

5.1.1.3. Концентрация энергии в зоне сварки

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

Установлено, что развитие и образование сварного соединения зависит от степени концентрации напряжений в зоне сварки и может быть интенсифицировано за счет создания искусственных концентраторов напряжений. Наиболее распространенным способом сварки с использованием искусственных концентраторов является сварка с разделкой кромок, причем наилучшие результаты получают, когда одна из деталей имеет V-образный выступ. В зависимости от режима процесса и угла разделки сварка может протекать с преимущественным оплавлением выступа или с преимущественным внедрением его в другую деталь [18, 24].

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

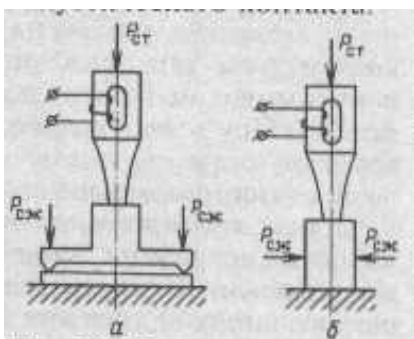


Рис. 5.12. Создание зон с повышенной концентрацией механических напряжений за счет специального механизма давления: а -  $P_{сж}$  и  $P_{ст}$  параллельны; б -  $P_{сж}$  и  $P_{ст}$  взаимно перпендикулярны

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

Другой путь повышения концентрации энергии на стыкуемых поверхностях заключается во введении между ними мягких прокладок с отношением динамического модуля упругости  $k$  коэффициенту механических потерь меньшим, чем у материала свариваемых деталей, совместимых с основным материалом. Температура плавления или перехода в вязкотекучее состояние материала прокладки должна быть ниже, а показатель текучести расплава - выше, чем аналогичные характеристики основного материала.

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

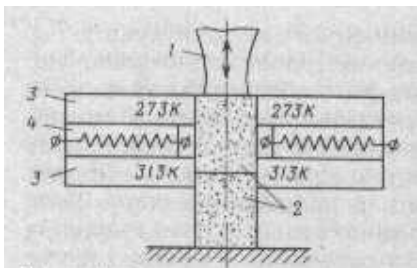


Рис. 5.13. Схема сварки с нагревом зоны сварки и охлаждением зоны детали, контактирующей с волноводом: 1 - волновод, 2 - свариваемые детали; 3 - медные радиаторы; 4 - термобатарея

Зоны с повышенной концентрацией напряжений могут быть получены при действии на детали дополнительных сжимающих усилий  $P_{сж}$ , создаваемых с помощью отдельного механизма, не связанного с волноводом. Сварка по такой схеме получила название сварки с независимым давлением. Если при рассмотренном выше основном способе подвода энергии усилие  $P_{ст}$  использовалось как для создания акустического контакта между волноводом и изделием, так и для концентрации динамических напряжений в зоне сварки, то при сварке с независимым давлением последняя функция возложена на специальные механизмы давления. В этом случае усилие  $P_{ст}$  гораздо меньше  $P_{сж}$  и необходимо только для осуществления акустического контакта.

Вектор  $P_{сж}$  может совпадать по направлению с вектором  $P_{ст}$ . Так, на рис. 5.12,а приведена схема сварки, при которой векторы  $P_{сж}$  и  $P_{ст}$  параллельны друг другу. Схемы, изображенные на рис. 5.12,б и на рис. 5.5, характерны тем, что векторы  $P_{сж}$  и  $P_{ст}$  взаимно перпендикулярны, причем вектор  $P_{ст}$  действует в плоскости контактирования свариваемых деталей. Для усиления концентрации энергии в этом случае могут применяться специальные вырезы в

местах приложения  $P_{сж}$ . Сварка с таким способом концентрации энергии может быть применена в тех случаях, когда конструкция изделия не позволяет расположить сварочный узел перпендикулярно границе раздела свариваемых деталей.

Повышение тепловыделения в зоне сварки может быть достигнуто с помощью локального подогрева зоны сварки. Местное повышение температуры приводит к более четкой фиксации зоны тепловыделения и увеличивает производительность процесса сварки. Оптимальная температура подогрева зависит от материала свариваемых деталей и составляет примерно 323-373°K.

Комбинированный способ сварки с нагревом соединяемых поверхностей и охлаждением свариваемых деталей (рис. 5.13) также может быть весьма полезен в ряде случаев. Для комбинированного нагрева-охлаждения свариваемых деталей несложной формы авторами была применена термобатарей с перепадом температур между горячим и холодным слоями, равным 313°K. Понижение температуры изделия в области контакта с волноводом и повышение ее в области образования сварного соединения существенно перестраивают температурный режим сварки, увеличивая производительность процесса, фиксируя зону максимального разогрева в области образования сварного соединения и устраняя подавление и перегрев материала в зоне контакта с волноводом.

#### 5.1.1.4. Дозирование подводимой энергии

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

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

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

**Сварка по фиксированному времени** нашла наиболее широкое распространение и используется практически во всех серийно выпускаемых ультразвуковых сварочных машинах как у нас в стране, так и за рубежом. Сварка однотипных изделий в этом случае производится с помощью реле времени, которое отключает ультразвуковые колебания через один и тот же промежуток времени после начала процесса. Однако небольшие изменения параметров режима сварки, геометрии деталей и свойств материалов могут привести к тому, что требуемое время сварки окажется больше или меньше времени, установленного реле. Как следствие в первом случае будут наблюдаться непровары, во втором - пережоги. Именно этим объясняется наблюдаемая на практике нестабильность результатов, получаемых при сварке по фиксированному времени. Повышения качества в этом случае стремятся достигнуть за счет поддержания постоянства параметров режима сварки, однако это значительно усложняет конструкцию оборудования.

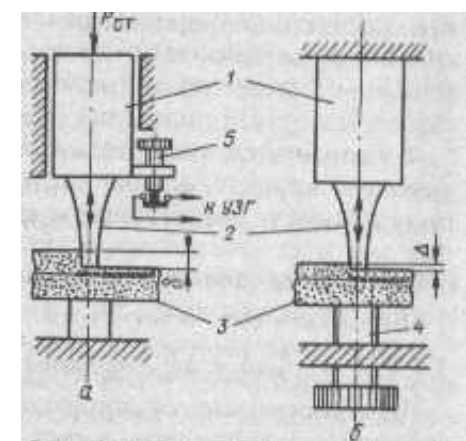


Рис 5.14. Сварка по схеме с фиксированной осадкой (а) и фиксированным зазором (б): 1 – преобразователь; 2 – волновод; 3 – свариваемый материал; 4 – регулировочный винт-опора; 5 – регулировочный винт для отключения ультразвука

**Сварка по деформационному критерию (по фиксированной осадке)** во многом позволяет избежать указанных недостатков. При использовании этой схемы сварки задается осадка полимера  $\delta$ , т.е. глубина вдавливания волновода в свариваемую деталь в результате воздействия статического усилия и ультразвука. Должно соблюдаться условие  $\delta > 2A$ , где  $2A$  – удвоенная амплитуда колебаний рабочего торца волновода-инструмента. В простейшем случае (рис. 5.14,а) отключение ультразвука осуществляется размыкающимися контактом и нажимным штифтом, укрепленными на подвижной и неподвижной частях сварочной машины. Расстояние между контактом и штифтом соответствует заданной осадке, величина которой определяется при отработке режимов сварки. Статическое усилие действует до окончания сварочного цикла.

При сварке изделий из мягких пластмасс (пластифицированного поливинилхлорида, полиэтилена) толщиной от 0,7 до 1,2 мм неконтролируемая деформация зоны сварки после выключения ультразвука может привести к существенному ухудшению внешнего вида и прочностных характеристик соединения. С целью

предотвращения такой деформации целесообразно обеспечить ограничение перемещения сварочной головки после выключения ультразвука за счет установки специального фиксатора или снятия статического давления  $P_{ст}$  без подъема сварочной головки.

Отличительным признаком схемы сварки с фиксированным зазором является то, что статическое давление отсутствует и сварка происходит только за счет действия динамических усилий, возникающих при воздействии волновода на свариваемый материал. При этой схеме (рис. 5.14,б) зазор между рабочим торцом волновода и опорой устанавливается таким, чтобы свариваемый материал деформировался только за счет смещения рабочего торца волновода. В результате воздействия волновода материал утоняется, а так как сварочная головка зафиксирована и не имеет возможности перемещаться в вертикальном направлении, то контакт волновода с материалом после деформации последнего нарушается и воздействие ультразвука на материал прекращается. Деформация свариваемого материала при схеме сварки с фиксированным зазором не превышает удвоенной амплитуды смещения волновода ( $\Delta \leq 2A$ ) и выбирается в зависимости от исходной толщины свариваемого материала и его свойств.

Сущность способа дозирования подводимой энергии **по кинетической характеристике** состоит в том, что опора выполняется в виде датчика амплитуды, и отключение ультразвуковых колебаний осуществляется вручную оператором или автоматически при соответствии электрического сигнала датчика опоры минимуму амплитуды смещения.

#### 5.1.1.5. Взаимное перемещение сварочного инструмента и изделия

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

**Прессовая сварка** выполняется за одно рабочее движение волновода. По этой схеме может осуществляться как контактная, так и передаточная ультразвуковая сварка. С помощью контактной прессовой сварки (см. рис. 5.10) получают точечные, прямолинейные и замкнутые швы различного контура, например в виде окружности, квадрата, прямоугольника, треугольника, эллипса и т.д. (в зависимости от формы рабочего торца волновода). При использовании в сварочной головке одного преобразователя с потребляемой мощностью 1,5-4 кВт развернутая длина сварного шва в виде квадрата, прямоугольника и треугольника составляет 200-240 мм, длина прямолинейных швов - 300 мм; при сварке круглым волноводом максимальный диаметр контура шва составляет 120 - 250 мм; при точечной сварке диаметр точки не должен превышать 15 мм. Этим способом хорошо свариваются такие материалы, как винипласт, полиэтилен, полиметилметакрилат, полистирол, а также ткани из синтетических волокон (капрон, лавсан).

Прессовая сварка может быть одно- и многопозиционной. Многопозиционная сварка, в частности, может осуществляться с помощью схемы с загнутыми волноводами, как было показано на рис. 5,8. Другим приемом, используемым при многопозиционной прессовой сварке, является применение устройств, позволяющих преобразовать продольные колебания в изгибные и наоборот. Например, при соединении длинной планки с трансформатором продольных колебаний в ней возникают изгибные колебания. Если в пучность этих колебаний поместить волноводы продольных колебаний, то последние будут усиливать амплитуду смещения; таким образом, каждый из них может быть использован для сварки самостоятельного изделия.

**Непрерывная сварка** обеспечивает получение протяженных непрерывных сварных швов за счет относительного перемещения волновода и свариваемого изделия. Она используется для сварки изделий из полимерных пленок и синтетических тканей: мешков, непроницаемой одежды, фильтров и т.д. Для непрерывной сварки используют схемы с фиксированной осадкой и с фиксированным зазором.

По степени механизации непрерывная сварка делится на ручную и механизированную.

При ручной непрерывной сварке для получения непрерывных швов любой протяженности оператор вручную перемещает сварочную головку, а изделие остается неподвижным. При этом за счет клинообразной заточки инструмента и незначительной толщины свариваемых материалов инструмент контактирует с небольшим объемом полимера. Таким способом можно соединять многослойные пакеты из полиэтилентерефталатной пленки, а также полипропиленовые и полиамидные пленки типа ПА-4, имеющие металлизированное, фотоэмульсионное или ферролаковое покрытие, без предварительного удаления последнего и т.д. Такую разновидность сварки называют также сваркой скользящим инструментом [10]. Ручная сварка полиэтиленовых пленок затруднена из-за периодического налипания размягченного полимера на инструмент, что в конечном счете приводит к прожогам свариваемого материала. Для устранения этого недостатка можно применять при сварке технологические прокладки из полимерных материалов (фторопласт и др.), металлической фольги, чертежной кальки и др. Ручную сварку можно использовать для соединения в труднодоступных местах, а также для прихватки деталей перед механизированной сваркой. В последнее время ручные ультразвуковые пистолеты нашли применение для сварки, наплавки и резки костных и других биологических тканей [18, 23, 24].

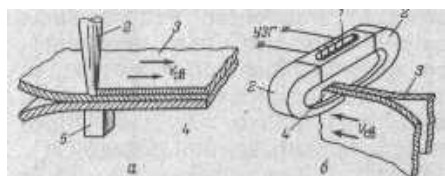


Рис. 5.15 Схема шовной сварки "на протяг" с односторонним (а) и двусторонним (б) подводом ультразвуковых колебаний:

1 – преобразователь; 2 – волновод; 3 – свариваемый материал; 4 – сварной шов; 5 – опора

Механизированная непрерывная сварка, как правило, осуществляется при перемещении свариваемого изделия, а сварочный волновод остается неподвижным. В зависимости от способа перемещения свариваемого материала механизированная

сварка делится на *шовно-шаговую* и *шовную*.

**Шовно-шаговая** сварка является разновидностью прессовой сварки. Сущность этого способа заключается в том, что после сварки шва материал освобождается из-под волновода и передвигается на шаг сварки, причем каждый последующий шов перекрывает предыдущий. В момент перемещения

свариваемого материала давление снимается. Этот способ сварки применяется для изготовления одежды из синтетических тканей и соединения различных пластмасс толщиной от 0,1 до 3 мм.

*Шовная сварка* может осуществляться по схеме "на протяг", (рис. 5.15), когда изделие протягивается между колеблющимся торцом волновода и опорой, и на вращающемся ролике (см. рис. 5.10,б).

В обоих случаях для ограничения подводимой механической энергии можно применять схему с фиксированным зазором или комбинированную схему с фиксированной осадкой и фиксированным зазором. Сварка "на протяг" может быть также осуществлена при протягивании свариваемого материала через зазор, образованный загнутыми инструментами или расщепленным волноводом (см. рис. 5.9,б,в). Такие схемы чаще всего используются в специализированных установках для сварки деталей определенной толщины, так как зазор между волноводами не регулируется. Двусторонний подвод энергии при шовной сварке может осуществляться и от двух сварочных головок, питающихся от одного генератора (см. рис. 5.9,а).

При сварке на вращающемся ролике вращение последнего обеспечивает перемещение свариваемого материала под волноводом и позволяет регулировать скорость сварки. Этот способ можно использовать для получения швов любой конфигурации (прямолинейных, криволинейных и т. д.). Для непрерывной шовной сварки нашли применение также конструкции, в которых используются вращающиеся преобразователи.

### 5.1.2. Параметры режима и рабочие циклы сварки

**Основные параметры ультразвуковой сварки**, характеризующие выделение энергии в зоне соединения: амплитуда колебаний рабочего торца волновода  $A$  (мкм); частота колебаний  $f$  (кГц); продолжительность ультразвукового импульса  $t_{св}$  (с) или в случае непрерывной сварки - скорость сварки  $V_{св}$  (м/с); сварочное статическое давление  $P_{ст}$  (Па) или усилие прижатия  $F$  (Н) волновода к материалу.

Дополнительные параметры режима сварки - размеры, форма и материал опоры  $b$  волновода, материал теплоизоляционных прокладок, температура предварительного подогрева волновода и т. д.

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

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

Свойства сварных соединений зависят не только от параметров режима сварки, но и от рабочего цикла.

**Рабочий цикл** определяется последовательностью приложения давления, включения, прохождения и выключения ультразвукового импульса, выдержки изделия под давлением и снятия давления. Цикл сварки служит основой для выбора схемы приложений давления и включения ультразвуковых колебаний сварочных машин.

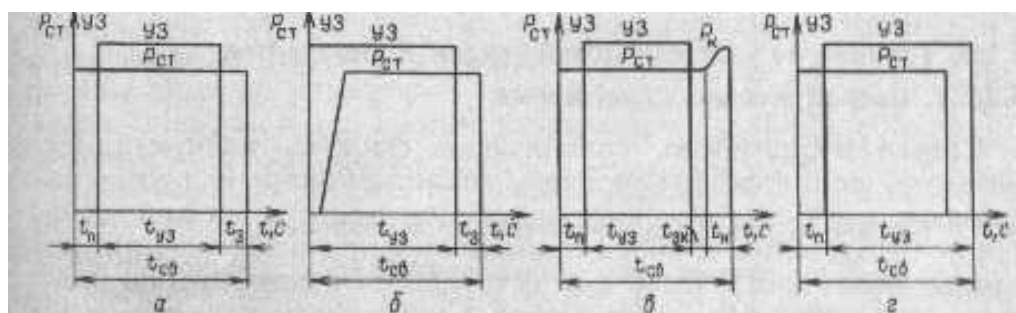


Рис. 5.16. Рабочие циклы при ультразвуковой сварке. Пояснения в тексте

Наиболее распространенный рабочий цикл ультразвуковой сварки (статическое давление - ультразвук) представлен на рис. 5.16,а. Статическое давление  $P_{ст}$ , прикладывается до включения

ультраульковых колебаний ( $t_n$  - время предварительного сжатия), остается постоянным в течение всего цикла и снимается с запаздыванием на  $t_3$ . Охлаждение материала сварного шва начинается, когда детали еще сжаты между волноводом и опорой. В течение всей операции сварки ультразвуковые колебания вводятся без перерыва в виде одного импульса. Такой цикл сварки используется на ультразвуковых установках МТУ- 1,5, УПК-15, УГМ-21 и др.

При цикле ультразвук - статическое давление (рис. 5-16,б) ультразвуковые колебания включаются до приложения давления. Первоначальное включение ультразвука позволяет очистить свариваемые поверхности от загрязнений.

При сварке изделий из жестких полимеров применяется рабочий цикл, представленный на рис. 5.16,в. В этом случае с целью уплотнения и повышения прочности сварного шва непосредственно после

выключения ультразвуковых колебаний увеличивается давление на волновод. Повышенное давление  $P_k$  (ковочное усилие) должно следовать за выключением ультразвуковых колебаний через небольшой, строго контролируемый интервал времени  $t_{зк}$  (время контролируемого запаздывания). При большом  $t_{зк}$  применение проковки не дает результатов, так как свариваемый материал успевает остыть до ее начала. При очень малом  $t_{зк}$  возможно выдавливание расплавленного материала из места сварки под действием значительного ковочного усилия  $P_k$ . В этом случае возможны выплески и прожоги полимера. Приведенный рабочий цикл целесообразно использовать при необходимости получить герметичный шов на объемных деталях, выполненных из ударопрочного полистирола. При этом применяются специальные разделки шва в виде замковых и клиновидных канавок.

На рис. 5.16, *г* показан нежелательный вариант рабочего цикла ультразвуковой сварки, в котором выключение ультразвуковых колебаний происходит при снятом сварочном давлении.

### 5.1.3. Технология ультразвуковой сварки термопластов

#### 5.1.3.1. Сварка жестких пластмасс

Сварка полистирола, сополимеров стирола, полиметилметакрилата, винипласта, капролона, поликарбоната и других полимеров, имеющих высокий модуль упругости и низкий коэффициент затухания, широко применяется при изготовлении различных объемных деталей и конструкций: от контейнеров и сосудов до товаров народного потребления (спортивных изделий и игрушек). В этом случае ультразвуковая сварка позволяет значительно снизить трудоемкость процесса, увеличить производительность труда, повысить культуру производства и освободиться от применения токсичных клеев, вредных для здоровья человека.

В зависимости от формы изделия и материала может применяться контактная и передаточная сварка или комбинация этих способов. При передаточной сварке нет необходимости разогревать весь объем материала. Сварной шов получается в результате расплавления полимера в зоне контакта деталей. Ясно, что в процессе сварки следует стремиться к концентрации энергии ультразвуковых колебаний непосредственно на стыкуемых поверхностях. Изменением геометрии свариваемых деталей можно концентрировать энергию ультразвуковых колебаний в том или ином сечении, что позволяет ускорять процесс сварки.

Уменьшение площади контакта деталей значительно повышает статические и динамические напряжения на стыках, что, в свою очередь, ведет к понижению температуры перехода полимера в вязкотекучее состояние и также способствует сокращению продолжительности сварки.

Рекомендуются разнообразные формы и размеры стыков деталей под ультразвуковую сварку в зависимости от конкретных изделий и материалов, но наиболее распространенной является V-образная разделка кромок, которая проста в изготовлении и дает хорошие показатели прочности сварных соединений. Наиболее эффективным углом при вершине V-образного выступа является угол  $90^\circ$ , при

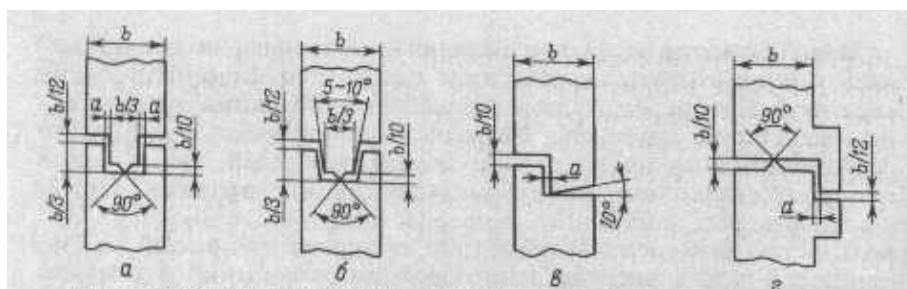


Рис. 5.17. Конструкции кромок стыкуемых деталей при сварке жестких пластмасс;  $a = 0.1$  мм. Пояснения в тексте

котором обеспечивается минимальная площадь контакта деталей перед сваркой [16, 21. 23].

Пропускание ультразвуковых колебаний ведет к увеличению динамических напряжений в выступе, который под их воздействием быстро разогревается. Расплавляясь, материал выступа растекается между свариваемыми

свариваемыми кромками, что вызывает интенсивный разогрев и оплавление материала деталей. С момента начала размягчения вершины выступа на продолжительность сварки значительное влияние оказывает вязкость расплава свариваемого полимера. Чем ниже вязкость расплава, тем быстрее растекается материал выступа между свариваемыми кромками и тем быстрее заполняет он зазоры.

Вид разделки стыкуемых кромок (рис. 5.17) зависит от требований к готовой продукции и теплофизических характеристик свариваемого материала.

Требования к готовой продукции определяются ее назначением. Их можно разбить на три основные группы: прочность, герметичность, внешний вид.

Разделка кромок, показанная на рис. 5.17, *а*, обеспечивает значительное повышение прочности и герметичности сварного шва. Такая разделка требует точной подгонки углубления в одной из стыкуемых деталей к выступу на другой, что вызывает ряд производственных трудностей. Конструкция разделки сварного шва, изображенная на рис. 5.17, *б*, не требует такой тщательной подгонки, как шов, показанный на рис. 5.17, *а*.

При сварке изделий, к которым предъявляются повышенные эстетические требования, можно использовать разделку стыков, приведенную на рис. 5.17, *в*.

Разделки стыкуемых кромок, применяемые при сварке емкостей или контейнеров, изображены на рис. 5.17,а. При использовании разделок, показанных на рис. 5.17,а,б, происходит образование видимого валика за счет выплесков расплавленной пластмассы. Применение разделок, приведенных на рис. 5.17,в,г, исключает видимый валик или делает его малозаметным.

При изготовлении газо- и водонепроницаемых баллонов предпочтение следует отдать разделкам, показанным на рис. 5.17,г, которые обеспечивают достаточно высокую прочность и отвечают эстетическим требованиям. Разделку кромок в этом случае рекомендуется использовать для материалов, обладающих узким интервалом температур вязкотекучего состояния, например для полиацетатной смолы. Прочность сварных соединений достигается увеличением площади шва, герметичность - конструированием шва в виде ломаной линии, эстетичность - принудительным выдавливанием грата на невидимую сторону шва.

В некоторых случаях конструкция разделки проектируется с углами, отличными от 90°: может быть разделка кромок с углом при вершине V-образного выступа в 60 и в 45°. Между сопрягаемыми по вертикали деталями необходимо предусматривать зазор, примерно равный 0,1 мм.