

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ (Обзор)

В. П. ТАРНОГРОДСКИЙ, канд. техн. наук, Е. Ю. ПОНОМАРЕВА, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены способы повышения прочности сварных соединений труб из термопластов, основанные на удалении оксидной пленки с помощью срезания в процессе сварки пластмасс ИК-излучением, применения профилированного нагревательного инструмента и механического перемешивания.

*Ключевые слова:* сварка, термопласты, ИК-излучатель, профилированный нагревательный инструмент, механическое перемешивание

Теоретической основой научных разработок технологии и оборудования для сварки пластмасс являются исследования механизма образования сварных соединений. Известно [1], что при сварке в процессе взаимодействия торцов свариваемого полимера с нагревательным инструментом и окружающей атмосферой (в результате термоокислительной деструкции) образуется поверхностный слой, который по своим свойствам резко отличается от первоначального материала. Этот слой в виде пленки препятствует соединению расплавленных поверхностей и может привести к полному или частичному несплавлению, что в значительной степени влияет на прочность. Для получения качественного сварного соединения необходимо удалять образующиеся на поверхности оплавленных кромок ингредиенты, интенсифицируя реологические процессы в зоне контакта. Известно [2], что с увеличением толщины свариваемых торцов возрастает время нагрева. Так, при подготовке торцов к сварке с помощью ИК-излучения для труб из ПНД диаметром 110 мм и толщиной стенки  $\delta = 10$  мм время нагрева не превышает 19 с, а для трубы из ПНД диаметром 800 мм и  $\delta = 26$  мм проплавление на глубину 2 мм длится 45 с. Естественно, что во втором случае оксидная пленка, препятствующая сварке, значительно прочнее в связи с более длительным периодом окисления, а следовательно, прочность сварного соединения ниже, чем в первом случае. Таким образом, сварка толстостенных элементов указанным способом затруднена. Существует ряд способов разрушения оксидной пленки в процессе сварки. Например, колебанием одной трубы относительно оси на  $2...3^\circ$  и возвратно-поступательным смещением относительно оси на  $2...3$  мм в процессе осадки с частотой  $3...5$  Гц [1]. Недостатком указанных способов является то, что требуются специальные механизмы, создающие колебательные или возвратно-поступательные движения.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разработан и опробован способ удаления оксидной пленки в процессе сварки пластмасс ИК-излучением. Особенность его применения

заключается в следующем. ИК-излучатель 1 (рис. 1, а, б) вводят в зазор между свариваемыми торцами 2 и проплавливают их на требуемую глубину. Затем свариваемые торцы прижимают к инфракрасному излучателю и без снятия давления осадки нагревательный инструмент плавно удаляют (рис. 1, в). Температура нагревательного инструмента в момент прижатия должна быть ниже температуры возгорания. При этой температуре материал не возгорает, а оксидная пленка соединяется с поверхностью нагревательного инструмента путем спекания, затем при его удалении срезается со свариваемых торцов (рис. 1, г) и производится их осадка.

Этот способ был опробован при сварке элементов трубы из ПНД диаметром 800 мм и толщиной стенки  $\delta = 26$  мм. Размеры образцов  $65 \times 26 \times 80$  мм. Опытный образец ИК-излучателя был изготовлен в ИЭС им. Е. О. Патона. Он представляет собой нихромовую пластину толщи-

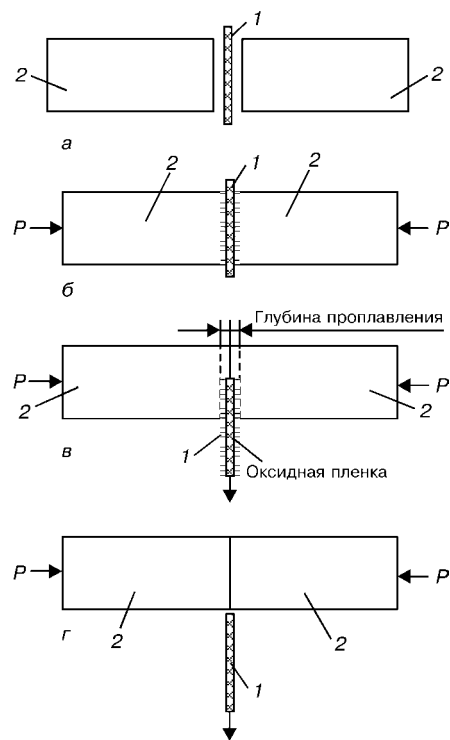


Рис. 1. Схема последовательности процесса сварки термопластов с помощью ИК-излучателя (обозначения позиций см. в тексте)



ной 1 мм и шириной 40 мм. Температура излучающей поверхности 850 °С. ИК-излучатель вводится между свариваемыми кромками в середину зазора, равного 20 мм. После того, как поверхностный слой свариваемых торцов проплавится на глубину 2 мм (разогрев кромок длится 45 с), нагревательный инструмент отключается от источника питания и остывает 2 с до температуры ниже температуры возгорания (для ПНД эта температура принималась равной 500 °С). Затем торцы труб прижимаются к нагревателю с давлением осадки 0,02 МПа. При температуре, равной 500 °С, оксидная пленка соединяется с нагревательным инструментом в результате спекания. Через 2 с без снятия давления осадки 0,02 МПа нагревательный инструмент плавно удаляется со скоростью 2 см/с, после чего давление осадки доводится до 0,2 МПа. В процессе извлечения нагревательный инструмент срезает оксидную пленку, соединяемую с ним. При повторном включении нагревательного инструмента пленка и прилипший материал сгорают — происходит самоочистка, т. е. не требуется антиадгезионного слоя и специальной очистки. Полученное сварное соединение было испытано на растяжение. Как показали исследования, среднее значение прочности сварного шва не ниже среднего значения прочности основного материала. Это объясняется тем, что соединялись неокисленные поверхности, благодаря чему сварное соединение не ослабила оксидная пленка, как это происходит при известных способах сварки с помощью ИК-излучателя. Равнопрочность сварного соединения позволяет полностью использовать несущую способность материала.

Другим важным фактором, определяющим прочность сварного соединения, является перемешивание расплава свариваемых поверхностей в процессе сварки. Оно способствует выравниванию физических параметров затвердевающего материала, дроблению и частичному удалению вредных включений из зоны сварки, что приводит к повышению прочности сварного шва.

В 1960-х годах К. И. Зайцевым была выдвинута «реологическая» концепция механизма образования сварных соединений пластмасс. В соответствии с ней в механизме образования сварных соединений существенную роль играют реологические процессы в зоне контакта соединяемых деталей. С целью повышения прочности сварного шва за счет более полного перемешивания основного материала поверхность нагревательного инструмента делают рельефной. Она может иметь рельефные выступы и впадины, напоминающие узор переплетения нитей в ткани [3]. По окончании нагрева свариваемых торцов и выведения нагревательного инструмента из зазора между этими торцами, т. е. во время осадки, свариваемые детали предложено перемещать друг относительно друга и параллельно плоскости, проходящей через их торцы. Благодаря таким колебаниям нагретый до пластичного состояния материал энергично перемешивают и прочность материала сварного шва увеличивается. Недостатком такого решения является сложность создания колебаний. Кроме того, для удаления на-

гревательного инструмента необходимо развести свариваемые поверхности, вследствие чего происходит их окисление. Продукты окисления частично остаются в шве и снижают прочность соединения.

Эффективность перемешивания может быть усилена путем изменения формы торцов до сварки (механической обработкой), либо при их нагреве (плавлении) фигурным нагревательным инструментом. Примером может служить инструмент для контактной сварки [4], рабочие поверхности которого профилированы таким образом, что имеют в сечении пилообразную форму, причем высота зубьев и расстояния между ними могут изменяться в пределах 0,5... 3 мм. Недостатками такого нагревательного инструмента являются сложная технология его изготовления, снижение прочности сварного соединения в результате попадания в шов продуктов окисления, образовавшихся в процессе технологической паузы.

Известен способ сварки полимерных материалов, который предотвращает попадание продуктов окисления в шов [5]. Нагретый инструмент — металлическую пластину (лезвие) — помещают между свариваемыми деталями. После того, как теплота от пластины размягчит прижатые поверхности, пластину (лезвие) быстро удаляют без разведения свариваемых кромок. Предложено устройство для сварки встык труб из термопласта этим способом [6], но так как сварка осуществляется только за счет контакта активированных нагретом поверхностей, прочность такого сварного соединения недостаточна.

Повышению прочности сварных соединений способствует применение профилированного нагревательного инструмента, у которого каждый гребень выступа и края каждой впадины образуют замкнутый контур (рис. 2). Нагревательный инструмент 1 выполнен из теплопроводного материала (типа алюминия), рабочая поверхность которого покрыта антиадгезионным слоем 2. Количество контуров зависит от толщины свариваемых деталей, а расстояние между гребнями соседних контуров может изменяться в пределах 0,5... 3 мм. Разогреваться нагревательный инструмент может любым источником энергии.

Устройство работает следующим образом: к разогретому до требуемой температуры профилированному нагревательному инструменту прижимают торцы свариваемых деталей, разогревают их и формируют контуры выступов и впадин. Одновременно материал прогревается на определенную глубину, выводится нагревательный инструмент и свариваемые детали соединяются под давлением. Выступы входят во впадины одновременно на всем протяжении и выдавливают расплав, который перемещается от середины сечения к краям. В замкнутом контуре при одновременном сжатии расплава боковое перемещение вдоль гребня отсутствует и расплав перемещается перпендикулярно к оси гребня, двигаясь под давлением по волнообразному зазору, образовавшемуся между свариваемыми деталями. Резкое изменение направления движения расплава характеризуется турбулентным течением, которое способствует перемешиванию расплава свариваемых

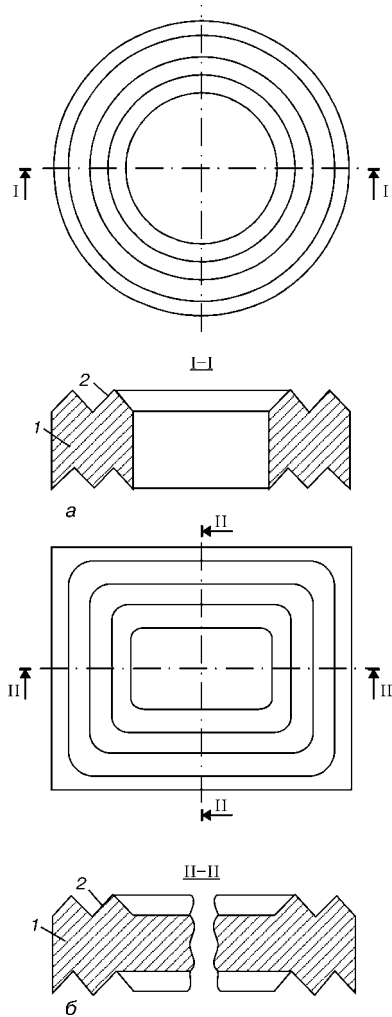


Рис. 2. Схема профилированного нагревательного инструмента для цилиндрических деталей (а) и изделия прямоугольного сечения (б): 1 – нагревательный инструмент; 2 – адгезионный слой

мых деталей, а удлинение пути движения расплава по сравнению со сваркой плоским нагревательным инструментом увеличивает вероятность образования химических связей между материалом свариваемых деталей. Все это способствует повышению прочности сварного соединения. Образцы, сваренные с помощью профилированного нагревательного инструмента, при испытании на растяжение в большинстве случаев разрушались по основному материалу. Для трубы из ПВХ  $\sigma_p = 43,4$  МПа.

С целью повышения прочности сварного соединения, особенно трудносвариваемых пластмасс, в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработано устройство для сварки термопласта, обеспечивающее интенсивное механическое перемешивание расплава в процессе сварки [7]. Нагреватель указанного устройства представляет собой две тонкие перемещающиеся пластины, на торцах которых выполнена гребенка с винтообразными зубьями. Они создают механическое перемешивание материала в процессе извлечения нагревательного инструмента при сжатых свариваемых поверхностях. Нагревательный инструмент выполнен из материала с высокоомным сопротивлением (типа нихрома) и покрыт антиадгезионным слоем. Устрой-

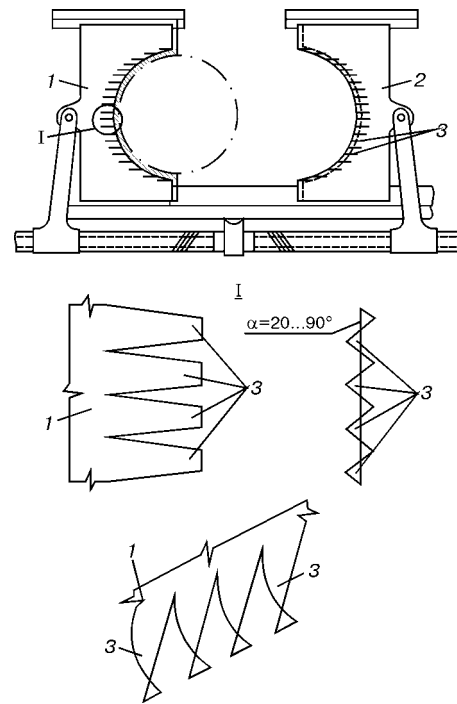


Рис. 3. Схема устройства для сварки встык труб из термопласта (обозначения см. в тексте)

тво для сварки встык труб из термопластов показано на рис. 3. Торцы пластины 1 и 2 нагревательного инструмента оканчиваются гребенкой, зубья 3 которой повернуты относительно своей продольной оси таким образом, что образуют винтовую поверхность. Верхняя кромка каждого зуба повернута относительно плоскости нагревательного инструмента на угол  $\alpha = 20...90^\circ$  (угол между проекцией торца зуба и проекцией плоскости нагревательного инструмента на плоскость, перпендикулярную к нагревательному инструменту (рис. 3, узел I). Угол  $\alpha$  образуется в результате закручивания торца зуба вокруг его продольной оси, при этом его боковые грани в результате пластического деформирования приобретают форму винтовой линии. В процессе вытягивания нагревательного инструмента зубья входят в расплавленный материал и перемешивают его по принципу эффекта плуга (рис. 4). При перемещении нагревательного инструмента под винтовой поверхностью зубьев 3 создается сжатая зона расплавленного материала, а над зубьями – разряженная. Таким образом, расплав из сжатой зоны перемещается в разряженную, т. е. расплав одного свариваемого торца перемещается в зону другого, и наоборот, что усиливает эффект перемешивания и повышает прочность сварного соединения. Эк-

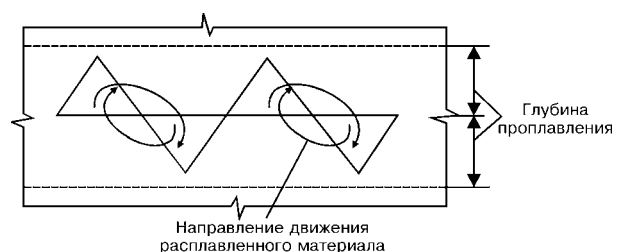


Рис. 4. Схема механического перемешивания



спериментально установлено, что эффективное перемешивание расплава свариваемого полимера зубьями гребенки начинает наблюдаться при угле  $\alpha = 20^\circ$ . С увеличением угла  $\alpha$  возрастают габариты зуба из плоскости нагревательного инструмента, вместе с этим увеличивается и проекция площади зуба на плоскость, перпендикулярную к плоскости нагревательного инструмента, т. е. возрастает площадь зоны перемешивания. Эта площадь, которая представляет собой (для каждого зуба) площадь двух равнобедренных треугольников (см. рис. 3), достигает своего максимального значения при  $\alpha = 90^\circ$ . С увеличением угла  $\alpha$  от  $0$  до  $90^\circ$  возрастает усилие извлечения нагревательного инструмента. Для получения сварного соединения, равнопрочного основному материалу, для разных полимеров требуется разный объем перемешивания. Изменив угол  $\alpha$ , можно добиться оптимальных технологических и прочностных параметров.

С помощью описанного нагревательного инструмента были сварены элементы трубы из ПВХ диаметром 110 мм. Использовали нагревательный инструмент с углом поворота верхнего торца зубьев относительно плоскости нагревательного инструмента  $\alpha = 45$  и  $60^\circ$ . Испытания на растяжение сварных соединений и основного материала проводили на машине ZD-10/90. Скорость деформирования была принята 20 мм/мин. При одинаковых параметрах сварки (давление 0,2 МПа, температура нагревательного инструмента  $T_n = 250^\circ\text{C}$ ) были получены соответственно средние значения предела прочности  $\sigma_p = 45,2$  и  $41,7$  МПа, т. е. нагревательный инструмент с углом поворота зубьев  $\alpha = 45^\circ$  дает более прочное сварное соединение. Большинство образцов разрушалось по основному материалу. Сварка (при тех же параметрах) образцов из ПВХ аналогичным нагревательным инструментом, но без зубьев для перемешивания дает среднее

значение предела прочности сварного соединения, не превышающее  $\sigma_p = 34,8$  МПа при  $\sigma_p = 45,4$  МПа для основного материала.

## Выводы

1. Имеется три способа повышения прочности сварных соединений за счет разрушения поверхностного слоя на торце трубы: путем разогрева торцов с помощью ИК-излучения; применения профилированного нагревательного инструмента; путем интенсивного механического перемешивания расплава в процессе сварки.

2. Удаление со свариваемых торцов ингредиентов, как и интенсифицирование реологических процессов в зоне соединения свариваемых поверхностей, повышает свариваемость термопластов.

3. Механическое перемешивание расплава позволяет повысить прочность сварного соединения до прочности основного материала, что особенно актуально при сварке изделий из трудносвариваемых термопластов, например, ПВХ.

1. Зайцев К. И. Контактная сварка встык труб из полиэтилена высокой плотности // Автомат. сварка. — 1976. — № 12. — С. 32–33.
2. Зайцев К. И., Мацюк Л. Н. Сварка пластмасс. — М.: Машиностроение, 1978. — С. 188–197.
3. Пат. 135810 ГДР, МКИ<sup>2</sup> В 29 С 27/06. Verfahren zum Stumpfschweißen thermoplastischer Halbzeuge und Formteile / W. Tobias, H.-E. Steinicke. — Оpubл. 30.05.79.
4. Пат. 106590 ГДР, МКИ<sup>2</sup> В 29 С 27/02. Heiselement Schweißwerkzeug / H. Schwarz, W. Tobias. — Оpubл. 26.06.74.
5. Николаев К. И., Ольшанский Н. А. Специальные методы сварки. — М.: Машиностроение, 1975. — С. 194–198.
6. А. с. 448139 СССР, МКИ<sup>2</sup> В 29 С 27/06. Устройство для стыковой сварки термопластичных труб / Э. А. Вендэ // Открытия. Изобрет. — 1974. — № 40. — С. 38.
7. А. с. 1052402 СССР, МКИ<sup>2</sup> В 29 С 27/06. Устройство для стыковой сварки термопластичных материалов / В. П. Тарногородский, Г. Н. Кораб, Е. Ю. Колоскова // Открытия. Изобрет. — 1983. — № 41. — С. 47.

Three methods are suggested for increase in strength of welded joints in thermoplastic material pipes such as removing an oxide film by shearing plastics during welding using IR-radiation, profiled hot tool welding and mechanical mixing.

Поступила в редакцию 03.09.2002