

Наиболее важным методом соединения полиэтиленовых (ПЭ) труб является сварка нагретым инструментом (НИ) встык. Метод НИ нашел широкое практическое применение при сварке труб, профилей и листов из таких материалов, как гомополимеры и сополимеры пропилена, поливинилиденфторида, полибутена, поливинилхлорида и других термопластов, способных выдержать нагревание в условиях сварки без критических изменений структуры и свойств. Логичнее, этот метод следовало бы назвать «сплавлением», поскольку его базовая технология не предусматривает использование какого-либо присадочного материала. Между тем, именно использование присадки является характерным признаком разных технологий сварки, например экструзионной и газовой. Тем не менее, поскольку термин «сварка встык» доминирует в Российской технической литературе, будем пока придерживаться его. На практике особенно важна сварка НИ встык труб из композиций на основе сополимеров этилена с высшими олефинами. В глобальной практике этот метод сварки наиболее часто применяется для соединения монолитных ПЭ труб диаметром от 63 до 2400 мм и при изготовлении сварных фитингов диаметром до 2400мм, а также при сварке витых труб диаметром до 2600мм. Такая широкая сфера практического применения обусловлена рядом технических и экономических преимуществ перед конкурирующими методами сварки, такими как сварка с закладными электронагревателями (ЗН) [1] и экструзионная сварка (ЭС). В Российской практике строительства полимерных воднохозяйственных, газопроводных, коммунальных и промышленных трубопроводных систем преобладают ПЭ трубы и, соответственно, сварка НИ встык приобрела доминирующую роль, что получило отражение в соответствующих нормативных документах. К последним относятся СНиП 3.05.04-85 (Наружные водопроводы, п. 3.85), СП 62.13330.2011 (Газопроводы п.4.13), ВСН 003-88 (Нефтепроводы п.7.5.3.1.), СНиПЗ.05.-84 (Технологические трубопроводы 4.23), СН 478-80, СН 550-82 ОСТ 6-19-505-79, СТО 2-2.1-411-2010 и другие документы. После освоения в 80-е годы XX века производства отечественных специальных трубных базовых марок сополимеров полиэтиленов низкого давления (ПНД) и композиций на их основе, в СССР была создана база для многократного роста применения ПЭ труб. Композиции на основе ПНД, по показателям минимальной длительной прочности (MRS), соответствовали градации ПЭ 50 и, затем, ПЭ 63. Дальнейший макромолекулярный [2] и композиционный дизайн привел к освоению производства унимодальных и бимодальных ПЭ 80, а также бимодальных ПЭ 100. В настоящее время ПЭ 100 преобладает как на глобальном, так и на Российском рынках трубных марок ПЭ. Актуальной инновацией трубной отрасли является освоение производства труб больших и супер больших диаметров [3,4]. При производстве таких труб возникает проблема гравитационного стекания расплава. Для устранения стекания расплава в производстве супер больших

труб применяют слабостекающие марки ПЭ 100. К числу последних достижений материаловедов относятся композиции ПЭ (PE RC) с особо высокой стойкостью к росту трещин и материалы с повышенной теплостойкостью (PE-RT). Упруго-вязкие свойства расплавов многочисленных градаций и марок ПЭ различных производителей имеют существенные отличия. Учитывая этот факт, специалисты по стандартизации сварки, многие производители труб и фитингов, а также сварочных машин, предлагали оригинальные технологии сварки. Однако несогласованные между собой технологии создают недопустимую неопределенность в выборе оптимального варианта параметров сварки технологами. Пытаясь уменьшить неопределенность международная стандартизирующая организация (ISO) составила стандарт ISO 21307 [5], содержащий 3 процедуры сварки водопроводов и газопроводов с варьируемыми основными параметрами. Российский ГОСТ Р ИСО 55276-2012 [6] создан на основе аутентичного перевода ISO 21307 с добавлением четвертой процедуры, составленной авторами настоящей статьи. Нами также выполнен аутентичный перевод ISO 12176-1 [7], который лег в основу ГОСТ Р ИСО 12176-1-2011 [8], регламентирующего требования к сварочным машинам. Разделяя мнение ведущих специалистов, отраженное, например, на сайте [9] в разделе 4, авторы считают нужным отметить следующее. 1. ГОСТ Р ИСО 55276 стал успешной попыткой устранить разночтения в технологии сварки. Технологи могут успешно использовать его для устранения необоснованных технических решений, которые появились в нормативно технической документации в последние десятилетия [10]. 2. Многовариантность решений, предлагаемых ГОСТ Р ИСО 55276-2012 создает квалифицированным специалистам просторное поле для маневра при составлении спецификаций на процесс сварки. Этой возможностью, однако, не могут воспользоваться неквалифицированные сварщики. 3. ГОСТ Р ИСО 55276-2012, как и его прототип ISO 21307, может применяться для сварки деталей с толщиной стенки заготовок менее 70 мм, в то время как ведущие производители ПЭ труб выпускают изделия толщиной более 100 мм и их нужно варить. 4. В ISO 21307 и ГОСТ Р ИСО 55276-2012 отсутствуют ограничения к показателю текучести расплава материала труб (ПТР190/5). Между тем авторитетные немецкие нормы DVS 2207-1 устанавливают границу применимости обычной технологии сварки: $\text{ПТР190/5} > 0.2 \text{ г/10мин}$. Отметим, что большая часть Российских полиэтиленов градации ПЭ 100 имеют показатели текучести расплава ПТР190/5 ниже 0.2 г/10мин. То есть, применение есть стандартных технологий для сварки высоковязких ПЭ 100 не вполне корректно. Неотъемлемой частью технологии сварки встык является система контроля качества. Ее важнейшая стадия: визуально - измерительный контроль (ВИК) базируется на статистических данных о форме и размерах валиков грата. Эти данные накоплены на устаревших марках ПЭ и не в полной мере согласуются с визуальными параметрами валиков сварных соединений их новейших марок ПЭ

100. Границы применимости авторитетных указаний DVS 2202-1 [11] и соответствующих им ГОСТ Р 54792-2011 [12] по ВИК не превышают толщины стенки 20мм, в то время как производство толстостенных труб давно освоено. Нестыковки действующих международных и новейших Российских технологических норм на сварку с параметрами объектов сварки - труб и фитингов супербольших размеров, а также различных заготовок изготовленных из новейших марок являются серьезной проблемой в деле обеспечения качества сварки НИ. Решение этой проблемы, в международной на практике, достигают в процессе весьма затратных технологических экспериментов, выполняемых на заводах изготовителях труб, а также авторитетными экспертами в области сварки. Вместе с тем технологичность ПЭ при сварке может прогнозироваться. Действительно, сварка НИ по существу является реологическим процессом. Рассмотрим циклограмму сварки по ГОСТ Р ИСО 55276. На рисунке 1 изображена зависимость нормативного давления Y в плоскости от времени для процедуры сварки при единственном низком давлении. Нагретый инструмент помещается между свариваемыми заготовками. После создания давления выравнивания (0.15-0.19 МПа в плоскости сварки), за время t_1 из зоны сварки выдавливается первичный валик. Кинетика образования первичного валика не играет важной роли, поскольку t_1 не нормируется, а прогрев, в любом случае длится до завершения образования первичного валика по всей окружности трубы с двух сторон НИ. X время t_5 время охлаждения в машине под давлением Y давление t_6 время охлаждения вне машины t_1 время выравнивания p_1 давление выравнивания t_2 время прогрева p_2 давление прогрева t_3 технологическая пауза p_3 давление сварки t_4 время подъема давления Рис. 1 - Циклограмма процедуры при единственном низком давлении сварки На стадии прогрева, напротив, длительность стадии и давление в плоскости сварки в значительной степени влияет на качество соединения. Недостаточное давление чревато потерей контакта между НИ и торцами заготовки и, следовательно, к несплавлениям, а избыточное давление приводит к выдавливанию расплава материала из зоны сварки, искажениям формы валика и увеличению его размеров, что является основанием для браковки стыка. Недостаточные и избыточные величины давления на стадии собственно сварки также негативно влияют на внешний вид и качество сварки. Принято считать [13,14], что недостаточное давление не обеспечивает удаление желательного объема расплава материала из зоны сварки и несплавлениям. Избыточное давление приводит к уменьшению объема расплава в зоне сварки, вплоть до соединения холодных поверхностей свариваемых заготовок и, как следствие, к несплавлениям. Дефектоскописты, выполняя процедуры ВИК, судят о нарушениях режима сварки по параметрам валиков грата. При этом, в качестве эталонов, используют стандартные картинки из ГОСТ Р 54792-2011 [12]. Так, например высокий и узкий грат, как правило, не касающийся краями трубы признается браком, полученным в

результате ошибочных сварочных параметров, особенно, из-за избыточного усилия сжатия свариваемых заготовок. Между тем, грат подобной формы часто наблюдается при сварке тонкостенных труб экструдированных из новейших слабо стекающих марок ПЭ100. При этом механические испытания демонстрируют хорошую прочность сварных соединений. Прогнозировать подобную форму грата можно, выявив высокие вязкость и упругость расплавов ПЭ, в процессе стандартных и специальных реологических экспериментов [15, 16,17]. Другой браковочный дефект представляет собой нарушение пропорциональности между размерами грата и толщиной стенки трубы: грат слишком широкий или слишком узкий, обусловленный, например, неправильным временем нагрева, неправильной температурой нагретого инструмента, неправильным усилием сжатия. Дефект: грат слишком широкий или слишком узкий, кроме нарушений технологии сварки, также может быть обусловлен вариациями упруго-вязких характеристик расплава ПЭ. Причем согласно данным авторов пропорциональность между размерами грата b и толщиной стенки трубы s сохраняется только в области сравнительно малых толщин. При толщине стенки трубы или листа свыше 20мм зависимость $b = f(s)$ становится нелинейной. Несимметричность валиков грата теряет смысл в качестве браковочного критерия, если свариваемые детали изготовлены из разных марок или даже партий ПЭ, расплавы которых имеют различные реологические свойства. Другая процедура сварки, - при единственном высоком давлении предусматривает увеличение давления p_1 и p_3 примерно в 3 раза по сравнению с процедурой сварки при единственном низком давлении. Третья процедура, - при двойном низком давлении, предусматривает сброс давления после соединения торцов труб (рис.2).

Х Время t_6 Время охлаждения в машине при пониженном давлении
Y Давление t_7 Время охлаждения в машине без давления или вне машины
 t_1 Время выравнивания p_1 Давление выравнивания
 t_2 Время прогрева p_2 Давление прогрева
 t_3 Технологическая пауза
 p_3 Давление при сварке
 t_4 Время подъема давления
 p_4 Пониженное давление при охлаждении в машине
 t_5 Время сварки

Рис. 2 - Циклограмма процедуры стыковой сварки при двойном низком давлении

Размеры и форма грата, естественно оказываются чувствительными к изменениям напряжения сдвига, обусловленными особенностями процедур. Качество сварки НИ определяется теплофизическими, химическими, а также реологическими процессами, протекающими в области сварного соединения. Кинетические закономерности этих процессов и их конечные результаты, естественно, зависят от основных параметров сварки, с одной стороны и свойств полиэтилена, с другой. В производственной практике, для оценки реологических свойств полиэтиленов обычно используют показатель текучести расплава (ПТР) величина, которого характеризует среднюю молекулярную массу (ММ) полимера. Более точные оценки дают прецизионные измерения вязкости расплавов на современных вискозиметрах с целью

получения кривых течения в широком диапазоне скоростей сдвига. ПТР и вязкость исходных полимеров являются реологическими оценками первого приближения. Экструзионные марки полиэтиленов отличаются высокой средней молекулярной массой и очень широким распределением. В процессе термоокислительной деструкции в полиэтиленах низкого давления образуются разветвленные и сшитые структуры. В результате макромолекулярных реакций меняется структура ПНД и, соответственно, динамика реологических процессов, происходящих при сварке. Для получения более полного представления о макромолекулярной структуре можно использовать традиционные реологические и специально разработанные высокоточные релаксационные (РДР - релаксация давления расплава) методы контроля [15-18]. Технологические эксперименты, выполненные к настоящему времени авторами, при варьировании толщин заготовок от 3 до 110мм и диаметров труб от 63 до 1600мм, в разных погодных-климатических условиях (летний и зимний цикл), на разном оборудовании (машины GFO, WIDOS, KWH, BADA, Mac Elroy и УСПТЭП), для разных градаций и марок ПЭ (Sabir P6006, ПЭ 100 6949С, ПЭ2 НТ11-9), выявили, в частности, следующие закономерности. 1. При сварке тонкостенных заготовок из ПНД с высокой вязкостью и упругостью расплавов получается грат вытянутой формы. Оптимизировать форму грата можно, в частности, применив процедуру 2 (при высоком давлении). 2. Размеры валиков для заготовок толщиной более 10мм растут при переходе от процедуры 3 к процедуре 1 и, затем, к процедуре 2 для всех марок ПЭ. Причем вариации форм валиков не влияют на упруго-деформационные показатели соединений. 3. Влияние погодных-климатических факторов на форму валиков несущественно. Но попытки компенсировать влияние низких температур воздуха увеличением температуры и длительности прогрева (t_2) вызывают увеличение размеров валиков. 4. Размеры валиков тесно связаны с вязкостью и упругостью расплавов ПЭ. Поэтому реологические измерения позволяют обосновать корректировки норм визуально-измерительного контроля. Изучение особенностей макромолекулярной структуры современных марок ПЭ выше приведенными методами позволяют обосновать для сварки труб адекватную технологию, выбрав одну из стандартизированных процедур и оптимизировав основные параметры сварки. Следует добавить, что затраты при пробной сварке и испытании пробных сварных соединений толстостенных труб больших и супер больших диаметров оказываются весьма значительны (могут превышать 1 миллион руб. за каждый стык). Поэтому с целью обоснования выбора процедур и для ускорения поиска оптимальных режимов сварки целесообразно получение априорной реологической информации