

5.1. СВАРКА ПЛАСТМАСС УЛЬТРАЗВУКОМ

Способ разработан в 1958 г. учеными МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством академика Г.А.Николаева. Основными достоинствами ультразвуковой сварки (УЗС) пластмасс являются: возможность выполнения соединений в труднодоступных местах; возможность получения неразъемного соединения при сварке жестких пластмасс на большом удалении от точки ввода ультразвуковой энергии; возможность сварки по поверхностям, загрязненным различными продуктами; локальное выделение тепла в зоне сварки, что исключает перегрев пластмассы (как это имеет место при сварке нагретым инструментом, нагретыми газами и т.д.); быстрота нагрева материала до температуры вязкотекучего состояния (время нагрева исчисляется секундами и долями секунды).

В настоящее время существуют различные схемы, по которым может осуществляться ультразвуковая сварка полимерных материалов. Это обусловлено разнообразием свойств и структуры свариваемых материалов, конфигурации и размеров детали, требований, предъявляемых к сварным швам и свариваемому изделию в целом.

Полная классификация схем ультразвуковой сварки пластмасс должна производиться с учетом всех основных признаков. К этим признакам относятся: 1) подвод энергии механических колебаний к свариваемому изделию; 2) передача механической энергии к зоне сварки; 3) концентрация энергии в зоне сварки; 4) дозирование вводимой энергии; 5) взаимное перемещение сварочного волновода-инструмента и свариваемых деталей для получения швов необходимой конфигурации и протяженности. Классификация схем ультразвуковой сварки с учетом этих признаков [2] приведена на рис. 5.1.



Рис.5.1. Классификация схем ультразвуковой сварки пластмасс

5.1.1. Сущность и схемы процесса

5.1.1.1. Схемы ультразвуковой сварки

Способ ультразвуковой сварки пластмасс заключается в следующем. Электрические колебания ультразвуковой частоты (18-50 кГц), вырабатываемые генератором, преобразуются в механические продольные колебания магнитострикционного преобразователя 2, вводятся в свариваемый материал 5 с

помощью продольно-колеблющегося инструмента-волновода 4, расположенного перпендикулярно свариваемым поверхностям (рис. 5.2).

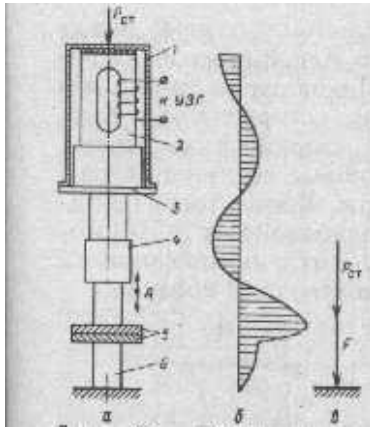


Рис. 5.2. Ультразвуковая сварка с нормальным вводом колебаний: а – схема установки; б – эпюра амплитуды смещения колебательной системы; в – расположение векторов статического давления  $P_{ст}$  и динамического усилия  $F$ ; А – амплитуда смещения волновода; 1 – корпус; 2 – преобразователь с обмоткой; 3 – трансформатор упругих колебаний; 4 – волновод; 5 – свариваемые детали; 6 – опора.

Часть энергии механических колебаний переходит в тепловую, что приводит к нагреву зоны контакта соединяемых деталей до температуры вязкотекучего состояния. Надлежащие условия ввода механических колебаний и создание тесного контакта свариваемых деталей, расположенных на опоре 6, обеспечиваются статическим давлением  $P_{ст}$  рабочего торца волновода на свариваемые детали. Это давление способствует также концентрации энергии в зоне соединения. Динамическое усилие  $F$  возникающее в результате воздействия колеблющегося волновода, приводит к нагреву свариваемого материала, а действие статического давления  $P_{ст}$  обеспечивает получение прочного сварного соединения. Механические колебания и давление в этом случае действуют вдоль одной линии: перпендикулярно к свариваемым поверхностям. Такая схема ввода энергии применяется для ультразвуковой сварки пластмасс, в отличие от сварки металлов, когда механические колебания действуют в плоскости соединяемых поверхностей, а давление прикладывается перпендикулярно к ним. Подвод энергии от волновода может быть односторонним и двусторонним.

По основной схеме осуществляется также подвод энергии к свариваемым деталям, изображенным на рис. 5.3. Здесь силы  $P_{ст}$  и  $F$  воздействуют на дополнительный присадочный материал (пруток, уложенный в V-образный зазор между свариваемыми деталями). Воздействие ультразвуковых колебаний на пруток приводит к его пластификации, а под действием статического давления пластифицированный материал заполняет зазор, образуя прочное соединение. Для получения протяженных швов перемещают сварочную

головку вдоль присадочного прутка. Аналогичный эффект может быть получен при заполнении зазора между кромками свариваемых деталей гранулами или стружкой из соответствующего полимерного материала.

Такая схема сварки позволяет расширить номенклатуру изделий, которые могут быть изготовлены с помощью ультразвуковой сварки; в частности, можно получать стыковые, тавровые и угловые соединения различных листов на большой протяженности. Кроме того, по такой схеме можно производить сварку однослойных и многослойных листов большой толщины (до 10 мм) и протяженности по прямолинейному, криволинейному и замкнутому контурам.

Близка к описанной выше схема, приведенная на рис. 5.4, разработанная применительно к сварке мягких пластмасс типа полиэтилена. Здесь соединение образуется за счет расплава, выдавливаемого волноводом-инструментом из зоны контакта вспомогательных технологических термопластичных деталей, играющих роль присадочного материала (сварка вытесненным расплавом). Последние две схемы сварки могут использоваться для однослойной или многослойной сварки встык и рантовым швом листовых изделий большой толщины и протяженности по прямолинейному и замкнутому контурам.

При нормальном по отношению к соединяемым поверхностям вводе энергии упругих колебаний трудно, а зачастую невозможно получить стыковые соединения листов или деталей, имеющих форму стержней значительной длины. В этих случаях наиболее благоприятным является ввод в изделие энергии колебаний в непосредственной близости от зоны сварки.

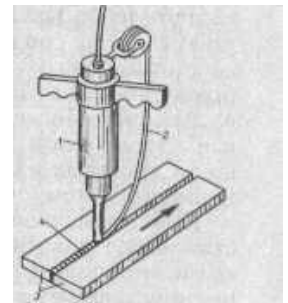


Рис. 5.3. Схема сварки с дополнительным присадочным материалом: 1 – преобразователь с волноводом-инструментом; 2 – присадочный материал; 3 – свариваемое изделие; 4 – сварной шов

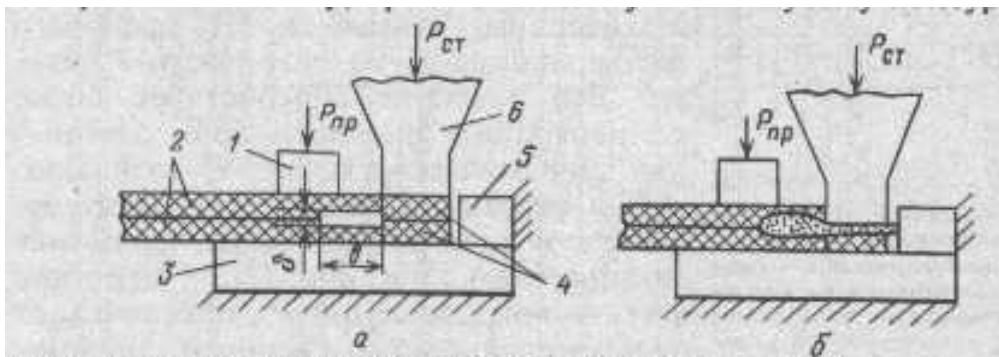


Рис. 5.4. Схема ультразвуковой сварки вытесненным расплавом а - начало сварки; б - ее окончание; 1 – прижим; 2 – свариваемые детали; 3 – опора; 4 – технологические детали, подвергающиеся ультразвуковому воздействию; 5 – упор; 6 – волновод;  $P_{пр}$  – давление прижатия;  $P_{ст}$  – статическое сварное давление;  $\delta$  и  $\epsilon$  – толщина и ширина технологического зазора соответственно

Конструкции стыковых соединений при сварке с дополнительным усилием сжатия  $P_{сж}$ , перпендикулярным

$P_{ст}$ , приведены на рис. 5.5. По одной из таких схем (рис. 5.5,а) ультразвуковые колебания вводятся в изделие параллельно соединяемому стыку за счет прижатия к нему волновода усилием  $P_{ст}$ . Необходимым только для осуществления акустического контакта. Для создания осадки материала в зоне сварки перпендикулярно к свариваемому стыку прикладывается дополнительное усилие сжатия  $P_{сж} > P_{ст}$ . Разновидностями такой схемы являются: сварка "замкового" соединения (рис. 5.5,б), соединения "в ус" (рис. 5.5,в) и соединения с концентраторами напряжений в зоне стыка (рис. 5.5,г).

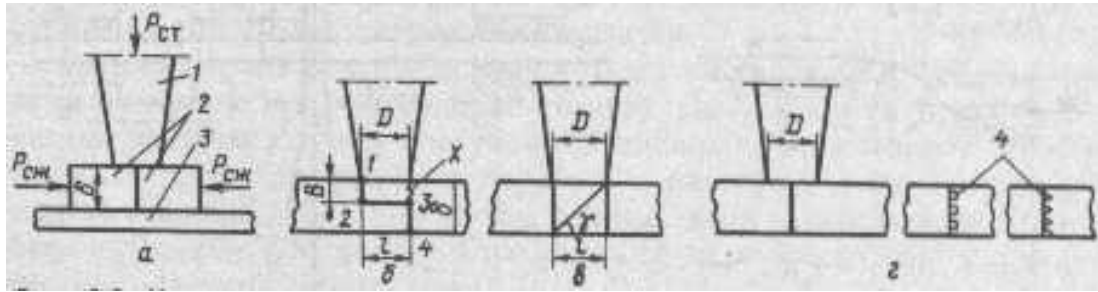


Рис. 5.5. Конструкции стыковых соединений при сварке с дополнительным усилием сжатия  $P_{сж}$ , перпендикулярным  $P_{ст}$ : а - "плоский стык"; б - "замковое соединение"; в - соединение "в ус", г - соединение с концентраторами напряжений в зоне сварки, 1 - сварочный инструмент-волновод; 2 - свариваемые детали; 3 - опора; 4 - виды концентраторов напряжений; 5 - толщина изделия; в - толщина полки замкового соединения; D - ширина свариваемого участка, равная диаметру волновода; X - участок опасного сечения при сварке

Другими способами ввода энергии упругих колебаний в непосредственной близости от зоны сварки являются сварка с тангенциальным вводом колебаний и относительным перемещением элементов в плоскости стыка (рис. 5.6,а) и сварка с двусторонним тангенциальным вводом колебаний (рис. 5.6,б). Существенным недостатком первой схемы является происходящее вследствие совместного действия статических и динамических напряжений разрушение детали в зоне закрепления ее в зажиме сварочной

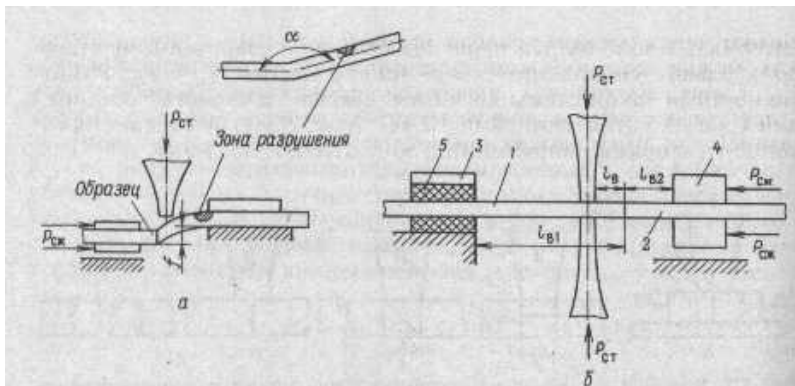


Рис. 5.6. Схема стыковой ультразвуковой сварки с тангенциальным вводом колебаний: а - с относительным перемещением элементов (отдельно показано сварное соединение, полученное по такой схеме); б - с двусторонним вводом колебаний и относительным перемещением элементов; 1, 2 - образцы; 3 - неподвижный зажим; 4 - подвижный зажим; 5 - резиновая прокладка;  $l_{в1}$  и  $l_{в2}$  - длины вылета образцов;  $l_{в}$  - расстояние от боковой поверхности волновода до зоны сварки; f - прогиб образца

неподвижном 3 и подвижном 4 зажимах. Между ними создается давление  $P_{сж}$ . В контакт с образцом 1 вступают два волновода, которые прижимаются к нему статическим давлением  $P_{ст}$ . Волноводы соединены с преобразователями, работающими в противофазе. При включении ультразвуковых колебаний зона сварки разогревается за счет относительного перемещения контактирующих торцов стержней. В результате совместного действия температуры и статического давления образуется неразъемное соединение.

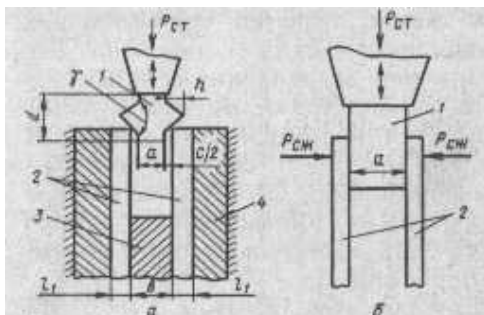


Рис. 5.7. Ультразвуковая сварка впрессовкой в постоянный (а) и переменный (б) зазор: 1 - соединительный элемент-вкладыш; 2 - соединяемые пластины; 3 - установочный вкладыш; 4 - кондуктор;  $\gamma$  - угол V-образного выступа; d - высота соединительного элемента-вкладыша; h - высота V-образного выступа; l - толщина соединительных пластин

Сварка с нормальным вводом колебаний, а также крутильными и продольно-крутильными колебаниями может с успехом применяться для соединения впрессовкой в постоянный и переменный зазор (рис. 5.7) [18]. При ультразвуковой сварке впрессовкой в постоянный зазор (рис. 5.7,а) ультразвуковые колебания передаются в зону сварки через соединительный элемент-вкладыш 1, размеры которого определяют расстояние между соединяемыми пластинами 2, расположенными параллельно друг другу в специальном кондукторе. Расстояние между пластинами b равно ширине вкладыша a плюс технологический зазор c. Сварка происходит за счет расплавления V-образного выступа и материала пластин. Расстояние между пластинами в процессе сварки остается постоянным, так как оно предварительно задается установочным вкладышем 3 и кондуктором 4.

При ультразвуковой сварке впрессовкой в переменный

зазор (рис. 5.7,б) ультразвуковые колебания также передаются в зону сварки через соединительный элемент-вкладыш 1, который зажат между свариваемыми пластинами 2, сжатыми давлением  $P_{сж}$ . Сварка происходит за счет расплавления прилегающих друг к другу слоев вкладыша и пластин. В процессе сварки расплавленный полимер выдавливается из зоны контакта пластин с вкладышем, и свариваемые пластины сближаются, т.е. расстояние между пластинами уменьшается.

Как видно из рис. 5.2,а, для отбора энергии от преобразователя используется один из его торцов.

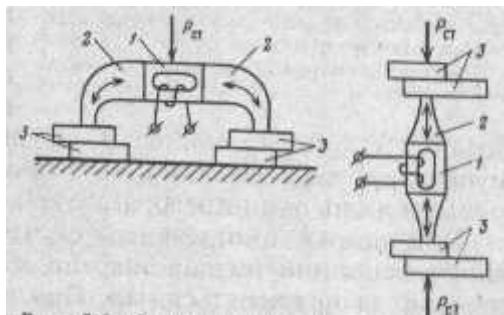


Рис. 5.8. Схемы сварки с двусторонним отбором энергии от преобразователя:  
1 - преобразователь, 2 - волновод; 3 - свариваемые детали

Другой торец преобразователя в этом случае соединяется с экраном, которым может служить либо герметичная коробка с воздухом, либо специальная акустическая или губчатая резина. При одностороннем отборе звуковые колебания, отражаясь от нерабочего торца преобразователя, достигают излучающей поверхности (рабочего торца) в соответствующей фазе, при этом амплитуда колебаний увеличивается примерно в 2 раза, а излучаемая мощность - в 4 раза.

Отбор механической энергии от преобразователя может осуществляться и с двух его торцов, в этом случае к ним присоединяют прямые или загнутые волноводы (рис. 5.8). Необходимо учитывать, что системы с двусторонним отбором энергии обеспечивают меньшую амплитуду колебаний рабочего торца инструмента по сравнению с системами с односторонним отбором энергии,

Подвод энергии от колеблющегося волновода к свариваемой детали может быть односторонним или двусторонним. Односторонний ввод энергии характеризуется простотой кинематических схем сварочных устройств. Свариваемое изделие располагается между рабочим торцом волновода и опорой (см. рис. 5.2, а). При двустороннем подводе энергии используются сварочные устройства более сложной конструкции (рис. 5.9).

При одностороннем отборе энергии от преобразователя для двустороннего подвода необходимо наличие двух сварочных головок, располагаемых симметрично с обеих сторон свариваемого изделия (рис. 5.9,а). При двустороннем отборе энергии возможен как односторонний подвод энергии, так и двусторонний. Двусторонний подвод энергии в этом случае осуществляется волноводами, соединенными с обоими торцами преобразователя и направленными навстречу друг другу (рис. 5.9,б).

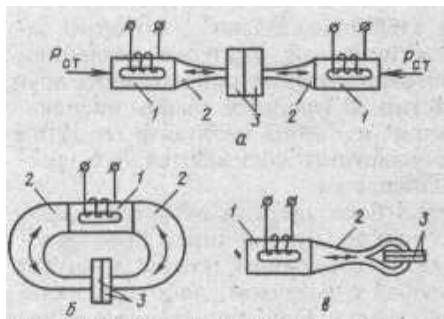


Рис. 5.9. Схемы двустороннего подвода энергии с помощью двух сварочных головок (а), загнутых волнопроводов (б) и раздвоенного волновода (в):  
1 - преобразователь; 2 - волновод; 3 - свариваемые детали

Необходимый акустический контакт между частями изделия и волноводами обеспечивается при этом за счет того, что зазор между торцами волнопроводов устанавливается несколько меньше суммарной толщины свариваемых деталей. На рис. 5.9,в показано устройство для сварки с двусторонним отбором энергии от преобразователя и двусторонним подводом энергии, в котором рабочие торцы волнопроводов выполнены раздвоенными и загнутыми навстречу друг к другу. Использование такого устройства позволяет производить одновременную сварку двух изделий с двусторонним подводом энергии, используя лишь один преобразователь. При сварке в отдельных случаях может осуществляться и многосторонний подвод энергии к свариваемому изделию. При этом могут применяться как обычные сварочные головки, так и головки с гибкой акустической связью преобразователя с кольцевым инструментом, предназначенные для сварки цилиндрических деталей [18].

Интенсивность подвода энергии, тепловыделение и деформация полимера в значительной степени зависят от условий теплоотвода от нагретого изделия к волноводу. Изменение условий теплоотвода может осуществляться различными приемами. Известен способ ультразвуковой сварки с обдувом поверхности контактирования волновода с изделием струей воздуха. При этом происходит незначительное изменение температурного режима, но даже оно может в отдельных случаях заметно перестроить тепловой режим сварки, устраняя одновременно деформацию и выплески размягченного материала и улучшая внешний вид сварного соединения. При многослойной сварке полимерных пленок иногда применяется дополнительный подогрев волновода или опоры. Часто для изменения теплоотвода используются теплоизоляционные прокладки, помещаемые между волноводом и изделием или между опорой и изделием. В качестве прокладок используют бумагу, целлофан, фторопласт, а также полимерные пленки с температурой плавления более высокой, чем у свариваемого материала [3, 4, 10].

### 5.1.1.2. Передача энергии к зоне сварки

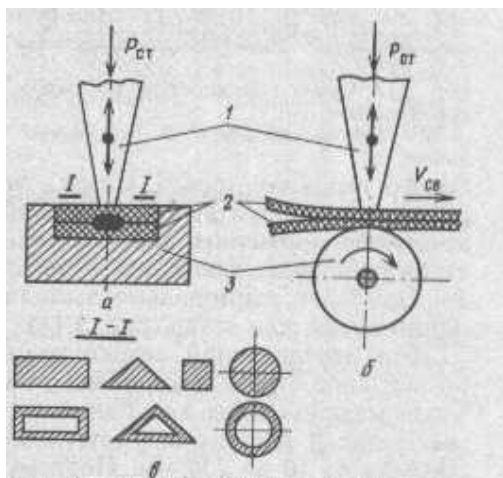


Рис. 5.10. Схема контактной ультразвуковой сварки: а – прессируемая; б – шовная; в – возможные формы рабочего торца волновода; 1 – волновод; 2 – свариваемые детали; 3 – опора

полиэтилен, полипропилен, а также пленок и синтетических тканей небольшой толщины - от 0,02 до 5 мм. При этом способе сварки наиболее распространены соединения внахлестку. Так как плоскость ввода механических колебаний (плоскость контакта волновода - полимер) располагается на незначительном расстоянии от плоскости раздела свариваемых материалов, определяемой толщиной верхней детали, контактную ультразвуковую сварку иногда называют "ближней" или "сваркой в ближнем поле".

Передачная ультразвуковая сварка. Если полимерный материал обладает высоким модулем упругости и низким коэффициентом затухания, то сварное соединение можно получить на большом удалении от поверхности ввода механических колебаний. В этом случае ввод механических колебаний может осуществляться в точке или на небольшом участке поверхности верхней детали. Благодаря хорошим акустическим свойствам материала изделия энергия ультразвуковой волны незначительно ослабляется при проходе через деталь, контактирующую с волноводом, к границе раздела свариваемых деталей. Тепловыделение на границе раздела в этом случае зависит от конфигурации изделия, а площадь сварки значительно отличается от площади рабочего торца волновода. Сварка по такой схеме называется передачной ультразвуковой сваркой. Передачную сварку рекомендуется применять для соединения объемных деталей из жестких пластмасс, таких, как полистирол, полиметилметакрилат и др. Наиболее рационально выполнение таким способом соединений встык или втавр (рис. 5.11).

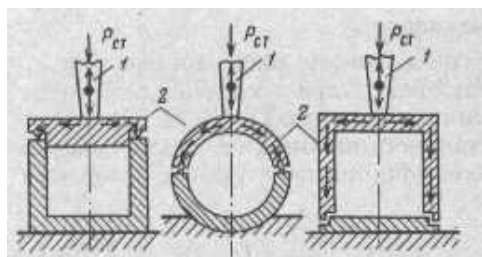


Рис. 5.11. Схема передачной ультразвуковой сварки: 1 – волновод-инструмент; 2 – свариваемое изделие

передачи энергии и расширить тем самым технологические возможности процесса. Необходимое изменение физико-механических свойств может быть достигнуто охлаждением свариваемых деталей до температуры стеклования полимера (или несколько ниже).

Выбор температуры охлаждения зависит от типа полимерного материала. Для полиэтилена она составляет 203°K, для полипропилена 243°K, пластифицированного поливинилхлорида 253°K, непластифицированного поливинилхлорида 263°K. Охлаждение ниже указанных температур недопустимо, так как повышенная хрупкость материала при механическом воздействии волновода может привести к появлению трещин в свариваемом материале. Охлаждение свариваемых деталей целесообразно лишь в области, лежащей между зоной сварки и рабочим торцом волновода. Охлаждение позволяет в отдельных случаях осуществлять передачную сварку таких материалов, как полипропилен, полиэтилен и другие, уменьшать потребляемую мощность сварочного оборудования и устранять дефекты, вызываемые перегревом деталей вне зоны сварки [18, 24].

Свариваемость отдельных видов полимерных материалов зависит также от содержащихся в них наполнителей, красителей, способа получения заготовки и т.п. Условием получения высококачественного соединения при сварке двух полимерных материалов является их приблизительно одинаковая температура

По характеру передачи энергии к границе раздела и распределения ее по свариваемым поверхностям ультразвуковая сварка может быть разделена на контактную и передачную [3, 18, 22, 23].

Возможность передачи механической энергии к зоне сварки зависит от упругих свойств и коэффициента затухания колебаний в свариваемых материалах.

**Контактная ультразвуковая сварка.** Если полимерный материал характеризуется низким модулем упругости и большим коэффициентом затухания, то сварное соединение можно получить лишь на малом удалении от плоскости ввода колебаний. Для равномерного распределения энергии по всей площади контакта свариваемых деталей необходимо, чтобы рабочий торец волновода, соприкасающийся с верхней деталью, имел площадь и форму, идентичную площади и форме свариваемых деталей.

Сварка по такой схеме называется контактной ультразвуковой сваркой (рис. 5.10).

Контактная ультразвуковая сварка обычно применяется для соединения изделий из мягких пластмасс, таких, как

При передачной сварке волновод желательно располагать по оси симметрии свариваемого изделия. Удаление поверхности ввода механических колебаний от плоскости раздела свариваемых деталей зависит от упругих свойств материала и может составлять от 10 до 250 мм. Поэтому передачную сварку иногда называют "дальней", "сваркой в дальнем поле" или "дистанционной".

Как уже отмечалось, возможность эффективной передачи энергии определяется физико-механическими свойствами свариваемого материала. Изменение этих свойств, в частности повышение модуля упругости и уменьшение коэффициента затухания, может значительно изменить характер

плавления и химическое сродство, В табл. 5.1 приведены характеристики материалов на основе различных полимеров с точки зрения свариваемости и пригодности к другим видам соединения с помощью ультразвука.

Таблица 5.1. Способность различных полимеров к соединению с помощью ультразвука

Материал	Сварка		Заклепочное соединение	Прессовое соединение
	контактная	передаточная		
Полистирол	1	1	1	1
АБС - пластик	1	2	1	1
Сополимер стирола с акрилонитрилом	1	1	1	1
Полиметилметакрилат	1	1	1	2
Поликарбонат	1	1	1	1
Полиамид	2	3.4	2	2
Полиэфир	1	3	3	3
Поливинилхлорид: непластифицированный	1.2	2.3	2.3	1
пластифицированный	2	4	4	3.4
Полиэтилен	2	4	4	3.4
Полипропилен	2	4	4	3.4

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