

## **ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СВАРКЕ ПЛАСТМАСС**

### **2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ СВАРКИ**

Сварные соединения являются неразъемными, т.е. не могут быть разобраны без поломки деталей. Это свидетельствует о монолитности (сплошности) сварных соединений. Такая монолитность может быть обеспечена, если между поверхностными макромолекулами соединяемых деталей возникнут силы взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса) и произойдет их взаимное перемещение из одной детали в другую, например за счет диффузии.

Казалось бы, достаточно сблизить поверхности на такие расстояния (0,3-0,4 им), на которых начинают заметно проявляться эти силы, чтобы между поверхностными макромолекулами свариваемых пластмасс возникли связи, исчезла граница раздела и произошла сварка. Именно этими соображениями руководствуются некоторые авторы, определяя сварку как технологический процесс получения неразъемного соединения частей изделия, основанный на взаимной диффузии и химическом взаимодействии макромолекул полимеров, в результате которых между соединяемыми поверхностями исчезает граница раздела.

Однако даже в идеальном случае, когда на соединяемых поверхностях отсутствуют микронеровности (идеально гладкие поверхности), различные загрязнения, адсорбированные газы и другие составляющие, препятствующие такому сближению, необходима затрата извне деформационной и тепловой энергии. Деформационная энергия будет затрачиваться на преодоление сил отталкивания, возникающих между сближаемыми поверхностными атомами. Тепловая энергия увеличивает вероятность развития взаимодействия между ними. Если исходить из таких представлений, то в сварочной зоне можно выделить два основных процесса: первый - подвод и преобразование энергии и второй - движение (или превращение) вещества. Интенсивность процесса преобразования энергии и его характер определяют вид сварки [1-5].

Для осуществления процесса сварки необходима активация свариваемых поверхностей. Это достигается за счет подвода и, в некоторых случаях, преобразования энергии. Введение вещества необходимо только при некоторых видах сварки пластмасс, например при сварке нагретым газом с применением присадочного материала, а также при сварке расплавом. В последнем случае с присадочным материалом и расплавом подводится и энергия.

Движение вещества при различных видах сварки пластмасс может быть значительным. Оно обусловлено перемешиванием и диффузией, протекающими в материале, нагретом до вязкотекучего состояния. Особым видом движения следует считать химическую реакцию активных групп, расположенных на свариваемых поверхностях, между собой или с активными группами промежуточного вещества, которая также может протекать при подводе энергии того или иного вида (химическая сварка) [1,4, 16].

Исходя из сказанного, можно считать, что в термодинамическом смысле не может быть разницы в определении сварки пластмасс и металлов. Это определение может быть сформулировано следующим образом: сварка - это процесс получения монолитного соединения материалов за счет введения и термодинамически необратимого преобразования энергии и вещества в месте соединения [16-19].

### **2.2. МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА СВАРКИ И СВАРИВАЕМОСТЬ ПЛАСТМАСС**

Согласно современным представлениям, процесс сварки следует рассматривать как топохимическую реакцию, т.е. химическую реакцию, протекающую по поверхности твердого тела. В основе любой химической реакции лежит процесс разрыва связей в исходных веществах и возникновения новых связей, приводящий к образованию нового вещества. Таким образом, механизм образования соединения не должен меняться при переходе от одного способа сварки к другому и от одного материала к другому. Изменяется только совокупность явлений на контактных поверхностях, приводящая их в состояние взаимодействия. Эти явления могут быть различными и определяются природой материала и способом сварки [1-5, 10, 16, 18].

Для топохимической реакции характерно протекание в три стадии: образование физического контакта; активация контактных поверхностей; объемное развитие взаимодействия.

**Образование физического контакта** происходит обычно при приложении к свариваемым деталям давления. В отдельных случаях, когда в зону сварки поступает расплавленный присадочный материал, физический контакт между ним и свариваемыми кромками может осуществляться без приложения давления или при сравнительно небольшом давлении. Это относится к сварке нагретым газом и экструзионной сварке.

Установление физического контакта между свариваемыми поверхностями может предшествовать нагреву, осуществляться после нагрева соединяемых поверхностей до температур сварки или одновременно с нагревом. В любом случае на этой стадии происходит пластическое деформирование макро- и микронеровностей, за счет чего происходит сближение контактирующих поверхностей. Работа деформации затрачивается также на удаление из контактной зоны инородных включений (газовых пузырей, масляных и жировых пятен и других загрязнений). Для мягких пластмасс и волокнистых материалов на этой стадии характерно уплотнение, проявляющееся в уменьшении толщины материала.

**Активация** свариваемых поверхностей включает в себя их нагрев для повышения энергии теплового движения макромолекул. Нагрев может осуществляться либо непосредственно за счет передачи тепла от нагретых инструмента, газа или присадочного материала к свариваемым деталям, либо за счет преобразования других видов энергии в тепловую. Это может быть механическая энергия ультразвуковых колебаний или трения, энергия высокочастотного электрического поля конденсатора, электромагнитная энергия, энергия инфракрасного излучения, лазера и централизованного светового луча.

При сварке с использованием преобразования различных видов энергии в тепловую термической активации поверхностей будут предшествовать процессы, связанные со спецификой данного вида сварки: смещение диполей - при сварке токами высокой частоты; ввод и распространение ультразвуковых колебаний, а также концентрация и преобразование энергии механических колебаний в тепловую энергию - при ультразвуковой сварке; поглощение лучистой энергии - при сварке инфракрасным излучением.

Стадия термической активации может также сопровождаться развитием деформационных процессов, так как действие статической, а при ультразвуковой сварке и динамической нагрузок приводит к внедрению инструмента в поверхность соприкасающейся с ним детали, а также к вытеснению пластицированного или расплавленного материала из зоны сварки.

**Объемное развитие взаимодействия** сопровождается рядом сложных физико-химических процессов, среди которых наиболее существенными являются диффузия, течение и физико-химические превращения. Теория сварки, в которой главенствующая роль на этом этапе отводится диффузии, названа диффузионной. Теория, в которой считается, что ответственными за свариваемость являются процессы течения, названа реологической ~ по названию науки реологии, изучающей закономерности течения.

Согласно диффузионной теории, для получения соединения необходимо, чтобы при соприкосновении двух поверхностей вещества происходило достаточно полное их слияние (коалесценция). Полная коалесценция двух слоев жидкости происходит при непосредственном их контакте и сопровождается исчезновением границы раздела между ними. В случае соединения полимеров одного контакта для коалесценции недостаточно, так как должно еще произойти структурообразование в зоне контакта, которое может быть достигнуто за счет диффузии макромолекул в целом или отдельных сегментов. Перемещению сегментов препятствуют их связи с остальной макромолекулой, поэтому диффузия сегментов вызывает некоторое изменение конфигурации цепной молекулы. В результате этого большое число последовательных перемещений сегментов будет приводить не только к изменению формы макромолекул, но и к смещению их центров тяжести. Перемещение сегментов и макромолекул в целом получило название микроброуновского и мак-роброуновского движения соответственно.

Перемещение макромолекул целиком особенно легко может происходить в том случае, если контакт слоев полимера осуществляется при температуре выше температуры течения. В этом случае в зоне контакта сравнительно легко возникает структура, характерная для полимера. Диффузия отдельных сегментов макромолекул может происходить и при температурах, отвечающих высокоэластическому состоянию полимера, при этом перемещение молекулы в целом затруднено. При таких температурах степень коалесценции меньше единицы (максимальная

степень коалесценции равна единице и наблюдается только у жидкостей), ^го объясняется тем, что после перемещения сегментов на определенную глубину диффузия прекращается из-за напряжений, возникающих в молекулярных цепях.

Доказательством диффузионного характера процесса сварки может служить то обстоятельство, что все меры, способствующие тепловому движению (повышение давления и температуры, введение пластификаторов и т. д.), вызывают увеличение прочности сварного соединения и, наоборот, факторы, замедляющие диффузию, снижают прочность.

Сторонники реологической теории указывают, что если бы за образование соединения была ответственна только диффузия, то время сварки составляло бы десятки минут. Однако на практике это время значительно меньше. Кроме того, следует учитывать, что процессу диффузии неизбежно препятствуют воздушные прослойки и загрязнения поверхностных слоев свариваемых материалов, поэтому время проникновения еще более увеличивается. Наконец, следует иметь в виду, что коэффициент диффузии не остается постоянным, а непрерывно снижается, так как по мере проникновения участков макромолекул через границу раздела непрерывно возрастает их торможение.

Поэтому сторонники реологической теории предполагают, что проявлению сил межмолекулярного взаимодействия и диффузии в контактирующих объемах предшествует ряд явлений, связанных с течением и перемешиванием расплава [1-4, 16].

Считается, что при контакте расплавленных поверхностей напряжения, создаваемые усилием прижима (а при ультразвуковой сварке и динамические напряжения), вызывают сдвиг слоев расплава. При таком сдвиге происходит удаление из зоны соединения воздушной прослойки и других инородных включений, а расплав выдавливается из зоны сварки, что свидетельствует о получении качественного сварного соединения. Скорость сдвига на различных участках контактирующих поверхностей может различаться из-за неравномерности распределения температур и напряжений. Все это может привести к перемешиванию расплава в контактирующих объемах, что особенно вероятно в случаях сварки с использованием высокочастотных механических (ультразвуковая сварка) или электрических (сварка ТВЧ) колебаний [1-4].

Явление перемешивания вязкотекучего материала в зоне сварки подтверждено экспериментально при изучении процесса сварки пластмасс нагретым инструментом. Повидимому, для макро-объемов вязкотекучего материала при сварке характерен процесс перемешивания, а для микрообъемов - процесс диффузии.

Если сварка проводится в интервале температур высокоэластичности, преимущественным является диффузионный механизм. При этом необходим длительный контакт свариваемых поверхностей друг с другом, сварные швы сохраняют границу раздела, а материал в зоне соединения не отличается от исходного по надмолекулярной структуре. Такая сварка протекает при значительных давлениях, что обуславливает значительные остаточные напряжения в зоне шва после охлаждения соединения [7-10].

Если сварка проводится в интервале температур вязкотекучести (для аморфных полимеров) или в интервале температур плавления (для частично-кристаллических полимеров), процесс подобен сварке металлов. Под воздействием внешних сил происходит быстрая коалесценция расплава, сопровождающаяся перемещением и перемешиванием слоев. При этом слои расплава, содержащие газовые и оксидные включения, удаляются из зоны сварки, что облегчает дальнейшую взаимную диффузию участков молекулярных цепей и целых макромолекул в микрообъемах. В сварных швах таких соединений практически отсутствует граница раздела соединяемых поверхностей. Они не разрушаются по первоначальной плоскости контакта, а надмолекулярная структура может изменяться в зависимости от условий охлаждения расплава [9-11].

В связи с тем, что сварка плавлением на заключительном этапе связана с течением расплава, свариваемость пластмасс оценивают по таким характеристикам, как энергия активации вязкого течения, температурный интервал вязкотекучего состояния и вязкость расплава. В свете этих представлений становится очевидным, что чем меньше энергия активации вязкого течения и вязкость расплава и чем больше температурный интервал вязкотекучести, тем более вероятно образование высококачественного сварного соединения. По реологическим свойствам пластмассы могут быть разделены на три группы [1, 4, 10, 16, 18, 19].

К первой группе можно отнести неориентированные термопласты, у которых энергия активации вязкого течения значительно меньше энергии химической связи и не превышает 150 кДж/моль; температурный интервал вязкотекучего состояния ( $T_T$  и  $T_P$  где  $T_T$  - температура текучести, а  $T_P$  - температура разложения) превышает 50 °С; вязкость расплава составляет  $10^2$ - $10^5$  Па · с.

Такие термопласты при нагреве переходят в вязкотекучее состояние без термодеструкции и пребывают в вязкотекучем состоянии в достаточно широком интервале температур; при этом вязкость расплава такова, что при незначительных усилиях может быть обеспечена быстрая и полная его коалесценция. Эти термопласты хорошо свариваются плавлением различными методами сварки в широком интервале режимов. Наиболее типичные представители этой группы термопластов - полиолефины.

Ко второй группе можно отнести ориентированные термопласты с указанными выше реологическими свойствами; неориентированные и ориентированные термопласты с высокой энергией активации вязкого течения (близкой к энергии химической связи); термопласты с узким интервалом между температурой текучести и температурой разложения (менее 50 °С) и сравнительно высокой вязкостью расплавов.

Для термопластов с высокой энергией активации вязкого течения существует опасность деструкции при нагреве до вязкотекучего состояния. Термопласты с узким температурным интервалом между  $T_t$  и  $T_p$  могут разлагаться при незначительном перегреве. В ориентированных термопластах при нагреве до вязкотекучего состояния неизбежно нарушается ориентированная структура, обеспечивающая прочность материала. У термопластов с высокой вязкостью расплавов трудно обеспечить полную коалесценцию и перемешивание расплава.

Такие термопласты могут свариваться плавлением только при некоторых обязательных условиях. Для ориентированных материалов и материалов с узким интервалом между  $T_t$  и  $T_p$  сварка плавлением не должна вызывать разориентацию и деструкцию материала, что возможно только при условии быстрого и ло

кального нагрева до температуры текучести свариваемых поверхностей без проплавления материала по всей толщине. Что касается термопластов с вязкостью расплавов выше  $10^5$  Па • с, то сварка их плавлением возможна только при условии снижения вязкости расплава в процессе сварки. Следовательно, для обеспечения возможности сварки плавлением термопластов, принадлежащих к этой группе, необходимо в каждом конкретном случае изыскивать оптимальные способы и технологические приемы сварки.

К этой группе относятся поливинилхлорид, поливинилиден-хлорид, пентапласт, полиэтилентерефталат, поликарбонат, плавкие фторопласты и другие термопласты.

К третьей группе относятся термопласты, энергия активации вязкого течения которых превышает энергию химической связи, а также термопласты с вязкостью расплава  $10^{11} - 10^{12}$  Па • с. Эти термопласты не могут быть переведены в вязкотекучее состояние, т.е. не могут свариваться плавлением. К ним относятся, например, фторопласт-4, ацетат целлюлозы, поливинилацетат. Образование соединений таких термопластов возможно только по механизму диффузионной сварки с нагревом поверхностей до температур высокоэластического состояния, с длительной выдержкой под давлением, равным пределу вынужденной эластичности свариваемых материалов, при максимально возможной температуре.

Ускорение диффузионной сварки может быть достигнуто применением растворителей, в которых данный термопласт способен набухать и растворяться. Растворители увеличивают подвижность макромолекул, поэтому температура сварки может быть снижена.

## **4.2. СВАРКА ПРЯМЫМ НАГРЕВОМ ПРИ МОНТАЖЕ ТРУБОПРОВОДОВ**

### **4.2.1. Сварка труб встык**

Пластмассовые трубопроводы получили в последние годы широкое применение как у нас в стране, так и за рубежом. Такое широкое использование пластмассовых трубопроводов обусловлено тем, что они в 4-5 раз легче стальных, проявляют высокую стойкость к агрессивным средам и имеют меньшее гидравлическое сопротивление. Затраты труда на монтаж и эксплуатацию трубопроводов из пластмасс в среднем в 2 раза меньше, чем трубопроводов из углеродистых качественных сталей, и в 3-4 раза, - чем трубопроводов из нержавеющей сталей.

Наибольшее применение имеют трубы из полиэтилена низкой и высокой плотности, полипропилена и поливинилхлорида диаметром до 315 мм. В ближайшем будущем намечено применение труб из полиэтилена высокой плотности диаметром до 630 мм. Основной тип соединения таких труб при строительстве трубопроводов - сварка встык.

**Таблица 4.1. Ориентировочные значения параметров режима сварки некоторых термопластов нагретым инструментом (прямым нагревом)**

Термопласт	Температура инструмента, К	Время нагрева, с	Время выдержки после сварки, с	Давление осадки, МПа
Полиэтилен высокой плотности*	493-523	25-30	30-40	0,1-0,2
Полиэтилен низкой плотности	473-493	20-25	30-40	0,1-0,15
Полипропилен	513-533	30-50	30	0,2
Полиизобутилен	523	30	30	0,15-0,2
Полиэтилентерефталат (лавсан)	593	20-25	30	0,15-0,2
Поливинил хлорид (винипласт)	513-523	40-50	30	0,4-0,5
Полиамид 6	673-713	15	30	0,8-1,0.
Полистирол	433-453	25-30	30-60	2,0-2,5

\*Светостабилизирован техническим углеродом.

Высокое качество сварных соединений пластмассовых трубопроводов обеспечивается при проведении комплекса мероприятий по контролю на различных стадиях производства. Этот комплекс включает три этапа: предупредительный контроль (до начала сварки), активный (в процессе сварки) и приемочный (после завершения сварки) [5, 10, 16, 19].

**Предупредительный контроль** включает в себя контроль качества свариваемых материалов, выбор сварочного оборудования с учетом показателей его эффективности, проверку квалификации сварщиков и контроль технологической подготовки производства.

При поступлении на склад необходимо сортировать трубы так, чтобы на сборку поступали трубы, близкие по геометрическим параметрам. На их поверхности и по торцам не должно быть трещин, пузырей, раковин и посторонних включений, видимых простым глазом, следов холодных спаев и разложения материала.

Условия хранения труб должны исключить попадание на них прямых солнечных лучей, так как при этом возможно не только снижение прочности материала труб, но и значительное ухудшение их свариваемости.

Перед сваркой трубы подвергаются механическим и термомеханическим испытаниям.

Гарантийный срок хранения труб - два года со дня изготовления. По истечении указанного срока трубы перед использованием должны подвергаться повторной проверке.

Большое значение имеет подготовка труб к сборке и сварке. Внутреннюю и наружную поверхности концов свариваемых труб на расстоянии не менее 30 мм от торца очищают от пыли, масла, технического углерода и других загрязнений, отрицательно влияющих на свариваемость и вызывающих растрескивание сварного шва в процессе эксплуатации. Соединяемые поверхности труб, зажатых в сварочной установке, после очистки подвергают торцовке. Стружку, образовавшуюся при торцовке, удаляют чистой тряпкой или другим способом, исключающим загрязнение торцов заготовок. В некоторых случаях применяется обезжиривание свариваемых концов растворителем (ацетоном, спиртом). Деформированные, порванные или имеющие забоины концы труб обрезаются. Режущий инструмент перед обработкой кромок должен быть обезжирен. Запрещается применять при этом охлаждающие эмульсии и смазки.

Следующими важными операциями являются сборка и центровка труб перед сваркой. Эти операции должны осуществляться на специальном устройстве или на установке, на которой будет вестись сварка. Концы стыкуемых труб должны крепиться в кольцевых зажимах (центраторях)

сварочной установки таким образом, чтобы вылет труб составлял 60-70 мм. После сборки между обработанными торцами труб, приведенных в соприкосновение, не должно быть зазоров, превышающих 0,5 мм при диаметрах труб до 110 мм и 0,7 мм - при диаметрах более 110 мм. Смещение соединяемых концов труб, подготовленных к сварке, по наружному периметру не должно превышать 10% толщины стенки труб.

**Контроль в процессе сварки** проводится с целью строгого соблюдения основных параметров режима и цикла сварки. Ориентировочные значения основных параметров стыковой сварки труб прямым нагревом приведены в табл. 4.2 [1, 2, 4, 5, 10, 16, 19].

Основным параметром процесса является температура нагрева сварочного инструмента, которую необходимо поддерживать постоянной с точностью до  $\pm 10$  К. Время нагрева - ©плавления торцов свариваемых труб сварочным инструментом - зависит от температуры окружающей среды, толщины стенки труб, подготовки торцов труб под сварку. Сокращение продолжительности нагрева при постоянной температуре инструмента приводит к недостаточному размягчению материала и, как следствие, к ухудшению качества сварного шва. Точное соблюдение времени нагрева не всегда гарантирует стабильную глубину прогрева, она может изменяться в зависимости от условий окружающей среды.

При нагреве сварочный инструмент должен касаться кромок труб по всему периметру. При правильном ведении процесса по всему периметру трубы должен образовываться равномерный грат расплавленного материала в виде валика высотой не более 2-3 мм.

После оплавления концов труб необходимо быстро удалить нагреватель и произвести осадку труб. Время между удалением нагревателя и осадкой труб не должно превышать 1-2 с, иначе происходит снижение прочности сварного шва в результате быстрого охлаждения свариваемых поверхностей. При увеличении давления происходит чрезмерное выдавливание оплавленного материала наружу и внутрь трубы, что ухудшает качество сварного соединения. Продолжительность охлаждения под давлением определяется с учетом толщины стенки свариваемых труб, температуры окружающего воздуха и типа пластмассы. Сваренный стык необходимо выдерживать под давлением до полного затвердевания материала, так как перемещение концов труб сразу же после сварки может привести к созданию в стыке дополнительных внутренних напряжений.

**Таблица 4.2. Ориентировочные значения параметров режима стыковой сварки труб нагретым инструментом**

Параметры	Материал труб			
	ПЭНП	ПЭВП	ПП	ПВХ
Температура сварки (инструмента), К	493 $\pm$ 10	473 $\pm$ 10	473 $\pm$ 10	482 $\pm$ 5
Давление сжатия при нагреве торцов труб, МПа	0,02-0,05	0,02-0,05	0,04-0,08	0,05-0,08
Время нагрева (с) при толщине стенки трубы (мм)**:				
4	35	50	60	35
6	50	70	80	45
8	70	90	90	50
10	85	110	100	60
12	100	130	150	70
14	120	160	180	-
16	160	180	230	-
Давление осадки, МПа	0,1-0,2	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3

Время (мин) охлаждения стыка под давлением при толщине стенки трубы (мм):				
4-6	3-4	3-5	3-5	2-3
7-12	5-8	6-9	6-10	3-5
14-16	10-15	10-15	12-16	-

\* НП и ПЭВП - полиэтилен низкой и высокой плотности соответственно; ПП - полипропилен; ПВХ - поливинилхлорид.

\*\* при температуре окружающего воздуха 293 К.

Оставшийся после сварки на сварочном инструменте расплавленный материал необходимо удалить при помощи скребков, металлических щеток и ветоши.

Правильность соблюдения технологического процесса сварки может быть установлена по внешнему виду и форме сварного соединения. Наиболее высокое качество сварного соединения соответствует образованию двойного плавно скругленного валика грата равномерной по всему периметру шва толщины.