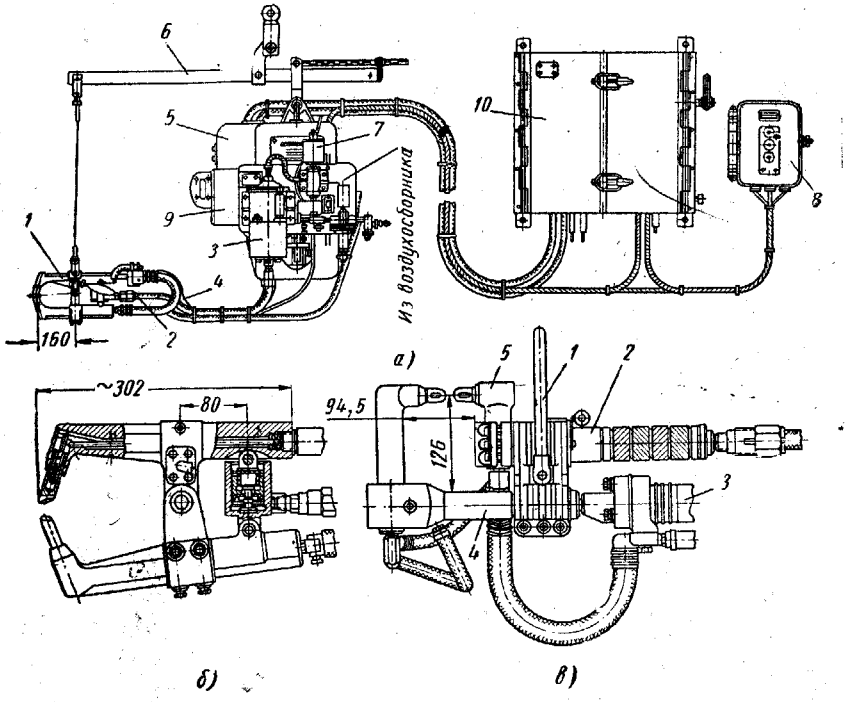
Фиг. 191. Сварочный пистолет (*а*) и схема устройства шин для получения контура постоянных размеров при сварке распорным пистолетом (*б*).

(ток сетевого напряжения подводят к клещам тонким проводом).

При нажатии на рукоятку *1* сварочного пистолета (фиг. 191, *а*) электрод с держателем *2* сжимает пружину *3*. По достижении заданного усилия контактная колодка *4* замыкает цепь управления. Если при этом нажата кнопка *5*, то включается сварочный ток на время, регулируемое отдельно размещенным реле. Гибкий провод от трансформатора крепится к втулке *6*, а провода цепи управления вводятся в трубку *7*. В массовом производстве заменяют мало надежный пистолет с ручным нажатием распорными пистолетами (см. фиг. 190, *в*). Их применение требует установки в кондукторе дополнительных жестких шин *3*, что особенно удобно, если эти шины токоведущие, так как в этом случае пистолет не имеет громоздких кабелей и легко устанавливается в требуемое положение. В зависимости от этого положения обычно изменяются размеры сварочного контура, а следовательно, и его сопротивление. Это нарушает

стабильность сварочного режима. Иногда специальная форма шин *1* и *2* (фиг. 191, *б*) позволяет избежать изменения размеров контура при перемещении распорного пистолета (в положения, показанные пунктиром).

Подвесные точечные машины (клещи) имеют встроенный или отдельно расположенный трансформатор. Серийные подвесные машины выпускают с раздельным трансформатором (фиг. 192, *а*).



Фиг. 192. Подвесная машина МТПГ-75:
а — общий вид; *б* — клещи с радиальным и *в*—с прямолинейным ходом.

Машина МТПГ-75 состоит из клещей *1* (нескольких типов); шланга *2*, по которому масло под давлением до 100 *ат* поступает в цилиндр клещей из пневмогидравлического преобразователя давления *3* (см. фиг. 183, *а*); бифилярного кабеля *4*, присоединяющего клещи к трансформатору *5;* подвески *6* для подъема и опускания клещей; электроклапана *7*; электронного регулятора времени *8*; секционного переключателя *9* и шкафа *10* с игнитронным контактором типа КИА.

Конструкция клещей определяется размерами и формой свариваемых деталей. Клещи типа КТГ-75-3 с радиальным ходом (фиг. 192, *б*) имеют полезный вылет 140 *мм*. Они развивают на электродах усилие до 250 *кГ* и весят без кабеля и шлангов 9 *кг*.

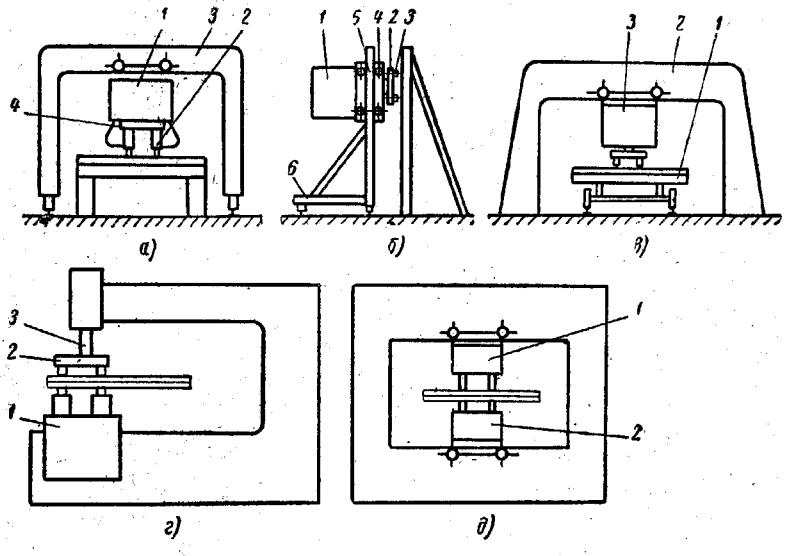
Клещи типа КТГ-75-2 с прямолинейным ходом (фиг. 192, *в*) и вылетом 125 *мм* развивают усилие до 200 *кГ*. Эти клещи поддерживаются подвеской *1* и направляются при сварке рукояткой *2*, внутри которой размещен гидроцилиндр. Ток подведен в клещам кабелем *3*, один провод которого присоединен к скобе *4*, а второй — к головке *5*.

Вторичное напряжение машины МТПГ-75 регулируется 16 ступенями в пределах 5,06—19,0 *в*. Продолжительность включения тока изменяется от 0,04 до 0,75 сек. При автоматическом цикле возможна сварка малоуглеродистой стали толщиной до 1,5 + 1,5 *мм* при максимальном темпе 80—120 сварок в минуту. Аналогичные клещи МТПП-75 имеют более простой пневматический привод. Клещи со встроенным трансформатором (К-165) при мощности 25 *ква* пригодны для сварки стали толщиной 2+2 *мм*. Их вторичное напряжение регулируется в пределах 2,12—3,58 *в* автотрансформатором, установленным отдельно. Вес клещей с подвеской меньше 20 *кг*.

§ 6. ДВУХ- И МНОГОТОЧЕЧНЫЕ МАШИНЫ

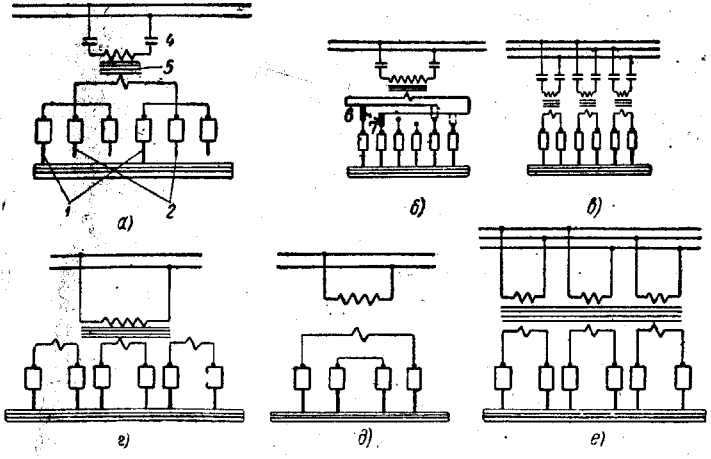
Двухточечные машины для односторонней сварки удобны в серийном производстве крупногабаритных изделий из стали толщиной до 1,5—2 *мм*. Их строят по одной из следующих схем: а) изделие (например, боковина вагона, состоящая из листов и привариваемых к ним штампованных элементов) укладывается на медный лист или шины неподвижного стеллажа (фиг. 193, *а*); трансформатор *1* с двумя головками *2* устанавливается на портале *3* и перемещается относительно изделия в продольном и поперечном направлениях, иногда с поворотом траверсы *4* с головками на 90° вокруг вертикальной оси; б) изделие ставится вертикально (фиг. 193, *б*); трансформатор *1* и траверса *2* с головками *3* крепятся на каретке *4*, перемещающейся по направляющей *5* велосипедного крана *6*; последний перемещается вдоль изделия; преимущество такой установки уменьшение необходимой площади цеха; в) изделие размещают на подвижном кондукторе *1* (фиг. 193, *в*) под неподвижным порталом *2*, по которому движется каретка *3* с трансформатором и сварочными головками; преимущества этой установки — облегчение организации потока и упрощение портала; ее недостатки — сложность кондуктора и большая занимаемая площадь. Иногда двухточечные машины имеют станину открытого типа с вылетом 500—1200 *мм* (фиг. 193, *г*). Трансформатор *1* располагают под электродами, что обеспечивает небольшие размеры контура. Верхние электроды крепят на шарнирной траверсе *2*, прижимаемой штоком *3*. Траверса замыкает сварочную цепь.

При толщине свариваемых деталей более 2 *мм* целесообразен переход от односторонней к двухсторонней двухточечной сварке



Фиг. 193. Схемы машин для двухточечной сварки:

а — с подвижным порталом; *б*—с велосипедным краном; *в*—с подвижным кондуктором; *г*—с нижним расположением трансформатора; *д*—с двумя трансформаторами.



Фиг. 194. Схемы питания многоточечных машин:

а—одним трансформатором с последовательным зажатием электродов; *б*—то же, с одновременным зажатием; *в*—серией трансформаторов; *г*—трансформатором с параллельными вторичными витками; *д*—с последовательным присоединением к трансформатору двух пар электродов; *е*—трехфазными трансформаторами.

(фиг. 193, *д*), при которой в результате меньшего шунтирования тока заметно повышается стабильность качества сварки (см. гл. IV, § 5). Перемещения трансформаторов *1* и *2* кинематически связаны между собой.

Расстояние между одновременно свариваемыми точками в большинстве двухточечных машин регулируется. Во избежание чрезмерного шунтирования это расстояние не должно быть меньше 40—50 *мм*. Электроды имеют самостоятельные нажимные устройства, гарантирующие равенство развиваемых на них усилий.

Наиболее производительна сварка на специализированных многоточечных машинах, получающих все большее применение в массовом производстве (автомобильной промышленности, вагоностроении, производстве арматуры для железобетона и др.). В большинстве случаев в этих машинах используется принцип двухточечной сварки с односторонним или двухсторонним подводом тока (последний при толщине свариваемой стали более 1,5 *мм*). Применяют три основных типа многоточечных машин:

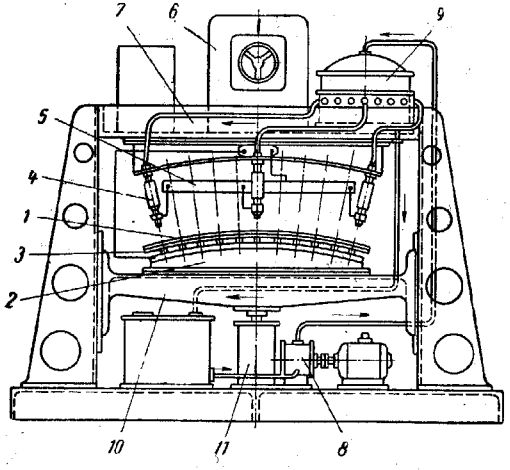
а) однотрансформаторные машины с поочередным зажатием электродов (сначала зажимается пара электродов *1*, фиг. 194, *а*, включается контактор *4* в первичной цепи трансформатора *5* и свариваются две точки, затем электроды *1* поднимаются и опускаются электроды *2*; цикл сварки повторяется; далее опускаются электроды *3*, и т. д.); их преимущество — переключение тока в первичной цепи; недостатки — сложное управление механизмами поочередного сжатия электродов и значительные деформации плохо закрепленного при сварке изделия;

б) однотрансформаторные машины с одновременным зажатием всех электродов (фиг. 194, *б*). Их преимущества — малые сварочные деформации хорошо закрепленного изделия и простое управление механизмами сжатия; недостатки — переключение значительного тока непосредственно в сварочной цепи переключателем *6—7*;

в) многотрансформаторные машины (фиг. 194, *в*), в которых все электроды зажимают изделие одновременно, а сварка производится одновременно во всех точках или последовательно большими группами (для уменьшения пика потребляемой мощности).

Многотрансформаторная схема наиболее прогрессивна. Ее преимущества: каждый трансформатор располагается близко к присоединенным к нему электродам, что уменьшает его мощность и размеры благодаря малому сварочному контуру; возможна индивидуальная настройка режима сварки для каждого трансформатора; все точки свариваются одновременно (или большими группами), что повышает производительность процесса по сравнению с производительностью однотрансформаторных машин; наличие нескольких трансформаторов позволяет равномерно нагрузить трехфазную сеть; одновременное зажатие всех электродов уменьшает деформации свариваемого изделия.

Недостаток многотрансформаторных машин — повышенная стоимость и трудность размещения трансформаторов. Для уменьшения необходимого количества и размеров трансформаторов: а) вместо одного вторичного витка у каждого трансформатора делают 2—4 параллельных, электрически не связанных витка, каждый из которых присоединяется к своим электродам (фиг. 194, *г*); мощность такого трансформатора соответственно растет, однако благодаря неизменному сечению сердечника, определяемому напря-

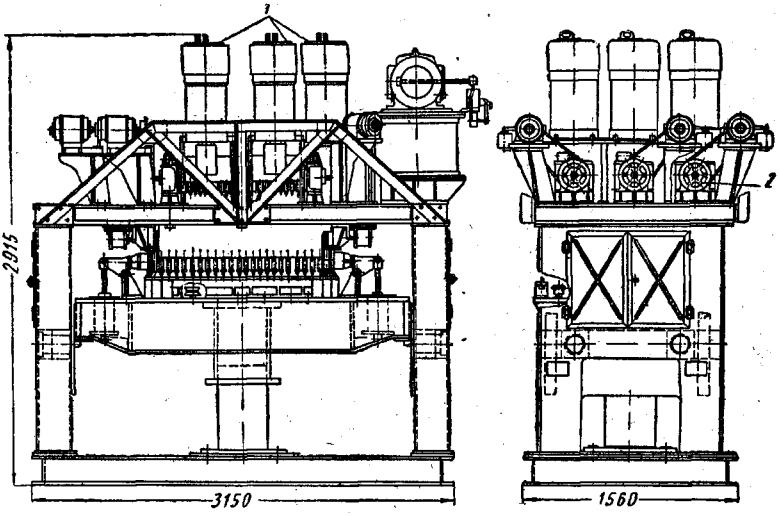


Фиг. 195. Однотрансформаторная многоточечная машина с последовательным зажатием электродов.

жением $U_{2.0}$ (это напряжение при наличии параллельных витков не повышается), его размеры увеличиваются незначительно; б) вместо одной пары электродов последовательно включаются две пары (фиг. 194, *д*); при этом мощность трансформатора увеличивается менее, чем вдвое, а его размеры растут приблизительно на 15—20%; в) применяются трехфазные трансформаторы, разработанные во ВНИИЭСО, к каждому из которых присоединяются три пары электродов (фиг. 194, *е*); благодаря рациональному использованию активных материалов размеры и вес трехфазного трансформатора значительно меньше суммарных габаритов и веса трех заменяемых им однофазных; г) иногда повышается частота тока, питающего сварочный трансформатор; при этом уменьшаются его габариты из-за уменьшения размеров сердечника (Институтом им. Е. О. Патона разработана малогабаритная сварочная головка с трансформатором, питающимся током 2500 *гц*).

В однотрансформаторной машине с поочередным зажатием электродов (фиг. 195) свариваемое изделие *1* укладывается на шину *2* со вставными электродами *3*. Сварочные головки *4* укрепле-

ны на общей шине *5*, соединенной с трансформатором *6*, установленным на станине *7*. Насос *8* поочередно подает масло в головки *4* через вращающийся распределитель *9*. Для облегчения установки изделия стол *10* может подниматься пневматическим устройством *11*. Контактная поверхность нижних электродов определяет форму сваренного изделия. Возможна сварка на шине без вставных электродов. Однако подгонка небольших вставок гораздо лег-



Фиг. 196. Однотрансформаторная машина ГАЗа с одновременным зажатием всех электродов (машина предназначена для сварки пола автомобиля ГАЗ-51 с перегородками в 100 точках).

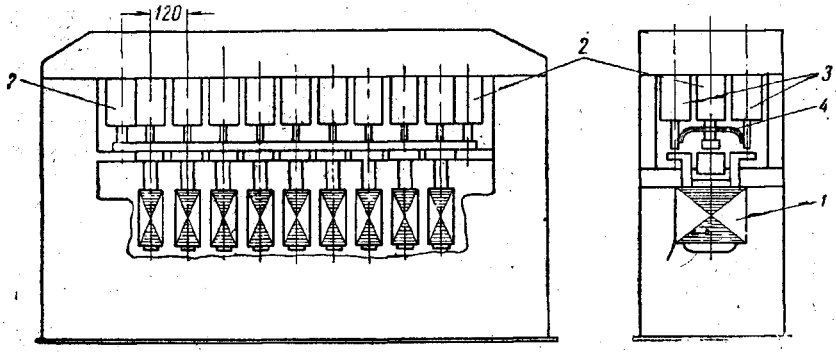
че, чем всей поверхности шины. При сварке взаимозаменяемых узлов сложной формы, например узлов автомобиля, рабочая поверхность нижних электродов проверяется и подгоняется по специальному шаблону (мастер-макету).

Особенностью однотрансформаторных машин с одновременным зажатием всех электродов является распределитель тока, поочередно подключающий к трансформатору ту или иную пару электродов. Такой распределитель обычно рассчитан на включение 10—12 пар электродов. В его немагнитном силуминовом корпусе ходовым винтом перемещается каретка по направляющим. Винт вращается двигателем через клиноременную передачу. При движении каретки ее боковые ролики поочередно нажимают на толкатели, установленные в корпусе с шагом 40 *мм*. Толкатели через пружины передают усилие до 160 *кГ* на контакты, закрепленные на гибких шинах.

При одновременной сварке на изделии более 20 точек в машине устанавливается несколько трансформаторов с соответствующим

количеством распределителей тока. Например, машина ГАЗа для сварки в 100 точках пола кабины грузового автомобиля с перегородками (фиг. 196) имеет пять трансформаторов *1* с пятью распределителями тока *2*. Производительность этой машины достигает 12 000 точек в час.

Примером многотрансформаторной машины может служить машина МТМЛ-9×30 для сварки внахлестку двумя рядами точек концов тонкой ленты ($\delta = 0{,}2 \div 0{,}6$ *мм*) шириной от 500 до 1000 *мм*. Девять сварочных трансформаторов *1* этой машины



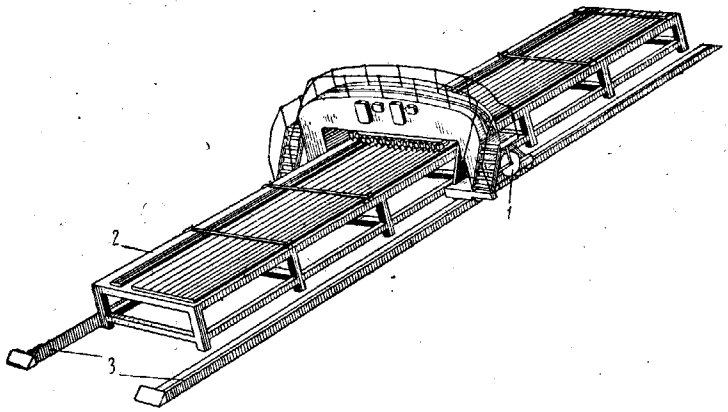
Фиг. 197. Схема многотрансформаторной машины МТМЛ-9×30 для сварки внахлестку концов стальной ленты (завод «Электрик»).

(фиг. 197) питаются одним трехфазным трансформатором с шестнадцатью ступенями регулирования. После установки и закрепления концов ленты прижимной планкой с помощью двух пневматических цилиндров *2* воздух подается в восемнадцать цилиндров *3*, прижимающих к ленте верхние электроды, попарно соединенные гибкими перемычками *4*. Одновременно свариваются восемнадцать точек.

На автомобильных заводах многочисленные машины иногда устанавливаются в общих поточных линиях с штамповочными прессами. При этом производятся последовательные операции штамповки деталей, их сборки и сварки с очень высокой производительностью, соответствующей производительности штамповочных прессов. Многоточечная машина в такой линии должна: а) работать в ритме с штамповочными прессами, что возможно только при механизации установки и съема свариваемых узлов; б) быстро переналаживаться со сварки одного узла на другой, так как штамповочные прессы всегда поочередно (партиями) штампуют детали нескольких узлов. Время переналадки сварочной машины не должно превышать времени, необходимого на смену штампов у пресса. Для этого в многоточечной машине все сварочные головки с электродами и трансформаторами монтируются

на двух сменных плитах, образующих как бы нижний и верхний штампы. Эти штампы соединяются друг с другом установочными колонками и могут в полностью собранном виде сниматься и устанавливаться на сварочную машину специальным передвижным краном. При переналадке приходится только сменить штампы и пересоединить внешние коммуникации (подвод тока, воздуха, воды и т. д.).

При сварке на одном изделии большого количества точек возможны два случая: точки размещаются в периодически повторяю-



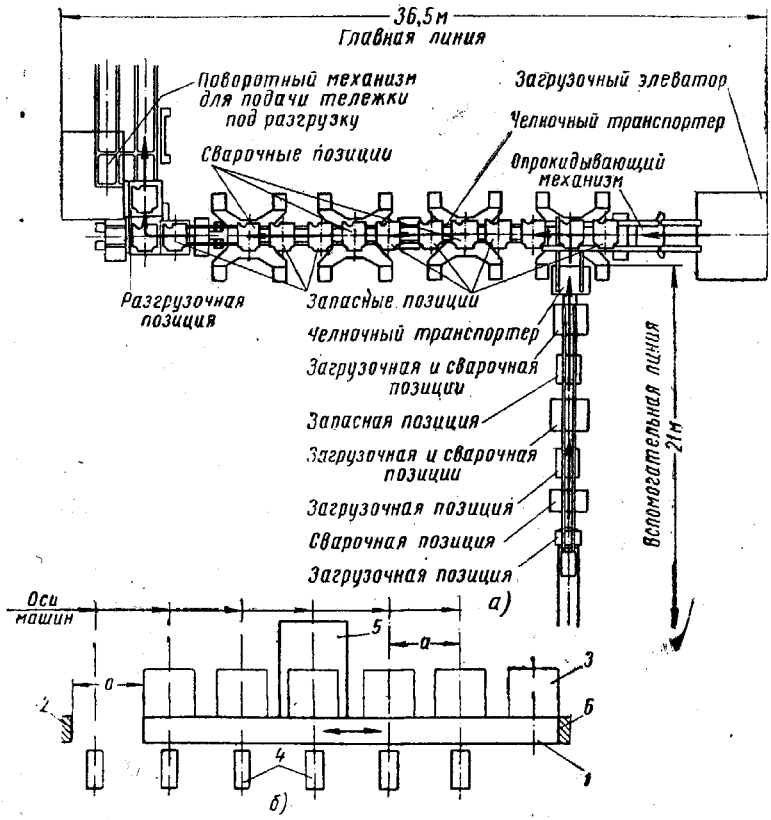
Фиг. 198. Схема многоточечной машины с перемещающимся порталом для сварки боковины вагона.

щемся порядке (например, в боковине пассажирского вагона, обшивке кузова электровоза) или периодичность их размещения отсутствует (например, в полу автомобиля). В первом случае в многоточечной машине последовательно свариваются отдельные группы точек. При этом машина *1* перемещается вдоль изделия *2* по рельсам *3* (фиг. 198) или изделие протягивается через неподвижную машину. Например, для двухсторонней двухточечной сварки боковых стенок кузова тепловоза ВНИИЭСО разработана стационарная многоточечная машина МТМТ-10 × 240 с 10 трехфазными трансформаторами (по пяти сверху и снизу). Каждый из трансформаторов подключен к трем парам электродов. Одновременно могут свариваться 30 точек.

Во втором случае, в особенности если сварка чередуется со сборкой и требуется очень высокая производительность, целесообразно расчленение операции с установкой нескольких относительно несложных многоточечных машин, объединенных в поточную или автоматическую линию. На фиг. 199, *а* показана схема такой линии, установленной на одном из зарубежных автозаводов, для

сварки 500 узлов пола автомобиля в час. На этой линии, объединяющей семь сварочных машин и обслуживаемой несколькими рабочими, за час сваривается около 185 000 точек.

Точная установка изделия в каждой машине автоматической линии обеспечивается челночным транспортером. Он представля-

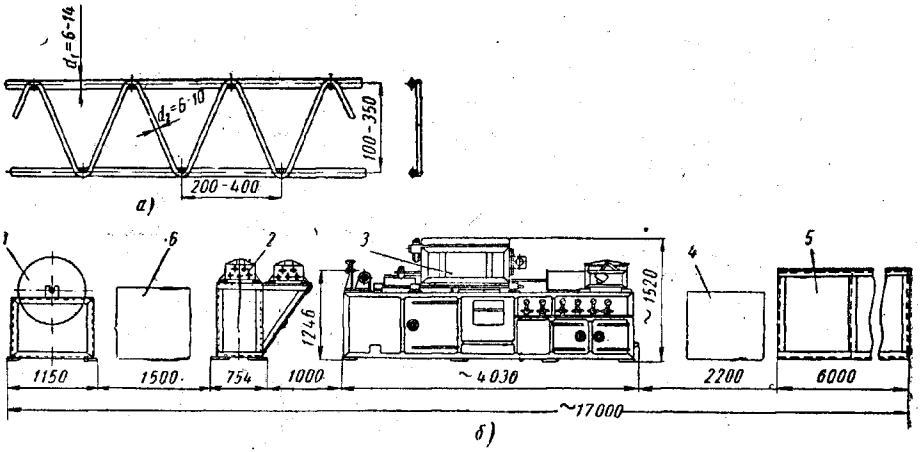


Фиг. 199. Схема автоматизированной сборочно-сварочной линии для изготовления пола легкового автомобиля (*а*) и схема челночного конвейера (*б*).

ет собой жесткую балку *1* (фиг. 199, *б*), совершающую возвратно-поступательные движения на величину межцентрового расстояния машин *a*, строго одинакового для всех позиций линии. При движении челнока влево до упора *2* все закрепленные на нем изделия *3* перемещаются на один шаг и совмещаются с осями соответствующих машин. Пневматические выталкиватели *4* снимают изделия с челнока и вводят их в рабочее пространство сварочных машин. *5*. Челнок возвращается до упора *6* вправо. После очередной сварочной операции изделия опускаются на челнок и вновь

закрепляются на нем. Следующий ход челнока влево перемещает изделия на очередную позицию и т. д. Следует отметить, что при сварке пола автомобиля на обычной многоточечной машине ее производительность составляет всего около 15 000 точек в час, что соответствует изготовлению 60 узлов в час.

В последнее время многоточечные машины особенно широко применяются при сварке вкрест арматурных каркасов и сеток для



Фиг. 200. Арматурные фермочки (*а*) и автоматическая линия с машиной МТМФ-2 × 150 (*б*) для их изготовления (завод «Электрик»).

железобетона, где использование специализированных машин быстро окупается благодаря массовому производству железобетонных изделий. Сочетание этих машин с вспомогательным оборудованием для правки, очистки и резки проволоки позволяет создать высокопроизводительные автоматические линии. Схема такой линии для изготовления арматурных фермочек (фиг. 200, *а*) показана на фиг. 200, *б*. Очищенная проволока диаметром 6—14 *мм* сматывается с трех барабанов *1* и подается через правильные ролики *2* в машину *3* типа МТМФ-2 × 150 с двумя трансформаторами мощностью 150 *ква*. Машина автоматически загибает среднюю проволоку в «змейку», подает продольные проволоки и «змейку» к электродам, фиксирует их положение и сваривает пересечения, перемещает фермочку на один шаг и после сварки заданного количества пересечений дает команду на гильотинные ножницы *4* для отрезки. Готовые фермочки поступают на приемный стол *5*. Для наращивания стержней при непрерывном процессе используется стыковая машина *6*. Линия выпускает в минуту около 2 *м* готовых фермочек.

Для сварки плоских сеток шириной до 2350 *мм* из продольных стержней диаметром 3—12 *мм* и поперечных проволок диаметром

3—8 *мм* при шаге, регулируемом в пределах 100—300 *мм*, выпускаются многотрансформаторные машины типа АТМС-14×75-4, снабженные двенадцатью трансформаторами общей мощностью 900 *ква*. Возможно включение этих трансформаторов группами по шесть, что вдвое уменьшает пиковую мощность при небольшом снижении производительности. Машина сваривает сетку из предварительно очищенных и намотанных на барабаны продольных проволок и из предварительно очищенных, выправленных и нарезанных на заданную длину поперечных проволок. Сетка может сматываться в рулон или разрезаться гильотинными ножницами на отрезки требуемой длины. Вверху на станине смонтировано 12 пневматических цилиндров с колодками, попарно замыкающими сварочные цепи 24 нижних электродов, соединенных с 12 трансформаторами. Продольные проволоки поступают через направляющие устройства. Поперечные проволоки по одной захватываются из бункера и подаются в приемник, а из него на электроды. После сварки специальная каретка протягивает сетку на один шаг поперечных проволок, и цикл операций повторяется. Минимальная продолжительность полного цикла сварки составляет около 5 сек. и при этом производительность машины достигает 4 пог. *м* сетки в минуту. Следует отметить, что такая производительность при сварке сеток не предельная. Существуют машины с 44 трансформаторами, одновременно сваривающими в 88 точках пересечения четырех поперечных проволок диаметром до 5 *мм* с 22 продольными проволоками такого же диаметра. При продолжительности цикла менее 1 сек. и шаге проволок 150 *мм* машина сваривает 40 пог. *м* сетки в минуту.

Наиболее мощная многоточечная машина (МТМС-15 × 450-3), предназначенная для сварки в 15 точках тяжелых арматурных сеток из продольных стержней диаметром до 100 *мм* и поперечных диаметром до 50 *мм*, имеет общую мощность 6750 *ква*. Максимальное усилие сжатия каждой пары электродов достигает 12 800 *кГ*. В машине применена обычная схема двухсторонней одноточечной сварки каждого пересечения стержней.

ГЛАВА XIV

МАШИНЫ ДЛЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ И ТРУБОСВАРОЧНЫЕ СТАНЫ

§ 1. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИН ДЛЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

Машины для роликовой сварки состоят из станины или корпуса, механизма сжатия электродов, механизма взаимного перемещения электродов и свариваемых деталей, сварочного контура и трансформатора с пускорегулирующей аппаратурой. Они классифицируются:

1) по назначению: а) общего назначения и б) специализированные;

2) по числу одновременно свариваемых швов: а) машины для сварки одним швом; б) двумя швами и в) несколькими швами;

3) по способу подвода тока: а) для двухсторонней и б) односторонней сварки;

4) по направлению свариваемого шва: а) для сварки продольных швов; б) для сварки поперечных швов; в) универсальные машины и г) машины для обварки фланцев;

5) по способу взаимного перемещения электродов и изделия: а) с перемещением изделия между электродами, вращающимися вокруг неподвижных осей; б) с неподвижным изделием, закрепленным на электроде-оправке, и катящимся по нему электродом; в) с перемещением изделия, закрепленного на электроде-оправке, и вращением второго, дискового электрода вокруг неподвижной оси;

6) по приводу механизма сжатия: а) с педально-грузовым или пружинным приводом; б) с моторно-кулачковым приводом и в) с пневматическим приводом;

7) по приводу механизма перемещения свариваемых деталей: а) с непрерывным и б) с шаговым перемещением;

8) по способу установки: а) стационарные и б) подвесные машины;

9) по способу питания: а) однофазные переменного тока (при непрерывном или прерывистом его включении) и б) импульсные.

§ 2. МЕХАНИЗМЫ СЖАТИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СВАРИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

В машинах для роликовой сварки применяются такие же механизмы сжатия, как в точечных машинах: при сварке очень тонких деталей — педально-грузовой или пружинный механизм (см.

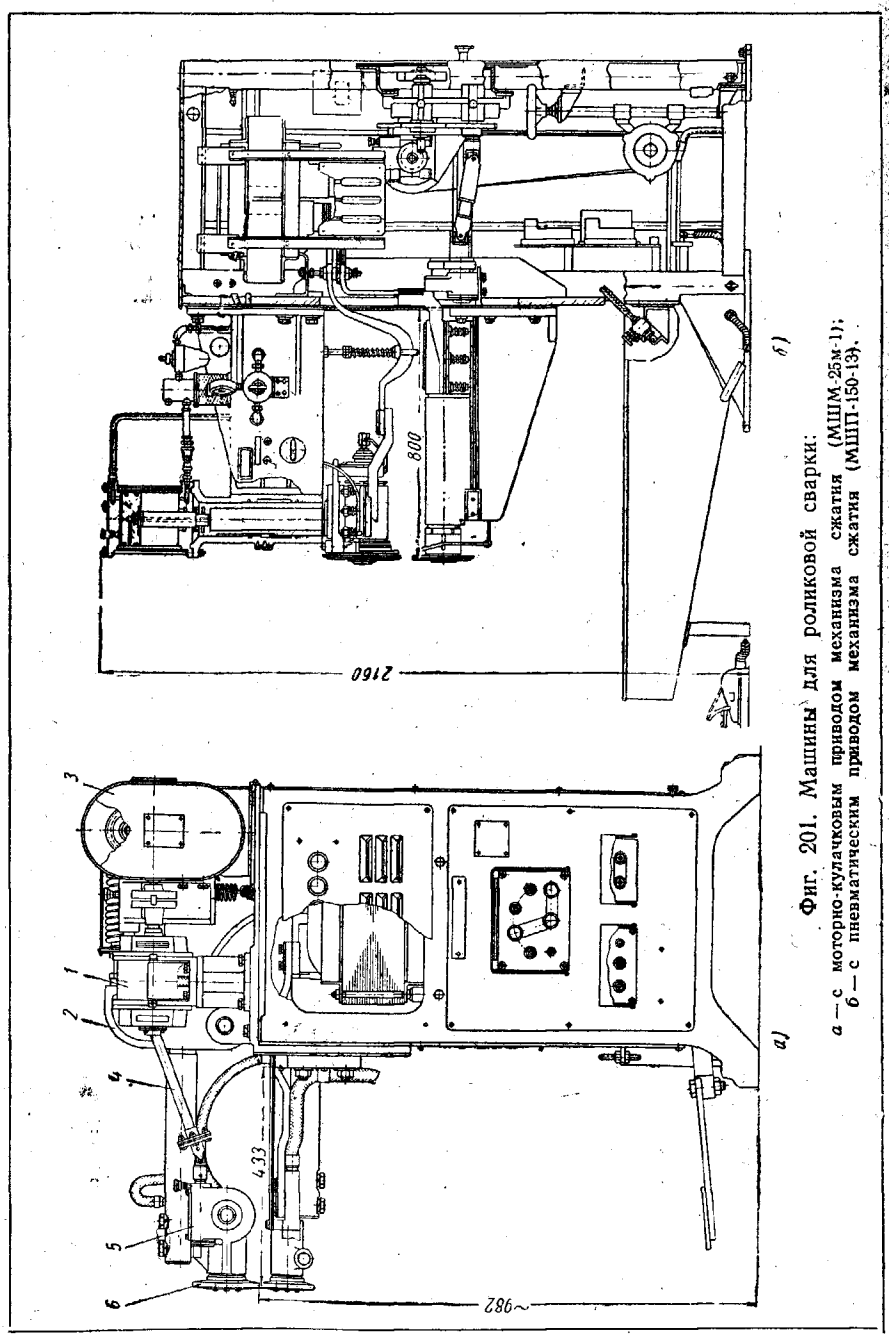
фиг. 181, *а*); при сварке деталей средней толщины из малоуглеродистой стали — моторно-кулачковый (см. фиг. 182); при сварке таких же деталей из легированных сталей и легких сплавов — как правило, пневматический.

Важнейший механизм роликовой машины — привод вращения дисковых электродов. При сварке продольных швов изделие обычно имеет поступательное движение, при котором нетрудно добиться равномерной его скорости. Поэтому при продольной сварке достаточно иметь принудительное вращение одного электрода; при этом второй (холостой) электрод вращается силами трения между ним и движущимся изделием. При сварке поперечных швов (фиг. 201) изделие обычно имеет вращательное движение. При повороте тяжелого изделия возникают большие инерционные силы, ведущие к его проскальзыванию между электродами, сопровождаемому прожогами. Поэтому в машинах для сварки поперечных швов полезен принудительный привод обоих электродов.

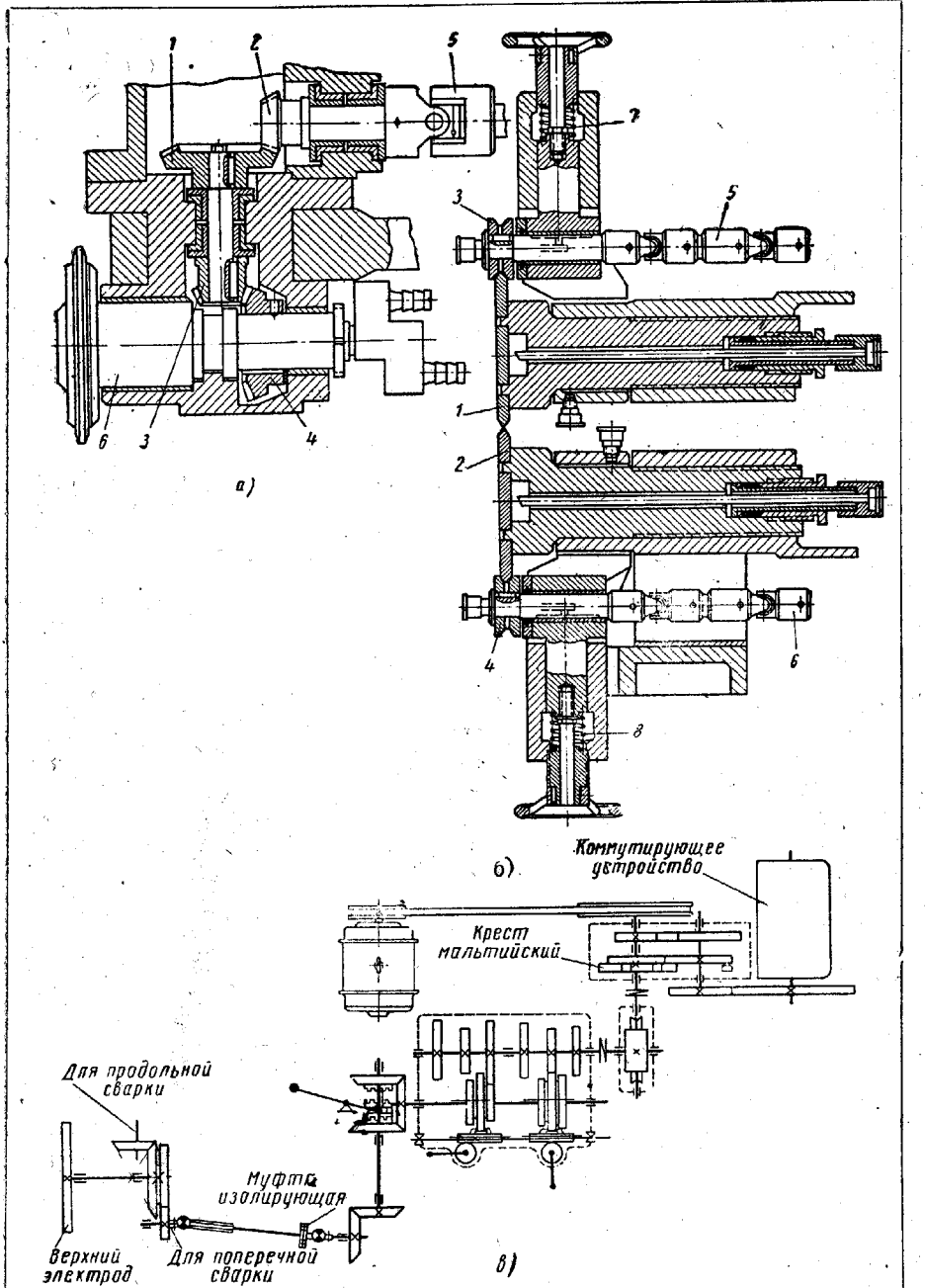
Привод одного электрода осуществляется через вал, на котором он закреплен. При этом износ приводного электрода изменяет линейную скорость на его рабочей поверхности, т. е. скорость сварки (при неизменном числе оборотов), но не вызывает нежелательного проскальзывания электродов. При принудительном приводе обоих электродов обязательно равенство их линейных скоростей. Несоблюдение этого условия ведет к усиленному износу электродов и ухудшению качества швов.

В машинах общего назначения как для сварки продольных, так и для сварки поперечных швов применяется простая кинематическая схема с приводом одного электрода: при сварке поперечных швов чаще приводным делают нижний электрод малого диаметра, так как большой верхний электрод легко вращать силами трения; при сварке продольных швов приводным обычно является большой верхний электрод, что уменьшает габариты нижнего электродного узла и позволяет надевать на него и сваривать обечайки небольшого диаметра. Это допустимо, поскольку при сварке продольных швов, как указывалось выше, опасность проскальзывания электродов невелика.

В машинах с моторно-кулачковым механизмом сжатия этот механизм и привод вращения электродов осуществляются одним двигателем *1* (фиг. 201, *а*). Его вал соединяется через червячный редуктор *2*, сменные шестерни *3*, карданный вал *4*, конические шестерни *5* с валиком, на конце которого закреплен электрод *6*. При нажатии педали зубчатая муфта включает кулачковый вал и создается давление на электродах, сохраняющееся до освобождения педали при окончании сварки (как при неавтоматическом цикле точечной сварки, см. фиг. 182, *б*). В более совершенных машинах с пневматическим приводом механизма сжатия (фиг. 201, *б*) обычно двигатель привода вращения электродов соединяется с карданным ва-



Фиг. 201. Машины для роликовой сварки:
а — с моторно-кулачковым приводом механизма сжатия (МШМ-25м-1);
б — с пневматическим приводом механизма сжатия (МШП-150-13).



Фиг. 202. Привод электродов:

а — коническими шестернями; *б* — стальными шарошками; *в* — с мальтийским крестом (при шаговой сварке).

лом через бесступенчатый регулятор скорости. Карданный вал *5* (фиг. 202, *а*) соединяется с валиком электрододержателя *6* непосредственно (в машинах для сварки поперечных швов) или через систему конических шестерен *1—4* (в машинах для продольной сварки). Такая конструкция очень удобна в универсальных машинах, в которых переход от сварки продольного шва к сварке поперечного достигается поворотом верхней электродной головки на 90° вокруг своей вертикальной оси (этот переход сопровождается несложной заменой нижнего хобота с неприводным электродом).

При принудительном вращении обоих электродов *1* и *2* их привод осуществляется стальными каленными шарошками *3* и *4* с накаткой, вращаемыми карданными валами *5* и *6* (фиг. 202, *б*). Шарошки прижимаются к электродам пружинами *7* и *8*. Диаметр шарошек в работе практически не изменяется, поэтому обеспечивается постоянная и одинаковая окружная скорость электродов, не зависящая от степени их износа. Шарошки непрерывно зачищают рабочую поверхность электродов за счет снятия с нее небольшой стружки. Это особенно важно при сварке стали с покрытиями, поэтому машины (типа МШПБ) для сварки бензобаков из стали с защитным покрытием имеют привод с шарошками. Шарошки располагаются так, чтобы частицы меди, снимаемые с электродов, падали на изделие со стороны уже сваренного шва. Неудобство привода шарошками — значительные его размеры, затрудняющие сварку внутри небольших изделий.

При шаговой сварке в кинематическую схему машины вводится мальтийский крест (фиг. 202, *в*) или другое устройство для прерывистого вращения электродов.

Работоспособность роликовой машины сильно зависит от надежности подвижных контактов ее сварочного контура. В настоящее время широко применяется апробированный практикой скользящий контакт с постоянным натягом, разгруженный от действия сил нажатия на электроды (см. фиг. 129, *в*). При такой конструкции контакта достигается постоянство его сопротивления и исключаются перекосы и заедание электродов.

§ 3. РОЛИКОВЫЕ МАШИНЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

К ним можно отнести четыре группы машин для сварки продольных или поперечных швов с двумя дисковыми электродами:

а) конденсаторные машины (например, МШК-3) для сварки очень тонкого материала;

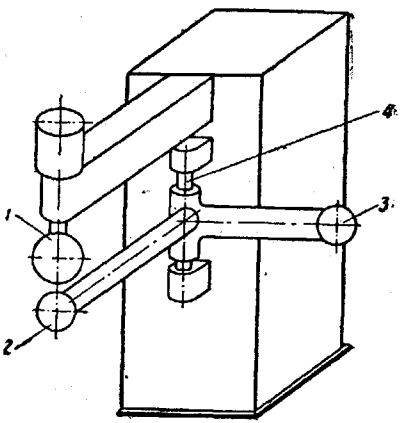
б) машины переменного тока для непрерывной сварки неответственных изделий из малоуглеродистой стали толщиной до 1 *мм* (машины типа МШМ-25 с моторно-кулачковым приводом механизма сжатия, см. фиг. 201, *а*, работающие без прерывателя);

в) машины переменного тока мощностью 50—200 *ква* для прерывистой сварки изделий из малоуглеродистой и легированной ста-

лей, снабженные синхронными игнитронными прерывателями (с моторно-кулачковым или пневматическим приводом механизма сжатия, см. фиг. 201, *б*);

г) машины для шаговой сварки деталей из легких сплавов (толщиной до 2,5+2,5 *мм* и более) чередующимися по направлению импульсами выпрямленного трехфазного тока (см. § 4, гл. XI).

Характеристика этих машин приведена в табл. 26. Машины МШПР-300/1200-2 и МШШИ-400-2 — универсальные, остальные машины серийного выпуска предназначены только для сварки продольных или поперечных швов. Следует отметить, что в зарубежной практике шире используются универсальные машины, что иногда позволяет заменить две машины одной. Имеются машины, в которых верхняя головка *1* (фиг. 203) с приводным электродом поворачивается на 90° вокруг вертикальной оси, а два сменных нижних хобота *2* и *3* с неприводными электродами, закрепленные под углом 90°, могут быстро устанавливаться в требуемое положение на оси *4*.



Фиг. 203. Схема универсальной машины для роликовой сварки с поворотным нижним хоботом.

§ 4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

К ним, в частности, относятся следующие типы машин:

а) подвесные машины типа клещей для роликовой и роликоточечной сварки тонких стальных деталей ($\delta = 0{,}8 \div 1{,}0$ *мм*); такие клещи разработаны и успешно применяются на ГАЗе при сварке кузова автомобиля;

б) машины для односторонней сварки двух швов. Например, машины МШПЛ-100/1000 сваривают внахлестку концы стальной ленты толщиной 0,2—0,9 *мм* при ее ширине до 1000 *мм* с расстоянием между параллельными швами, равным 200 *мм*. Сварочный ток от расположенного внизу машины трансформатора *1* (фиг. 204, *а*) подводится к двум медным брусьям с нижними электродами *2*, на которые укладываются и прижимаются специальными пневматическими прижимами концы свариваемой ленты. По верхней балке портала *3* перемещается каретка *4* с электродами *5* в виде катушки, замыкающими сварочную цепь. Скорость роликоточечной сварки составляет 4—8 *м/мин*. По этому же принципу за рубежом работают портальные машины для приварки листов крыши пасса-

Таблица 26

Характеристика машин общего назначения для роликовой сварки

Параметры	Показатели	Единицы измерения	Конденсаторная сварка тонких деталей	Непрерывная сварка малоуглеродистой стали	Прерывистая сварка						Шаговая сварка
			МШК-3-2	МШМ-25М-I МШМ-25М-II	МШМ-50М-I МШМ-50М-II	МШП-100	МШП-150	МШП-200	МШПБ-150-11	МШПР-300 1200-2	МШШИ-400-2*
Электрические	Первичное напряжение	*в*	220	220 или 380	220 или 380	220 или 380	220 или 380	220 или 380	380	380	380
	Номинальная мощность	*ква*	3	25	50	100	150	200	150	300	400
	Номинальная продолжительность включения (*ПВ*)	%		50	50	50	50	50	50	40	10
	Номинальный ток в первичной цепи	*а*	14	114 или 68	228 или 136	456 или 272	684 или 408	912 или 544	408	912	610 (трехфазный)
	Число ступеней регулирования	шт.	2 и 5**	8	8	8	8	8	8	8	10
	Пределы регулирования вторичного напряжения	*в*	—	1,8—3,5	2,0—4,0	3,3—6,6	3,8—7,7	4,3—8,6	3,8—7,7	5,6—11,2	3,0—8,4
	Ориентировочный наибольший сварочный ток	*а*	—	7000	12 500	17 000	21 000	25 000	21 000	30 000	100 000 (амплитудное значение)
	Тип прерывателя	—	Специальный игнитронный	Механический включатель	Синхронный игнитронный						Трехфазный игнитронный

Продолжение табл. 26

Параметры	Показатели	Единицы измерения	Конденсаторная сварка тонких деталей	Непрерывная сварка малоуглеродистой стали	Прерывистая сварка						Шаговая сварка
			МШК-3-2	МШМ-25М-I МШМ-25М-II	МШМ-50М-I МШМ-50М-II	МШП-100	МШП-150	МШП-200	МШПБ-150-11—2	МШПР-300/1200-2	МШШИ-400-2*
Электрические	Пределы регулирования длительности импульсов	сек.	—	Непрерывная сварка	0,02—0,38	0,02—0,38	0,02—0,38	0,02—0,38	0,02—0,38	0,02—0,38	0,04—0,36
	Пределы регулирования длительности паузы	сек.	—	Нет	0,02—0,38	0,02—0,38	0,02—0,38	0,02—0,38	0,02—0,38	0,02—0,38	0,08—0,80
	Пределы плавного регулирования мощности	%	—	»	40—100	40—100	40—100	40—100	40—100	40—100	—
Механические	Направление свариваемого шва	—	Продольное и поперечное	Продольное или поперечное					Поперечное	Продольное и поперечное	
	Полезный вылет	*мм*	150	400	400	При сварке листов—800; при продольной сварке обечаек диаметром 130—400 *мм* — 520—650; при поперечной сварке обечаек диаметром 300—400 *мм* — 100—400			600	800—1200	1200
	Ход верхнего электрода В—вертикальный; Р—радиальный	*мм*	15(В)	20(Р)	30(В)	40—115(В)	40—115(В)	40—115(В)	50—130(В)	50—130(Р)	100—170(В)
	Привод механизма сжатия	—	Грузовой	Моторно-кулачковый		Пневматический					

Продолжение тал. 26

Параметры	Показатели	Единицы измерения	Конденсаторная сварка тонких деталей	Непрерывная сварка малоуглеродистой стали	Прерывистая сварка						Шаговая сварка
			МШК-3-2	МШМ 25М-I МШМ-25М-II	МШМ-50М-1 МШМ-50М-I	МШП-100	МШП-150	МШП-200	МШПБ-150-11	МШПР-300/1200-2	МШШИ-400-2*
Механические	Максимальное усилие сжатия . .	*кГ*	70	200	400	800	800	800	800	1600(при вылете 800*мм*—2000 *кГ*)	800
	Пределы регулирования скорости сварки	*м/мин*	0,6—1,8 (поперечный) 0,4—0,9 (продольный)	0,86—3,43	0,5—4,0	0,5—1,9	0,5—1,9	0,5—1,9	0,65—4,6	0,5—2,0	0,2—0,6
	Приводной электрод	—	Нижний	Верхний	Нижний или верхний***				Оба	Нижний	Верхний
Технологические	Максимальная толщина свариваемых деталей (М—малоуглеродистая сталь; Н—нержавеющая аустенитная сталь; А—алюминиевые сплавы)	*мм*	0,03—0,2	1+1(М)	1,5+ +1,5(М)	1,5+ +1,5(М)	2,0+ +2,0(М)	2,5+ +2,5(М)	2+2 (М с покрытием)	2+2 (Н); при вылете 800 *мм* 3+3(Н)	2,5+2,5 (А)

Продолжение тал. 26

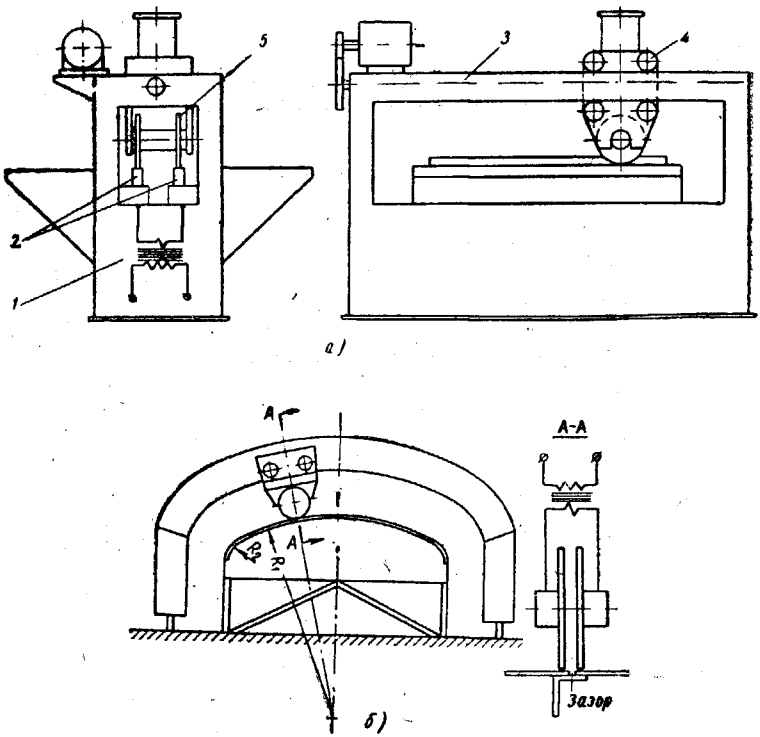
Параметры	Показатели	Единицы измерения	Конденсаторная сварка тонких деталей	Непрерывная сварка малоуглеродистой стали	Прерывистая сварка						Шаговая сварка
			МШК-3-2	МШМ-25М-I МШМ-25М-II	МШМ-50М-I МШМ-50М-II	МШП-100	МШП-150	МШП-200	МШ ПБ-150-11	МШПР-300/1200-2	МШШИ-400-2*
Технологические	Минимальный диаметр обечайки при сварке продольного шва	*мм*	35	150	110	130	130	130	130	130	350
	То же, поперечного шва	»	50	150	140	~200	~200	~200	~300	~300	~300
	Габаритные размеры:										
	высота	*мм*	1395	1340	1735	2200	2200	2200	2250	1560	2650
	ширина	»	620	605	720	1000	1000	1000	1000	1260	1420
	длина	»	605	1100	1160	2200	2200	2200	2200	3000	3550
	Вес машины	*кГ*	200	368	650	1900	2000	2200	2000	2500	6500

* Начт выпуск аналогичных машин большей мощности (МШШТ-600 и МШШТ-1000).

** Трансформатор регулируется двумя ступенями; емкость конденсаторов—пятью ступенями. Максимальная емкость рабочих конденсаторов 240 *мкф* (см. фиг. 156, *к*); напряжение на зарядных конденсаторах 300—420 *в*; частота импульсов 10—50 в сек.

***В машинах для сварки продольных швов—верхний; в машинах для сварки поперечных швов—нижний. Выпущена машина Ш-50-1, аналогичная МШМ-50М и пригодная для сварки как продольных, так и поперечных швов.

жирских вагонов к элементам жесткости. Для сохранения постоянства величины сварочного контура их трансформатор крепят на подвижной каретке (фиг. 204, *б*). При этом на участках крыши различной кривизны ($R_2 < R_1$) автоматически изменяется режим сварки (путем программного регулирования эффективного тока). В ма-



Фиг. 204. Схемы машин для односторонней двухроликовой сварки: *а* — с неподвижным трансформатором; *б* — с перемещающимся трансформатором.

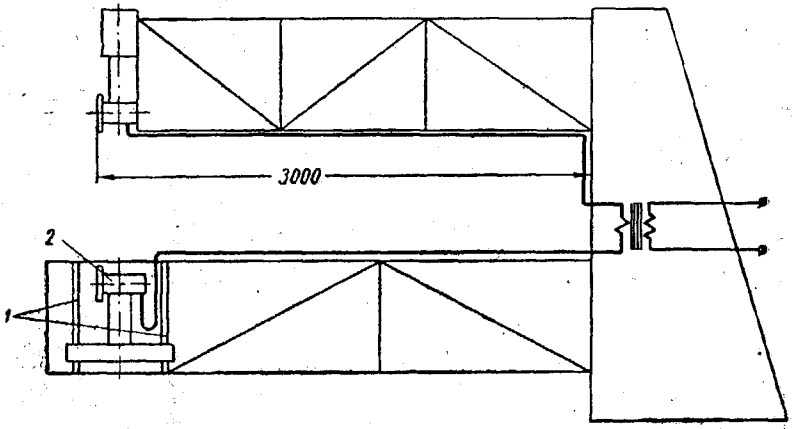
шине МШПХ-200 осуществляется двухшовная сварка шкафа холодильника;

в) машины для двухсторонней сварки изделий небольших размеров, надеваемых на поступательно перемещающийся электрододержатель (например, машина МШПЦ-100-2 для сварки продольного шва в прямоугольной обечайке длиной 145 *мм*, загнутой из листового цинка толщиной 1 *мм*);

г) машины с двумя обычными дисковыми электродами, но специально предназначенные для сварки изделий больших размеров, например, машина МШП-500/3000 (фиг. 205) с полезным вылетом 3000 *мм*; ходовыми винтами *1* нижний электродный узел *2* может

подниматься и опускаться на 700 *мм* для обхода поперечных перегородок, привариваемых к цилиндрической обечайке большого диаметра.

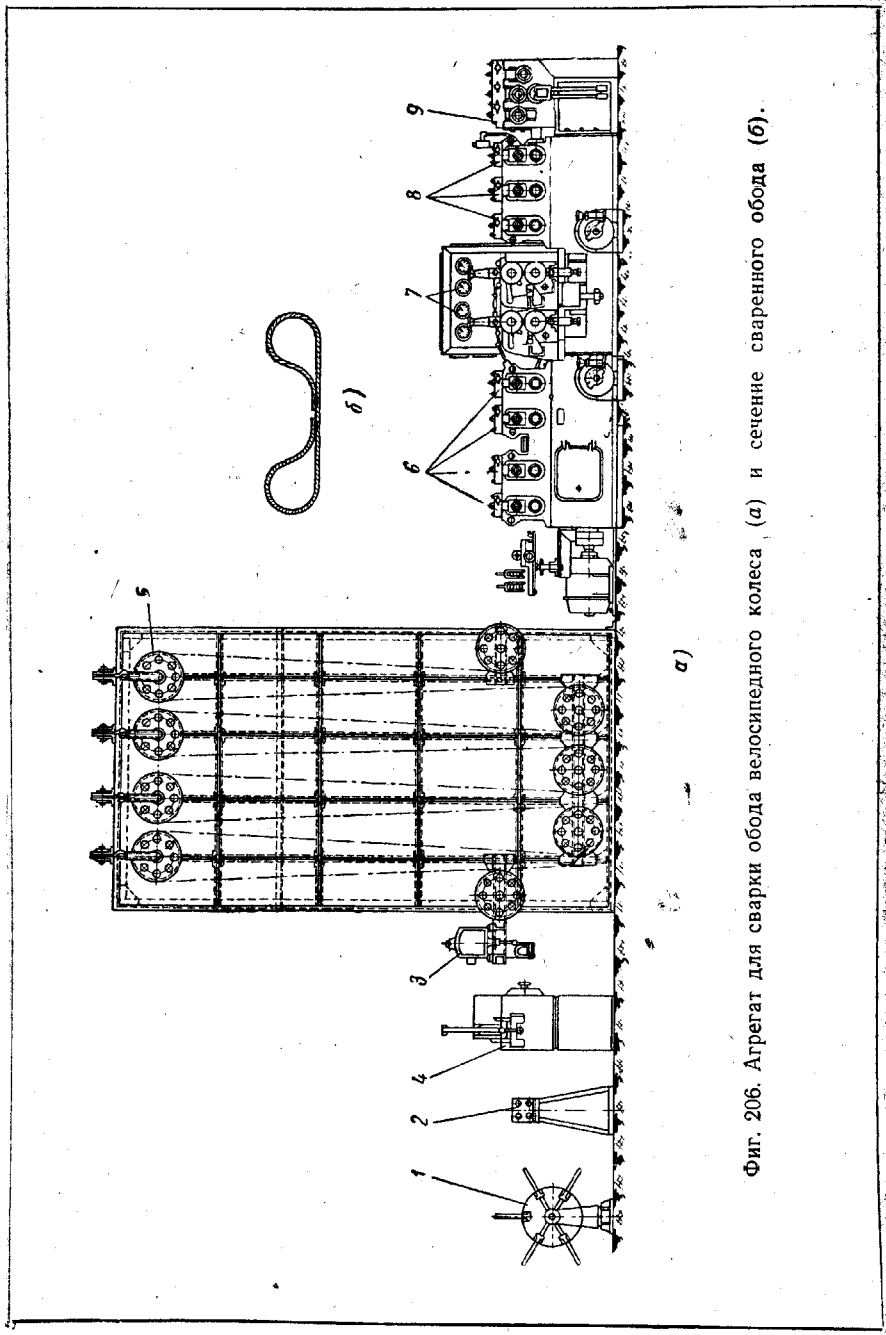
Огромные размеры контура машины, предназначенной для сварки нержавеющей стали толщиной 2÷2,5 *мм*, привели к повышению ее мощности до 500 *ква* (при $U_{2.0}=15{,}8\div31{,}6$ *в*). В этом случае была бы целесообразна схема питания импульсом выпрямленного тока (см. фиг. 97, *а*), при которой вследствие резкого умень-



Фиг. 205. Схема специальной машины для сварки изделий большого размера.

шения индуктивного сопротивления необходимая мощность снизилась бы в несколько раз;

д) машины-автоматы, предназначенные для сварки того или иного изделия и выполняющие помимо сварки различные вспомогательные и подготовительные операции. Примером такой автоматической линии может служить агрегат АШО-2×20 (фиг. 206, *а*), предназначенный для изготовления из стальной ленты спиральной заготовки обода велосипедного колеса (фиг. 206, *б*). Агрегат (фиг. 206, *а*) состоит из разматывателя *1*, блокировочного устройства *2*, которое при окончании рулона включает тормоз *3*, точечной машины *4* для сварки концов ленты, блочного устройства *5*, стана *6* для профилирования обода, сварочной машины для сварки двух швов между двумя парами дисковых электродов *7*, смещенных на 500 *мм* по длине машины, калибровочной машины *8* и гибочной машины *9*, в которой образуется спираль (в дальнейшем спираль разрезают по образующей и отдельные ее витки после сварки стыка дают готовый обод колеса). Блочное устройство позволяет вести сварку непрерывно, обеспечивая необходимый запас ленты на время стыкования ее концов.



Фиг. 206. Агрегат для сварки обода велосипедного колеса (*а*) и сечение сваренного обода (*б*).

За рубежом известны и другие автоматические линии, основанные на применении роликовой сварки, например, линии по сборке и сварке металлической тары. Выпущены также специальные машины для роликовой сварки встык с тонкими накладками по схеме, показанной на фиг. 114, *б*.

§ 5. ТРУБОСВАРОЧНЫЕ СТАНЫ

В настоящее время применяются два способа контактной сварки труб продольным швом: током промышленной или повышенной частоты (см. фиг. 115, *в*) и током радиочастоты (см. фиг. 118, *б*). Кроме того, некоторое распространение получила сварка труб с индукционным нагревом т. в. ч., родственная по своей природе контактной сварке. Главное преимущество индукционной сварки — бесконтактное введение энергии в свариваемую трубу, в связи с чем отпадает необходимость в зачистке поверхности стальной заготовки. При соответственно выбранной форме индуктора индуктированные токи в трубной заготовке протекают вдоль свариваемых кромок, постепенно нагревая их до требуемой температуры (по принципу продольной сварки). Это исключает неравномерность нагрева, связанную со случайными причинами и с периодичностью переменного тока. Недостаток индукционной сварки — опасность окисления кромок из-за относительно медленного нагрева.

Наибольшее промышленное распространение имеют станы для сварки током частотой 50—300 *гц* труб диаметром 10—153 *мм* со стенкой толщиной от 0,5—1 *мм* до 5—6 *мм*. В зарубежной практике известны станы для контактной сварки труб диаметром до 429 *мм* и более при толщине стенки более 12 *мм*. Токи радиочастоты (до 450 *кгц*) пока используются для сварки труб из углеродистых и легированных сталей, а также цветных металлов и сплавов при небольшой толщине стенки (до 1,5—2,5 *мм*).

Контактная сварка труб производится на трубосварочных станах. Трубы диаметром до 220 *мм* обычно изготовляют из стальной ленты. Трубы большего диаметра иногда сваривают из отдельных листов. В стане для производства труб из ленты (фиг. 207) калиброванная стальная лента требуемого сечения непрерывно сматывается с барабана и поступает через направляющее устройство *1* в формовочную машину *2*. В зависимости от диаметра свариваемой трубы эта машина, в которой лента постепенно загибается в трубную заготовку (см. фиг. 115, *а* и *б*), имеет от 5 до 12 клетей с формовочными валками. В средней части стана располагается собственно сварочная машина *3* с вращающимся трансформатором (см. фиг. 137, *д* и *е*). За ней размещается приспособление *4* для удаления наружного высаженного при сварке металла. Это приспособление представляет собой держатель с резцом, срезающим горячий высаженный металл заподлицо с поверхностью трубы. Образующаяся непрерывная стружка наматывается на специальную катушку. Металл, высаженный в стыке внутрь трубы,

Фиг. 207. Трубосварочный агрегат 10-60 (бывш. ЦКБММ-ЦНИИТМАШ).

иногда также удаляется (резцами, укрепленными на полой штанге с водяным охлаждением) или закатывается роликами. Чаще (в особенности в трубах диаметром до 50 *мм*) он вовсе не обрабатывается. После удаления высаженного металла труба поступает в калибровочную машину *5*, состоящую из трех четырехвалковых клетей, образующих правильный круговой калибр. Его диаметр несколько меньше диаметра сваренной трубной заготовки и точно соответствует заданному размеру готовой трубы. Взаимное смещение в вертикальной плоскости осей калибров трех клетей позволяет помимо калибровки труб по диаметру выправить их. Это необходимо в связи с тем, что местный нагрев трубы в зоне сварки вызывает заметные ее деформации. Выходящая из стана труба разрезается на куски требуемой длины с помощью летучего отрезного устройства *6*. Когда выходящий из калибровочных клетей конец трубы доходит до упора, срабатывает пневматический зажим, закрепляющий отрезную головку на движущейся трубе. Вращающиеся резцы головки отрезают трубу, после чего зажим головки освобождается и она возвращается в исходное положение. При очень больших скоростях сварки не хватает времени на отрезку трубы и может

быть применен более быстрый разрыв трубы. В этом случае летучая головка имеет кольцевой индуктор для почти мгновенного местного нагрева трубы, зажимы для захвата трубы и электромагнитное устройство для приложения растягивающей силы, разрывающей трубу по нагретому кольцу.

Для создания непрерывного процесса перед трубосварочным станом часто размещают точечную или стыковую машину с гратоснимателем, в которых сваривают концы рулонов. Применение точечной сварки внахлестку возможно при толщине полосы не более 1 *мм*. Между сварочной машиной и станом должен быть петлеобразователь, накапливающий запас полосы на время стыкования рулонов. Иногда при сварке труб из горячекатаной стали в линии предусматривается дробеструйная установка для местной очистки кромок полосы, соприкасающихся с вращающимися электродами сварочной машины стана. Для уменьшения деформаций трубы между сварочной машиной и калибровочными клетями вводится холодильник 7, в котором труба поливается водой. Калибровка и правка холодной трубы дают лучшие результаты. Наибольшая производительность процесса достигнута при сварке труб относительно большого диаметра с последующим горячим редуцированием сваренных труб до меньшего размера.

Питание небольших трубосварочных станов, использующих ток промышленной частоты, осуществляется непосредственно от сети через регулировочный автотрансформатор иногда с дистанционным плавным регулированием. В настоящее время, как правило, новые станы питаются током повышенной частоты от специальных моторгенераторных установок. Применение трехфазного двигателя позволяет равномерно загрузить сеть, а изменение возбуждения генератора дает возможность плавно регулировать напряжение в первичной обмотке сварочного трансформатора и, как следствие, потребляемую при сварке мощность. При большой мощности трубосварочных станов (известны станы мощностью около 4000 *ква* для сварки труб диаметром до 429 *мм* при толщине стенки до 14 *мм*) их рациональное питание и удобное регулирование имеют очень большое значение.

Станы для сварки труб токами радиочастоты отличаются от обычных трубосварочных станов отсутствием вращающегося трансформатора. Благодаря значительно меньшим токам и высокой частоте хорошие результаты дают простейшие скользящие контакты (см. фиг. 118, *б*). Питание стана осуществляется ламповым генератором через небольшой неподвижной трансформатор, расположенный рядом с местом сварки.

ГЛАВА XV

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

§ 1. УСТАНОВКА СВАРОЧНЫХ МАШИН И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА

Обычно контактную сварку производят в прессовых, механосборочных, котельно-трубных или инструментальных цехах, а также в цехах металлоконструкций. Поскольку контактная сварка, как правило, безвредна для окружающих, оборудование для ее выполнения размещают в соответствии с общим технологическим потоком среди других станков и машин. Лишь в отдельных случаях мощные стыковые машины, выбрасывающие при оплавлении брызги расплавленного металла на значительное расстояние, выгораживают или устанавливают в отдельном помещении. Для экономии рабочих площадей вспомогательное оборудование и аппаратуру часто размещают на стенах, колоннах или специальных антресолях.

При размещении сварочных машин необходимо соблюдать общие нормы по установке станочного оборудования в части расстояния между машинами и ширины проходов. Важно обеспечить удобное извлечение из машины трансформатора при ремонте.

Контактные машины, как правило, имеют однофазный трансформатор. При наличии нескольких машин в цехе их следует питать от различных фаз, добиваясь по возможности равномерного распределения нагрузки между ними. При включении машин большой мощности из-за резкого падения напряжения часто наблюдается неприятное мигание электроламп и толчки в работе двигателей. Этого можно избежать питанием таких машин от отдельного силового трансформатора. В цехах с большим количеством сварочных машин такая система питания дает наилучшие результаты.

Падение напряжения в проводах, питающих машины для контактной сварки, не должно превышать 5%. При расчете провода проверяют на нагрев и падение напряжения. Поэтому сечение проводов приходится увеличивать с увеличением расстояния от машины до ее источника питания, хотя нагрев проводов не зависит от этого расстояния. При наличии в цехе многих сварочных машин целесообразно их питание от общих шин. Этим достигают экономии

меди и меньшего падения напряжения в проводах. Машины для контактной сварки обычно имеют невысокий cos φ. Для его улучшения иногда применяют компенсационные устройства (обычно конденсаторы, включаемые параллельно сварочному трансформатору). Каждую машину присоединяют к сети через индивидуальный рубильник и плавкие предохранители. Этим облегчают осмотр и ремонт специальных включающих устройств машины (контакторов и т. п.).

Для охлаждения машин желательно применять очищенную воду, что уменьшает количество отложений в трубках. Слив воды должен происходить через открытую воронку, хорошо видимую сварщиком. Питание воздухом машин с пневматическим приводом самостоятельный).

Сварщик, как правило, работает стоя и только при сварке очень мелких деталей — сидя. Производительность труда сварщика и качество сварки в большой степени зависят от организации его работы.

Наибольшее значение имеют: а) оснащение легкими и удобными в работе приспособлениями; б) наличие сменных электродов из высокостойких сплавов и инструмента для их быстрой и точной заправки; в) тщательный уход за оборудованием и регулярный его ремонт.

При эксплуатации оборудования для контактной сварки необходимо систематическое наблюдение за состоянием механизмов, системы охлаждения, измерительных приборов и электрических цепей, как самой машины, так и ее пуско-регулирующей аппаратуры (контакторов, прерывателей и др.). При производстве наиболее ответственных работ сварочное оборудование должно подвергаться ежедневному осмотру, ежедекадному профилактическому и ежеквартальному текущему ремонту. Ежедневно очищают наружные части машины и прерывателя, проверяют работу педалей (четкость включения и выключения); проверяют работу ламп (по степени накала, равномерности зажигания игнитронов и тиратронов); проверяют состояние смазки; усилие сжатия электродов и состояние контактов реле и контакторов (при наличии нагара контакты зачищаются).

При ежедекадном осмотре динамометром контролируют правильность показаний прибора, фиксирующего величину усилия сжатия электродов; проверяют состояние механизма сжатия (плавность хода, отсутствие заеданий и ударов); проверяют правильность положения всех рукояток органов управления относительно шкал; измеряют омическое сопротивление сварочного контура и в случае превышения установленного максимального значения контакты контура подтягивают (если этого недостаточно, элементы контура разбирают и зачищают их контакты); контролируется работа прерывателя по осциллограммам и проверяет

ся работа машины, в целом, сваркой и испытанием контрольных образцов.

При ежеквартальном текущем ремонте производится проверка и ремонт двигателей и всей пусковой аппаратуры, разбираются и зачищаются контакты сварочного контура; полностью очищается и проверяется работа прерывателя; проверяется сопротивление изоляции сварочного трансформатора; проверяется работа всех измерительных приборов; регулируется прерыватель (по результатам осциллографирования).

§ 2. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Оценка гигиенических условий труда при контактной сварке и выработка мероприятий по технике безопасности при этом виде сварки должны производиться с учетом:

а) количества выделяемой при сварке лучистой энергии; б) степени загрязнения воздуха; в) опасности ожогов; г) возможности поражения электрическим током.

Выделение лучистой теплоты при контактной сварке относительно невелико. При точечной и роликовой сварке оно не имеет практического значения. Даже при стыковой сварке вследствие кратковременности теплового воздействия не требуется специальных мер для защиты сварщика от нежелательного теплового облучения. При контактной сварке, и в первую очередь при стыковой сварке оплавлением, выделяется много металлической пыли, загрязняющей воздух.

При сварке стали выделяется и некоторое количество CO. Из-за испарения магния очень много дыма выделяется при оплавлении алюминиевых сплавов с высоким содержанием Mg (например, АМг6).

В тех случаях, когда свариваются цветные металлы или стали с покрытиями, при нагревании которых возможно выделение вредных веществ, например свинца или цинка, должна быть предусмотрена местная или общая приточно-вытяжная вентиляция.

Сварщик должен быть защищен от ожогов, возможных при выплесках во время точечной и роликовой сварки и при сварке оплавлением.

В последнем случае на стыковой машине предусматриваются специальные щитки или местная защита рабочего места сварщика от прямого попадания вылетающих из зоны сварки частиц расплавленного металла.

При точечной и роликовой сварке для защиты глаз сварщик должен носить очки с бесцветными стеклами. Кроме того, сварщик снабжается фартуком и рукавицами.

Наибольшую опасность для сварщика представляет поражение электрическим током.

Вторичное напряжение машин для контактной сварки почти никогда не превышает 24 *в* и не представляет непосредственной опасности для сварщика.

Однако при повреждении изоляции первичной обмотки трансформатора или проводов цепей управления сварщик может подвергнуться воздействию высокого напряжения. В связи с этим одна точка сварочного контура всегда электрически соединяется со станиной машины, а сама станина должна быть надежно заземлена. Все оперативные цепи, непосредственно связанные с органами управления (кнопками, педалями), питаются напряжением 36 *в*.

Механизмы сварочных машин должны иметь нормальные защитные устройства (кожухи, ограждения и т. п.).

ЛИТЕРАТУРА

К главе I

Алов А. А., Вопросы теории сварочных процессов, гл. II, Машгиз, 1959.

Балковец, Д. С., Орлов Б. Д. и Чулошников П. Л., Точечная и роликовая сварка специальных сталей и сплавов (гл. I), Оборонгиз, 1957.

Гельман А. С., Кабанов Н. С. и Слепак Э. С., Контактная стыковая сварка труб (гл. II—IV), Машгиз, 1957.

К главе II

Гельман А. С., Тепловые процессы при точечной сварке, Труды ЦНИИТМАШа, кн. 14, Машгиз, 1948.

Жуковский Б. Д., О контактном сопротивлении деталей при сварке, «Сварочное производство», № 7, 1958.

Пугачев А. И., Технология подготовки алюминиевых сплавов к контактной сварке, «Автогенное дело», № 2, 1950.

К главе III

Гельман А. С., Кабанов Н. С. и Слепак Э. С., Контактная стыковая сварка труб, Машгиз, 1957.

Гельман А. С., Стыковая сварка ленты из инструментальных сталей, «Сварочное производство» № 1, 1956.

Гельман А. С., Сварка оплавлением сплава АК6, «Сварочное производство» № 2, 1957.

Гельман А. С., Кабанов Н. С. и Матвеев А. С., Ультразвуковой контроль соединений, выполненных контактной сваркой, «Заводская лаборатория» № 5, 1954.

Гельман А. С. и Слепак Э. С., Особенности стыковой сварки оплавлением труб из жаропрочных аустенитных сталей, «Сварочное производство» № 5, 1959.

Генкин Н. З., Контактная сварка рельсов, «Сварочное производство», № 7, 1959.

Забурдин М. К., Захаренко В. Ф., Шестаков С. Н. и Третьяков Ф. Е., Стыковая сварка титана и его сплавов на модернизированных машинах типа МСГА-300, «Сварочное производство» № 9, 1958.

Кабанов Н. С., Сварка сопротивлением труб в защитной среде, «Сварочное производство» № 4, 1955.

Кислюк Ф. И., Электрическая стыковая контактная сварка в строительстве трубопроводов, «Нефтяное хозяйство» № 12, 1955.

Когос А. М., Рысс Б. А., Гельман А. С. и Кабанов Н. С., Контактная сварка при производстве листов из черных металлов, «Сварочное производство» № 7, 1959.

Кочановский Н. Я., Автоматизация стыковой сварки оплавлением, «Вестник электропромышленности» № 2, 1959.

Кучук-Яценко С. И., Условия максимального нагрева при непрерывном оплавлении, «Автоматическая сварка» № 10, 1959.

Лебедев В. К. и Кучук-Яценко С. И., Интенсификация нагрева при сварке оплавлением, «Автоматическая сварка» № 3, 1956.

Патон Б. Е., Горбунов Г. В., Лебедев В. К., Остапенко Н. Г., Литвинчук М. Д., Контактная сварка магистральных трубопроводов, «Сварочное производство» № 2, 1959.

Подола Н. В. и Кучук-Яценко С. И., Контактная стыковая сварка токами низкой частоты, «Автоматическая сварка» № 1, 1957.

Рыкалин Н. Н. и Пугин А. И., Расчет нагрева и охлаждения стержней при сварке встык сопротивлением, «Сварочное производство» № 1, 1958.

Рыкалин Н. Н. и Пугин А. И., Расчет прерывистого подогрева стержней током при сварке встык оплавлением, «Сварочное производство» № 4, 1959.

Рыкалин Н. Н., Пугин А. И. и др., Тепловые процессы при контактной сварке, Сборник трудов лаборатории сварки металлов Института металлургии им. А. А. Байкова АН СССР, Академиздат, 1959.

Слепак Э. С., Опыт промышленного освоения контактной сварки труб, «Автогенное дело» № 5, 1953.

Синадский С. Е., Восстановление взорванных и старогодных рельсов методом сварки встык оплавлением, «Автогенное дело» № 4, 1945.

Слиозберг С. К. и Журавлева Н. А., Стыковая сварка оплавлением латуни, «Сварочное производство» № 6, 1958.

Nippes, Savage, Suzuki and Chang A mathematical analysis of the temperature distribution during flash welding «Welding Journal» № 6, 1955.

К главе IV

Андреев Н. Х., Влияние направления сварочного тока на формирование литой зоны точечного сварного соединения, «Сварочное производство» № 8, 1955.

Андреев Н. Х., Новый способ подготовки поверхности деталей из магниевых сплавов под контактную сварку, «Сварочное производство» № 6, 1957.

Балковец Д. С., Орлов Б. Д., Чулошников П. Л., Точечная и роликовая сварка специальных сталей и сплавов (гл. 2—5, 12—14), Оборонгиз, 1957.

Гельман А. С., Особенности тепловых процессов и размеры сварной точки при сварке конструкционных сталей, «Автогенное дело» № 11, 1948.

Гельман А. С., Астафьев С. С., Точечная сварка стали СХЛ-2 с электротермообработкой, «Автогенное дело» № 11, 1949.

Гельман А. С. и Слепак Э. С., Точечная сварка стали большой толщины с применением сварочного тока низкой частоты, Труды ЦНИИТМАШа, кн. 35, Машгиз, 1950.

Гельман А. С., Слепак Э. С., Лащивер С. М. и Мумриков П. В., Рельефно-точечная сварка горячекатаной стали, «Сварочное производство» № 7, 1959.

Гуляев А. И., Рельефная сварка в автостроении, «Автогенное дело» № 11, 1952.

Кислюк Ф. И. и Горбанский В. В., Новые машины для точечной сварки деталей приемно-усилительных ламп, «Сварочное производство» № 3, 1957.

Леви С. С., Применение сварных арматурных конструкций в железобетоне, Госэнергоиздат, 1957.

Мамлюков А. Ф., Точечная сварка стали 30ХГСА с электротермической обработкой, «Сварочное производство» № 4, 1955.

Моравский В. Э., Конденсаторная сварка металлов малых толщин, Машгиз, 1960.

Назаров С. Т., Контроль качества точечной и роликовой сварки, «Сварочное производство» № 7, 1957.

Некрасов Б. М., Радашкевич И. М., Контактная сварка латуни, «Вестник электропромышленности» № 1, 1954.

Орлов Б. Д. и Чулошников П. Л., Состояние и перспективы развития точечной и роликовой сварки конструкций из легких сплавов, «Сварочное производство» № 7, 1959.

Тазьба С. М., О режимах контактной сварки пересекающихся стержней арматуры железобетона, «Автоматическая сварка» № 10, 1958.

К главе V

Балковец Д. С., Орлов Б. Д. и Чулошников П. Л., Точечная и роликовая сварка специальных сталей и сплавов (гл. 4, 5, 12, 13, 14), Оборонгиз, 1957.

Гельман А. С. и Китаев А. М., Роликовая сварка встык с накладками, «Сварочное производство» № 7, 1958.

Григорьев В. А., Исследование некоторых процессов при роликовой сварке, «Сварочное производство» № 7, 1956.

Жуковский Б. Д., Теория нагрева металла при роликостыковой сварке труб, «Автогенное дело» № 1, 1953.

Жуковский Б. Д., Зильберштейн Л. И., Осадка Ф. Е. и Чекмарев А. П., Производство труб электросваркой методом сопротивления, Металлургиздат, 1953.

Кирдо И. В. и Бернадский Б. М., Скоростная контактная рельефно-роликовая сварка малоуглеродистой стали, «Автоматическая сварка» № 10, 1958.

Китаев А. М., Технология роликовой электросварки, изд. МДНТП им. Дзержинского, 1958.

Недзвецкий Г. В., Влияние скорости вращения электродов на сопротивление при роликовой сварке, «Сварочное производство» № 1, 1956.

Рыкалин Н. Н., Расчеты тепловых процессов при сварке (гл. II), Машгиз, 1951.

Adams Ultrasonic inspection speeds drive-tubing output, «Metalworking production», Nov, 11. 1955.

Büsse, Widerstand Schweissen von Stahlblechen durch Folienstumpfnaht «Schweissen und Schneiden», № 6, 1954.

К главе VI

Бухман Н. А. и Имшенник К. П., Сварка заготовок инструмента по методу Игнатьева, Машгиз, 1944.

Глуханов Н. П., Богданов В. Н. и Куложинский В. Л., Сварка труб большого диаметра продольным швом при высокочастотном нагреве, «Сварочное производство» № 2, 1959.

Rudd, High—frequency resistance welding «Welding Journal» № 7, 1957.

К главе VII—IX

Балковец Д. С., Орлов Б. Д., и Чулошников П. Л., Точечная и роликовая сварка специальных сталей и сплавов (гл. 12), Оборонгиз, 1957.

Глебов Л. В., Расчет индуктивности вторичного контура контактных машин, «Автогенное дело» № 9, 1949.

Захаров М. В., Новые высокоэлектропроводные медные сплавы для электродов контактной электросварки, «Металловедение и обработка металлов» № 5, 1956.

Каганов Н. Л., Контактные электросварочные машины, Справочник «Машиностроение» т. 8, Машгиз, 1948.

Кожаев А. Ф., Модернизация стыковой машины МСМ-150 для сварки труб из аустенитных сталей, «Сварочное производство» № 12, 1958.

Корсунов В. М., Модернизация стыковых машин серийного выпуска для котельного производства, «Сварочное производство» № 7, 1957.

Кочановский Н. Я., Машины для контактной электросварки (гл. 1—3), Госэнергоиздат, 1954.

Остапенко Н. Г., О конструкции трансформаторов для контактной стыковой сварки деталей с большим сечением и развитым периметром, «Автоматическая сварка» № 2, 1952.

К главам X и XI

Балковец Д. С., Орлов Б. Д. и Чулошников П. Л., Точечная и роликовая сварка специальных сталей и сплавов (раздел II), Оборонгиз, 1957.

Блитштейн А. З., Неустановившийся режим в контактных сварочных машинах, «Автогенное дело» № 5, 1947.

Браткова О. Н., Рабочий процесс контактных машин с накоплением энергии в магнитном поле, «Электричество» № 2, 1957.

Гельман А. С., Быстродействующий терморегулятор ТС-3 для управления точечной сваркой, «Автогенное дело» № 3—4, 1946.

Гуляев А. И., Новые технологические процессы сварки и перспективы их развития, Сборник «Новое в сварке» г. Горький, 1954.

Гуревич А. И., Модулятор сварочного тока, «Вестник электропромышленности» № 8, 1958.

Ефтифеев П. И., Стыковая сварка разрядом высоковольтных конденсаторов на свариваемые детали, «Сварочное производство» № 1, 1959.

Зайчик Л. В. и Канин А. М., Точечные машины типа МТИП, «Сварочное производство» № 8, 1956.

Зотов В. П., Сварка аккумуляторной энергией, «Электричество» № 11, 1948.

Зайцев М. П., Об электрических схемах машин для контактной сварки металла малой толщины, «Автоматическая сварка» № 8, 1958.

Зайцев М. П. и Розов И. А., Об использовании эффекта Холла при исследовании процессов контактной сварки, «Вестник электропромышленности» № 5, 1958.

Кочановский Н. Я., Машины для контактной электросварки (гл. 3, 10 и 11), Госэнергоиздат, 1954.

Орлов Б. Д., Чулошников П. Л., Стабилизация тока при колебаниях напряжения сети на точечных и роликовых машинах, «Сварочное производство» № 4, 1955.

Паченцев Ю. А., Аппаратура для автоматического управления контактной точечной машиной по величине теплового расширения металла, «Автоматическая сварка» № 4, 1954.

Хренов К. К. и Моравский В. Э., Конденсаторная сварка деталей электроизмерительных приборов, «Автогенное дело» № 8, 1952.

Шаблыгин С. В. и Журавлев Б. В., Точечная сварка алюминиевых сплавов на машинах, использующих запасенную кинетическую энергию, «Автогенное дело» № 10, 1952.

К главе XII—XIV

Бойцов В. В., Костюк В. А. и Орлов Б. Д., Автоматизация сварочных работ в авиационной промышленности, «Сварочное производство» № 4, 1958.

Городнов П. Т. и Баранов А. К., Конденсаторная сварка велосипедных рам, «Сварочное производство» № 7, 1959.

Гельман А. С., Кабанов Н. С. и Слепак Э. С., Контактная стыковая сварка труб (гл. VI), Машгиз, 1957.

Глебов Л. В., Состояние и перспективы производства сварочного оборудования на заводе «Электрик» в 1959—1965 гг., «Сварочное производство» № 6, 1958.

Зайчик Л. В. и Канин А. М., Точечные машины типа МТИП, «Сварочное производство» № 8, 1956.

Каганов Н. Л., Новые конденсаторные машины МВТУ для точечной и роликовой сварки тонких деталей, «Сварочное производство» № 7, 1959.

Карелин А. М. и Радашкевич И. М., Машины МШШИ-400 для шовной сварки алюминиевых сплавов, «Вестник электропромышленности» № 4, 1958.

Когос А. М., Рысс Б. А., Гельман А. С. и Кабанов Н. С., К тактная сварка при производстве листов из черных металлов, «Сварочное п изводство» № 7, 1959.

Кочановский Н. Я., Машины для контактной электрос и, Госэн гоиздат, 1954.

Кочановский Н. Я., Состояние и перспективы развития удова для контактной сварки, «Сварочное производство» № 7, 1959.

Лбов Г. Ф., Механизация и автоматизация сварки в автомобильной п мышленности, «Сварочное производство» № 4, 1958.

Лбов Г. Ф., Типовые узлы многоточечных автоматов, «Сварочное про водство» № 5, 1958.

Патон Б. Е., Лебедев В. К., Работы института электросварки им. Е. Патона АН УССР в области контактной сварки, «Сварочное производст № 7, 1959.

Патон Б. Е., Горбунов Г. В., Лебедев В. К., Остапенко Н. Литвинчук М. Д., Контактная сварка магистральных трубопроводов, «С рочное производство» № 2, 1959.

Фалькевич А. С., Сварка магистральных и заводских трубопрово (гл. V), Гостоптехиздат, 1958.

Чуваков Н. А., Электросварочное оборудование для производства эл трических бытовых холодильников, «Вестник электропромышленности» № 1, 19

Яворский Ю. Д., Литвинчук М. Д. и Приходько П. М., А томат для стыковой сварки стержней массового производства, «Автомати ская сварка» № 12, 1958.

Automated Welding line, «Canadian Welder» № 4, 1958.

Каталоги сварочного оборудования.

ОГЛАВЛЕНИЕ

дисловие 3
дение 4
§ 1. Исторические сведения и область применения контактной сварки 4
§ 2. Основные способы контактной сварки 11

ва I. Поведение различных металлов и сплавов при контактной сварке 17
§ 1. Свариваемость при контактной сварке 17
§ 2. Основные процессы, протекающие в зоне сварки 19
§ 3. Основные процессы в околошовной зоне 24
§ 4. Углеродистые и низколегированные стали 27
§ 5. Аустенитные стали 31
§ 6. Алюминий и легкие сплавы 33
§ 7. Медь и ее сплавы 34
§ 8. Никель, титан и их сплавы 36

а II. Электрическое сопротивл[illegible]е и нагрев при контактной сварке 37
§ 1. Закон Ленца-Джоуля и [illegible]ное электрическое сопротивление 37
§ 2. Электрическое сопротивление [illegible]такта 40
§ 3. Сопротивление при стыковой [illegible]ке 43
§ [illegible]опротивление при точечной сва[illegible]ке 46
§ [illegible]офизические свойства металлов [illegible]плавов 51
§ 6. [illegible] характеристика нагрева при ко[illegible]актной сварке 52

ва III. С[illegible] сварка 57
§ 1. Область [illegible]нения и типы соедин[illegible] 57
§ 2. Сварка стал[illegible]одом сопротивления 60
§ 3. Процесс свар[illegible]лавлением 67
§ 4. Влияние пара[illegible] процесса на нагрев и пластическую деформацию при [illegible] оплавлением 76
§ 5. Сварка оплавлением [illegible]леродистых и легированных сталей .. 83
§ 6. Сварка обедьев колес, рельсов, труб, листов и звеньев цепей 88
§ 7. Сварка заготовок инструмента 95
§ 8. Сварка оплавлением цветных металлов и сплавов 98
§ 9. Технико-экономические показатели стыковой сварки 102

ва IV. Точечная и рельефная сварка 103
§ 1. Применение точечной сварки 103
§ 2. Процесс точечной сварки 103
§ 3. Нагрев и охлаждение при точечной сварке 107
§ 4. Влияние основных параметров процесса на нагрев и качество сварной точки 113
§ 5. Шунтирование тока при точечной сварке 118
§ 6. Конструктивное оформление узлов при точечн[illegible]арке 123
§ 7. Общие особенности технологии точечной с[illegible] 125
§ 8. Сварка конструкционных сталей 128
§ 9. Рельефноточечная сварка неочищенной стали 134
§ 10. Сварка аустенитных сталей, жаропрочных сплавов и титана 137

§ 11. Сварка алюминиевых, магниевых и медных сплавов 139
§ 12. Точечная сварка деталей малой толщины 145
§ 13. Рельефная сварка 146
§ 14. Дефекты и контроль качества точечной сварки 149
§ 15. Технико-экономические показатели точечной сварки 153

Глава V. **Роликовая и роликостыковая сварка** 154
§ 1. Область применения роликовой сварки и типовые узлы 154
§ 2. Сущность процесса и нагрев при роликовой сварке 158
§ 3. Общие особенности технологии роликовой сварки 165
§ 4. Технология роликовой сварки сталей и жаропрочных сплавов 165
§ 5. Роликовая сварка цветных металлов 168
§ 6. Рельефно-роликовая сварка и роликовая сварка встык с накладками 170
§ 7. Роликостыковая сварка труб 171
§ 8. Дефекты и контроль качества роликовой сварки 176
§ 9. Технико-экономические показатели роликовой сварки 178

Глава VI. **Поверхностная сварка** 179
§ 1. Сварка по методу Игнатьева 179
§ 2. Сварка т. в. ч. 179

Глава VII. **Технические требования к машинам для контактной сварки** 182
§ 1. Общая характеристика машин 182
§ 2. Мощность, режим работы и внешняя характеристика машины 183

Глава VIII. **Элементы сварочного контура машин для контактной сварки** 189
§ 1. Схема сварочного контура 189
§ 2. Сварочный контур и электроды стыковых машин 191
§ 3. Сварочный контур и электроды точечных машин 194
§ 4. Сварочный контур и электроды роликовых машин 201
§ 5. Расчет сварочного контура 206
§ 6. Электродные сплавы 211

Глава IX. **Трансформаторы машин для контактной сварки** 214
§ 1. Основные параметры и рабочий процесс 214
§ 2. Конструкция трансформаторов 217
§ 3. Регулирование сварочного тока 222
§ 4. Расчет трансформатора 225

Глава X. **Электрическая аппаратура управления машин для контактной сварки и контрольные приборы** 231
§ 1. Назначение аппаратуры управления 231
§ 2. Контакторы 231
§ 3. Аппаратура управления сварочным циклом 237
§ 4. Прерыватели для точечной сварки 239
§ 5. Прерыватели и модуляторы для роликовой сварки 248
§ 6. Аппаратура автоматического управления стыковой сваркой оплавлением 250
§ 7. Контрольно-измерительные приборы 252

Глава XI. **Импульсные схемы питания** 259
§ 1. Классификация и применение импульсных схем 259
§ 2. Схемы конденсаторных машин 260
§ 3. Сварка энергией, накопленной в магнитном поле 264
§ 4. Схема сварки импульсом выпрямленного тока 266

Глава XII. **Стыковые машины** 269
§ 1. Основные узлы и классификация 269
§ 2. Станины, направляющие и плиты стыковых машин 270

§ 3. Привод стыковых машин 272
§ 4. Зажимные и упорные приспособления 280
§ 5. Характеристика стыковых машин общего назначения 287
§ 6. Специализированные стыковые машины 296

Глава XIII. **Точечные машины и сварочные прессы** 303

§ 1. Основные узлы и классификация точечных машин 303
§ 2. Механизмы сжатия точечных машин и сварочных прессов .. 305
§ 3. Стационарные одноточечные машины и сварочные прессы .. 312
§ 4. Механизация сварки на одноточечных машинах и прессах .. 325
§ 5. Переносные точечные машины 327
§ 6. Двух- и многоточечные машины 330

Глава XIV. **Машины для роликовой сварки и трубосварочные станы** 340

§ 1. Основные узлы и классификация машин для роликовой сварки 340
§ 2. Механизмы сжатия и перемещения свариваемых деталей 340
§ 3. Роликовые машины общего назначения 344
§ 4. Специальные машины для роликовой сварки 345
§ 5. Трубосварочные станы 353

Глава XV. **Организация рабочего места и техника безопасности при контактной сварке** 356

§ 1. Установка сварочных машин и организация рабочего места 356
§ 2. Техника безопасности 358
Литература 360

Александр Самуилович Гельман
ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОСВАРКИ

Редактор издательства *Соболева Г. Н.*
Технический редактор *З. И. Чернова*
Корректор *Шикунова Е. К.*

Сдано в производство 20/VI 1960 г. Подписано к печати 2/XI 1960 г. Т-13232
Тираж 15.000 экз. Печ. л. 23. Бум. л. 11,5.
Уч.-изд. л. 22,3 Формат 60×92¹/₁₆ Зак. 490

Типография Металлургиздата, Москва,
Цветной б., д. 30