

УДК 621.644.073

В.И. Кимельблат, д.т.н., профессор кафедры «Химия и технология переработки эластомеров», Казанский национальный исследовательский технологический университет (Казань, Россия), e-mail: vkimelblat@yandex.ru; **И.В. Волков**, к.т.н., доцент кафедры «Химия и технология переработки эластомеров», Казанский национальный исследовательский технологический университет (Казань, Россия), e-mail: ivvolkov@mail.ru; **А.В. Жуков**, генеральный директор, ООО «АДР-Технология» (Москва, Россия), e-mail: az@adr-t.ru

Технологические особенности сварки встык труб из разных марок полиэтилена

Наиболее важным методом соединения труб в мировой практике строительства трубопроводов из полимерных материалов является сварка полиэтиленовых (ПЭ) труб нагретым инструментом встык. В связи с высокой популярностью полиэтилена как материала для труб производители сырья активно осваивают производство новых марок ПЭ с уникальными реологическими свойствами, а производители труб осваивают производство труб супербольших диаметров, с большими толщинами стенок. Обновление нормативной базы по методам сварки труб и контролю качества сварных соединений отстает от прогресса производства. В настоящее время международным ISO 21307:2011 и российским гармонизированным ГОСТ Р 55276-2012 стандартизованы три основные процедуры сварки ПЭ труб встык. Методы визуально-измерительного контроля (ВИК) сварных соединений стандартизованы немецкими нормами DVS 2202-1 и российским ГОСТ Р 54792-2011. Область применения стандартных процедур сварки и методов ВИК не вполне соответствует современному разнообразию градаций и марок ПЭ, а также толщин стенок производимых полиэтиленовых труб. Оценка вязкости и упругости материала труб и прочих априорных условий сварки способна дать обоснование выбора той или иной сварочной процедуры и возможной коррекции ее основных параметров, а также позволит при ВИК отличить дефект сварного соединения от реологических особенностей материала. Эмпирическая инструкция по коррекции сварочных параметров была добавлена авторами в ГОСТ Р 55276-2012 при его разработке в виде справочного приложения. Уточнение и легитимизация этой инструкции требует проведения серии технологических экспериментов, часть из которых к настоящему времени выполнена авторами.

Ключевые слова: процедуры сварки встык, параметры сварки, реология расплавов.

V.I. Kimelblat, Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia), Doctor of Science (Engineering), Professor of the Elastomers Chemistry and Treatment Process Department, e-mail: vkimelblat@yandex.ru; **I.V. Volkov**, Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia), Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Elastomers Chemistry and Treatment Process Department; **A.V. Zhukov**, ADR-Technology LLC (Moscow, Russia), General Director, e-mail: az@adr-t.ru

Technological aspects of butt fusion jointing of pipes made of various polyethylene grades

Butt fusion jointing of polyethylene (PE) pipes is the most important pipe join method in the world's practice of polymer pipeline construction. Due to polyethylene high popularity as a pipes material, raw material manufacturers are actively developing the manufacture of new PE grades with unique rheological properties, while pipes manufacturers are actively developing the manufacture of extra-large diameters pipes with a large wall thickness. The regulatory system updating with regard to pipes welding methods and welded joints quality control falls behind the manufacture progress. Currently, three basic procedures of PE pipes butt fusion jointing are standardized to the international ISO 21307:2011 and Russian harmonized GOST R 55276-2012 standards. Welded joints visual inspection (VI) methods are standardized by the German DVS 2202-1 regulations and Russian GOST R 54792-2011 standard. Standard butt fusion procedures and VI methods application area does not exactly correspond to the modern variety of PE grades and gradations, as well as walls thicknesses of manufactured polyethylene pipes. Evaluation of pipes material viscosity and elasticity and other a priori fusion conditions is able to justify the choice of a certain butt fusion procedure and possible adjustments of its basic parameters, and will allow differing an eventual welded joint defect identified during VI from the material's particular rheological properties. Empirical instructions of the welding parameters adjustments have been added by the authors in the GOST R 55276-2012 during its development as a reference annex. Elaboration and legitimization of the instructions requires a series of technological experiments, they have been partially performed by the authors by now.

Keywords: butt fusion procedures, fusion parameters, melt rheology.

МНОГООБРАЗИЕ НОРМАТИВОВ ПО СВАРКЕ НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Среди многочисленных методов соединения заготовок из полимерных материалов, получивших применение в российской и глобальной практике строительства трубопроводов, наиболее важным методом соединения полиэтиленовых труб является сварка нагретым инструментом (НИ) встык. Этот метод конкурирует со сваркой накладными нагревателями (ЗН) [1] в Европе и доминирует в Северной Америке. Термин «сварка встык» давно используется в российской технической литературе, поэтому будем придерживаться его, хотя 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.

Сварка НИ наиболее часто применяется для соединения монолитных ПЭ труб диаметром 63–2400 мм и при изготовлении сварных фитингов диаметром до 2400 мм, а также при сварке витых труб диаметром до 2600 мм. Широкая сфера практического применения обусловлена рядом технических и экономических преимуществ перед конкурирующими методами сварки.

В российской практике строительства полимерных водохозяйственных, газопроводных, коммунальных и промышленных трубопроводных систем преобладают ПЭ трубы, соответственно, сварка НИ получила отражение в соответствующих профильных 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.), СНиП 3.05.05-84 («Технологические трубопроводы», п. 4.23), СН 478-80, СН 550-82, ОСТ 6-19-505-79, СТО 2-2.1-411-2010 и др. Некоторые из документов дают собственную трактовку

технологии сварки НИ, и эти трактовки зачастую конфликтуют друг с другом. Другая причина разночтений – в многообразии градаций и марок ПЭ различных производителей, с различными реологическими свойствами.

Уже в 70-е годы прошлого века технологические эксперименты по строительству опытных трубопроводов выявили слабые места устаревших марок ПЭ и методов соединения труб. 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 труб из ПЭ. Композиции на основе ПНД по показателям минимальной длительной прочности (MRS) соответствовали градации ПЭ 50, 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. Справедливости ради следует отметить сохранение позиций ПЭ 80 при производстве труб газопроводного назначения в США.

Для производства полиэтиленовых труб в России используется большое количество компаундов марок ПЭ 80 и ПЭ 100 различных отечественных и зарубежных производителей, в частности ОАО «Казаньоргсинтез», ОАО «НКНХ», Sabic, KPIC, SCG, Basell, Borealis. Полимеры этих производителей синтезируются по различным технологиям и имеют разную структуру и, как следствие, отличающиеся реологические свойства, т.е. течение материала при переработке. Актуальной инновацией трубной отрасли является освоение производства труб больших и супербольших диаметров [3, 4]. При формовке таких труб возникает проблема гравитационного стекания расплава. Для устранения этого эффекта в производстве суперболь-

ших 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 предлагают оригинальные технологии сварки. Однако несогласованные между собой технологии создают для технологов недопустимую неопределенность в выборе оптимального варианта параметров сварки.

УПОРЯДОЧЕНИЕ ПРОЦЕДУР СВАРКИ НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Пытаясь уменьшить неопределенность, международная стандартизирующая организация (ISO) составила стандарт ISO 21307 [5], содержащий три процедуры сварки ПЭ водопроводов и газопроводов с варьируемыми основными параметрами сварочного процесса. Каждая из этих процедур имеет убежденных сторонников в ISO. Процедуры отражены в уважаемых национальных стандартах Германии, Великобритании и США и прошли многолетнюю практическую апробацию. Они тесно связаны с рядом национальных нормативных документов в области полимеров, труб, фитингов и сварочной техники. Поэтому ISO в поисках компромиссного решения использовало в составе стандарта ISO 21307 все три актуальные процедуры. 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.

Ссылка для цитирования (for references):

Кимельблат В.И., Волков И.В., Жуков А.В. Технологические особенности сварки встык труб из разных марок полиэтилена // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2015. – № 4. – С. ??????

Kimelblat V.I., Volkov I.V., Zhukov A.V. Tehnologicheskie osobennosti svarki vstyk trub iz raznyh marok polijetilena [Technological aspects of butt fusion jointing of pipes made of various polyethylene grades]. *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No 4. P. ??????

Разделяя мнение ведущих специалистов, отраженное, например, на сайте [9], авторы считают нужным отметить следующее.

1. ГОСТ Р ИСО 55276 стал успешной попыткой устранить разночтения в технологии сварки НИ. Технологи имеют возможность 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 для различных марок ПЭ. При этом способ описания процедур в ГОСТ делает практически невозможным их непосредственное применение неквалифицированными сварщиками.

3. ГОСТ Р ИСО 55276-2012, как и его прототип ISO 21307, можно применять для сварки деталей с толщиной стенки не более 70 мм, в то время как ведущие производители выпускают ПЭ трубы с толщиной стенки более 100 мм, и их тоже нужно варить.

4. В ISO 21307 и ГОСТ Р ИСО 55276-2012 отсутствуют ограничения по показателю текучести расплава материала труб ПТР190/5. Между тем авторитетные немецкие нормы DVS 2207-1 устанавливают границу применимости обычной технологии сварки ПТР190/5 $> 0,2$ г/10 мин. Отметим, что большая часть российских полиэтиленов градации ПЭ 100 имеет показатели текучести расплава ПТР190/5 ниже 0,2 г/10 мин., т.е. применение стандартных технологий для сварки высоковязких ПЭ 100 не вполне корректно.

5. В ISO 21307 отсутствуют какие-либо рекомендации по предпочтению той или иной сварочной процедуры. Нет там и рекомендаций по корректировке сварочных параметров в случаях, когда толщина заготовок и/или ПТР материала заготовок выходят за легитимные нормы. В связи с этим в ГОСТ Р ИСО 55276-2012 авторы добавили четвертую процедуру сварки НИ с относительно широкой свободой изменения сварочных параметров в зависимости от различных априорных условий, а также с

пояснениями эмпирических оснований для таких изменений. Четвертая процедура добавлена в качестве справочного приложения, поскольку легитимная инструкция по корректировке параметров требует обширных научно-исследовательских работ, в основном по определению долговременной прочности опытных сварных соединений. На сегодняшний день часть этих работ уже выполнена авторами статьи.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

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 ныне устаревших марках ПЭ и не в полной мере согласуются с визуальными параметрами валиков сварных соединений заготовок из новейших марок ПЭ 100. Границы применимости авторитетных указаний DVS 2202-1 [11] и соответствующих им указаний ГОСТ Р 54792-2011 [12] по ВИК не превышают толщины стенки 20 мм, в то время как производство толстостенных труб (более 100 мм) давно освоено промышленностью. Нестыковки действующих международных и новейших российских технологических норм на сварку и контроль качества стыка, с одной стороны, с параметрами труб и фитингов супербольших размеров, изготовленных из новейших марок ПЭ, с другой стороны, являются серьезной проблемой в вопросе обеспечения качества сварки НИ. Решения этой проблемы в международной 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 можно прогнозировать. Сварка НИ, по существу, является реологическим процессом. Рассмотрим циклограмму различных процедур сварки по ГОСТ Р ИСО 55276.

На рисунке 1 изображена зависимость нормативного давления P в плоскости сварки от времени t для первой проце-

дуры сварки при единственном низком давлении (традиционная процедура для Германии и России).

Нагретый инструмент помещают между свариваемыми заготовками. После создания давления выравнивания (0,15–0,19 МПа) в плоскости сварки за время t_1 из зоны сварки выдавливается валик первичного грата.

Кинетика образования первичного валика не играет важной роли, поскольку t_1 не нормируется, а выравнивание в любом случае длится до завершения образования первичного валика нормативного размера (не менее) по всей окружности обеих труб, т.е. с обеих сторон НИ.

А вот на стадии прогрева, напротив, длительность стадии и давление в плоскости сварки в значительной степени влияют 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 или избыточные величины давления на стадии собственно сварки влияют на внешний вид грата и качество сварки. Принято считать [13, 14], что недостаточное давление не обеспечивает удаление желательного объема расплава материала из зоны сварки и ведет к несплавлениям.

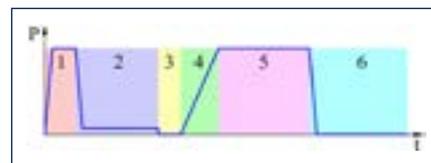


Рис. 1. Циклограмма процедуры сварки при единственном низком давлении
Стадии сварочного процесса:

- 1 – выравнивание, 2 – прогрев,
 - 3 – технологическая пауза, 4 – подъем давления, 5 – охлаждение в машине под давлением, 6 – охлаждение вне машины
- Fig. 1. Single low-pressure fusion jointing cycle
Fusion process stages: 1 – initial bead-up, 2 – heat soak, 3 – heater plate removal, 4 – fusion pressure achievement, 5 – cooling in the machine under pressure, 6 – cooling out of the machine

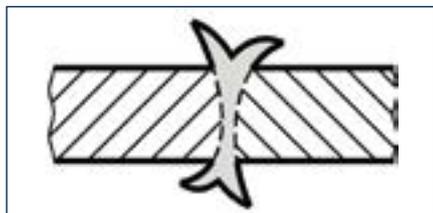


Рис. 2. Высокий и узкий грат
Fig. 2. Tall and narrow weld bead

Избыточное давление, напротив, выдавливает избыточный объем расплава, приводит к уменьшению объема оставшегося расплава в зоне сварки, вплоть до соединения холодных поверхностей свариваемых заготовок и, как следствие, также ведет к несплавлениям. Дефектоскописты, выполняя процедуры ВИК, судят о нарушениях режима сварки по параметрам валиков грата. При этом в качестве эталонов используют стандартные рисунки из ГОСТ Р 54792-2011 [12]. Так, например, высокий и узкий грат, как правило, не касающийся краями трубы (рис. 2), 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 слабостекающих марок ПЭ 100. При этом механические испытания демонстрируют хорошую прочность сварных соединений.

Подобную форму грата можно прогнозировать, выявив высокие вязкость и упругость расплавов ПЭ в процессе

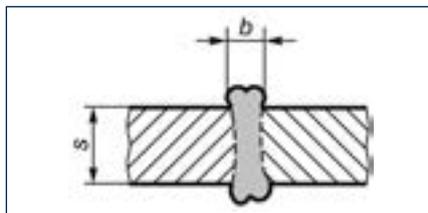


Рис. 3. Неправильное соотношение b/s
Fig. 3. Improper b/s ratio

стандартных и специальных реологических экспериментов [15–17]. Другой браковочный дефект представляет собой нарушение пропорциональности между размерами грата и толщиной стенки трубы (рис. 3): грат слишком широкий или слишком узкий, что обусловлено, например, неправильным временем нагрева, неправильной температурой нагретого инструмента, неправильным усилием сжатия.

Однако дефект – слишком широкий или слишком узкий грат – кроме нарушений технологии сварки также может быть обусловлен вариациями упруго-вязких характеристик расплава ПЭ. Причем, согласно экспериментальным данным авторов статьи, пропорциональность между размерами грата b и толщиной стенки трубы s сохраняется только в области сравнительно малых толщин. При толщине стенки трубы или листа свыше 20 мм зависимость $b = f(s)$ становится нелинейной.

Еще один дефект – несимметричность валиков грата (рис. 4.) – теряет смысл в качестве браковочного критерия, если свариваемые детали изготовлены из разных марок ПЭ или даже разных партий ПЭ

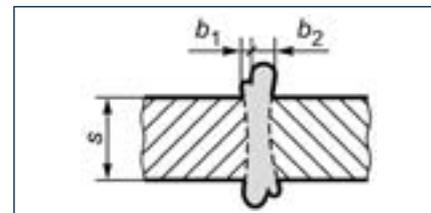


Рис. 4. Несимметричные валики
Fig. 4. Irregular weld bead width

одной марки, расплавы которых имеют различные реологические свойства. Третья процедура сварки – при единственном высоком давлении – предусматривает увеличение давления P_1 и P_3 примерно в три раза по сравнению с процедурой сварки при единственном низком давлении (первая процедура). При этом общий вид циклограммы соответствует первой процедуре (рис. 1). Третья процедура разработана в США и за многие десятилетия применения подтвердила свою пригодность при сооружении водохозяйственных систем и газопроводов. Особенность процедуры заключается также в том, что нормативное время прогрева t_2 является ориентировочным, но недостаточным параметром. О завершении стадии прогрева свидетельствует появление валика заданного размера.

Вторая процедура – при двойном низком давлении – предусматривает сброс давления вскоре после соединения торцов труб (рис. 5).

Размеры и форма грата, естественно, оказываются чувствительными к изменениям напряжения сдвига, обусловленным особенностями процедур.

АППАРАТЫ ДЛЯ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДО- И ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

- ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИЛЕР ЕВРОПЕЙСКИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ
- КОНСУЛЬТАЦИЯ ПО ВЫБОРУ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
- ОТГРУЗКА СО СКЛАДА В МОСКВЕ, ДОСТАВКА В РЕГИОНЫ
- ШЕФ-МОНТАЖ, ПУСКОНАЛАДКА, ОБУЧЕНИЕ РАБОТЕ
- ГАРАНТИЯ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ
- СДАЧА ОБОРУДОВАНИЯ В АРЕНДУ

АДР-Технология
www.ADR-T.ru
(495) 150-08-22

ADR
TECH

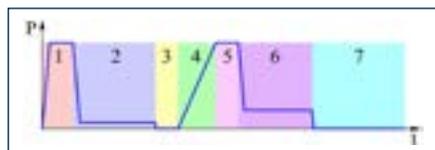


Рис. 5. Циклограмма процедуры сварки при двойном низком давлении
Стадии сварочного процесса:
1 – выравнивание, 2 – прогрев,
3 – технологическая пауза, 4 – подъем давления, 5 – сварка, 6 – охлаждение в машине под давлением, 7 – охлаждение вне машины
Fig. 5. Dual low-pressure fusion jointing cycle
Fusion process stages: 1 – initial bead-up, 2 – heat soak, 3 – heater plate removal, 4 – fusion pressure achievement, 5 – fusion, 6 – cooling in the machine under pressure, 7 – cooling out of the machine

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 сварочного процесса, с одной стороны, и свойств полиэтилена – с другой.

В производственной практике для оценки реологических свойств полиэтиленов обычно используют показатель текучести расплава (ПТР), величина которого характеризуется, в частности, средней молекулярной массой (ММ) полимера. Однако более точные оценки кинетических процессов дают прецизионные измерения вязкости расплавов на современных вискозиметрах [15, 16] с целью получения кривых течения в широком диапазоне скоростей сдвига (рис. 6). Результирующие размеры валиков грата, естественно, обратно пропорциональны вязкости расплава, которая, в свою очередь, зависит от скорости сдвига. Это позволяет прогнозировать параметры измерительного контроля до сварки и даже до производства труб. Прогнозируемые параметры будут зависеть не только от марки полиэтилена, но и от параметров сварочного процесса.

ПТР и вязкость исходных полимеров являются реологическими оценками первого приближения. Первичные полиэтилены экструзионных (так называемых трубных) марок отличаются высокой средней молекулярной массой и очень широким распределением ММ. Однако в процессе термоокислительной деструкции, имеющей место при производстве заготовок, в полиэтиленах низкого давления образуются разветвленные и сшитые структуры. В результате макромолекулярных реакций меняется структура ПНД и, соответственно, динамика реологических процессов, происходящих при дальнейшей сварке заготовок. Для получения более полного представления о макромолекулярной структуре можно использовать традиционные реологические и специально разработанные высокоточные релаксационные (РДР – релаксация давления расплава) методы контроля [15–19].

Технологические эксперименты, выполненные к настоящему времени авторами, при варьировании толщин заготовок от 3 до 110 мм и диаметров труб от 63 до 1600 мм, в разных погодных-климатических условиях (летний и зимний циклы), на разном оборудовании (машины GFO, WIDOS, KWH, BADA, MacElroy и УСПТЭП), для разных градаций и марок ПЭ (Sabic P6006, ПЭ 100 6949С, ПЭЗНТ11-9), 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 3 (при высоком давлении);
- 2) размеры валиков для заготовок толщиной более 10 мм растут при переходе от процедуры 2 к процедуре 1 и затем – к процедуре 3 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

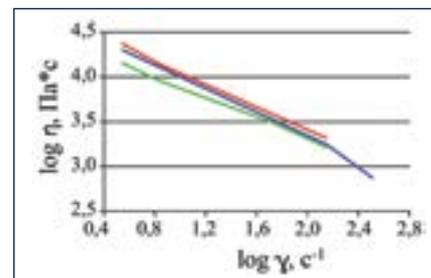


Рис. 6. Зависимости вязкости от скорости сдвига расплавов полиэтиленов разных градаций и марок при 180 °С
— гранулы материала PE 4PP25B/4163 (ПЭ 80);
— гранулы материала P600BL (ПЭ 100);
— гранулы материала Hostalen CRP 100 (ПЭ 100)
Fig. 6. Relation of viscosity and melt share rate at 180 °C with regard to various polyethylene gradations and grades
— PE 4PP25B / 4163 material granules (PE 80);
— P600BL material granules (PE 100);
— Hostalen CRP 100 material granules (PE 100)

влияние низких температур воздуха увеличением температуры нагретого инструмента 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 вышеприведенными методами позволяет обосновать для сварки труб адекватную спецификацию на процесс сварки, выбрав за основу одну из стандартизированных процедур и оптимизировав основные ее параметры. Следует добавить, что затраты на пробную сварку и испытание пробных сварных соединений толстостенных труб больших и супербольших диаметров оказываются весьма велики. Поэтому с целью обоснования выбора процедур и для ускорения поиска оптимальных режимов сварки целесообразно получение априорной реологической информации.

Литература:

1. Кимельблат В.И., Волков И.В., Прокопьев Н.В. Традиции и новации в электродиффузионной сварке. – Казань: КНИТУ, 2011. – 108 с.
2. Кимельблат В.И. Молекулярный дизайн экструзионных марок ПНД с применением специальных реологических методик // Структура и динамика молекулярных систем: сборник статей. – Казань, Москва, Йошкар-Ола, Уфа, 2003. – Вып. X. – Ч. 1. – С. 114–117.

3. Кимельблат В.И. Оценка качества сварных соединений и эксплуатационных характеристик полимерных трубопроводных систем // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 11. – С. 13–16.
4. Кимельблат В.И., Стоянов О.В. Полиэтиленовые трубы больших диаметров: производство и эффективное применение // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2013. – № 2. – С. 6–10.
5. ISO 21307:2011. Plastics pipes and fittings – Butt fusion jointing procedures for polyethylene (PE) pipes and fittings used in the construction of gas and water distribution systems (MOD).
6. ГОСТ Р 55276-2012(ISO 21307-2011). Трубы и фитинги пластмассовые. Процедуры сварки нагретым инструментом встык полиэтиленовых (ПЭ) труб и фитингов, используемых для строительства газо- и водопроводных распределительных систем.
7. ISO 12176-1-2006. Plastics pipes and fittings – Equipment for fusion jointing polyethylene systems. Part 1: Butt fusion (IDT).
8. ГОСТ Р 12176-1-2011. Трубы и фитинги пластмассовые. Оборудование для сварки полиэтиленовых систем. Ч. 1: Сварка нагретым инструментом встык.
9. Сайт ООО «АДР-Технология». Режим доступа: http://www.adr-t.ru/support/technology/butt_welding/.
10. Кимельблат В.И., Волков И.В. Проблемы нормативно-технической документации на контактную сварку полимерных труб встык // Сварка и диагностика. – 2011. – № 1. – С. 58–61.
11. DVS 2202-1:1989. Imperfections in thermoplastic welding joints: features, descriptions, evaluation.
12. ГОСТ Р 54792-2011. Дефекты в сварных соединениях термопластов. Описание и оценка.
13. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н., Богдасhevский А.В. и др. Сварка полимерных материалов: Справочник / Под общ. ред. К.И. Зайцева, Л.Н. Мацюк. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
14. Зайцев К.И. Сварка пластмасс при сооружении объектов нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1984. – 224 с.
15. Кимельблат В.И., Волков И.В., Чупрак А.И. Вариации реологических свойств как стимул оптимизации основных параметров сварки нагретым инструментом встык // Сварка и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 49–52.
16. Волков И.В., Кимельблат В.И. Роль реологических свойств ПЭ при выборе основных параметров сварки // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 14. – С. 119–123.
17. Волков И.В., Глухов В.В., Камалов А.Б., Кимельблат В.И. Связь показателей свариваемости ПЭ 100 и его макромолекулярной структуры // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 10. – С. 600–602.
18. Кимельблат В.И., Волков И.В. Релаксационные характеристики расплавов полимеров и их связь со свойствами композиций. – Казань: КГТУ, 2006. – 188 с.
19. Волков И.В., Мысяк Р.С., Кимельблат В.И. Течение расплавов новых марок ПНД // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 17. – С. 128–133.

References:

1. Kimmelblat V.I., Volkov I.V., Prokopiev N.V. *Tradicii i novacii v jelektrodiffuzionnoj svarke* [Best practices and innovations in electrodiffusion welding]. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2011. 108 pp.
2. Kimmelblat V.I. *Molekuljarnyj dizajn jekstruzionnyh marok PND s primeneniem special'nyh reologicheskikh metodik* [High-density polyethylene (HDPE) extrusion grades molecular design with special flow characteristics methods application]. *Struktura i dinamika molekuljarnykh sistem: sbornik statej = Molecular systems structure and dynamics: collection of articles*. Kazan, Moscow, Ioshkar Ola, Ufa, 2003. Issue X, Part 1. P. 114–117.
3. Kimmelblat V.I. *Ocenka kachestva svarnykh soedinenij i jekspluatacionnyh harakteristik polimernykh truboprovodnykh sistem* [Welded joints and polymer pipeline systems performance characteristics Quality Assessment]. *Remont, vosstanovlenie, modernizacija = Repair, rehabilitation, modernization*, 2014, No. 11. P. 13–16.
4. Kimmelblat V.I., Stoyanov O.V. *Polijetilenovye trubyy bol'shih diametrov: proizvodstvo i jeffektivnoe primenenie* [Large diameter polyethylene pipes: manufacture and effective application]. *Remont, vosstanovlenie, modernizacija = Repair, rehabilitation, modernization*, 2013, No. 2. P. 6–10.
5. *ISO 21307:2011. Plastics pipes and fittings – Butt fusion jointing procedures for polyethylene (PE) pipes and fittings used in the construction of gas and water distribution systems (MOD)*.
6. *GOST R 55276-2012 (ISO 21307-2011). Truby i fitingi plastmassovyye. Procedury svarki nagretym instrumentom vстыk polijetilenovykh (PJe) trub i fitingov, ispol'zuemykh dlja stroitel'stva gazo- i vodoprovodnykh raspreditel'nykh sistem* [Plastics pipes and fittings. Polyethylene (PE) pipes and fittings used for the gas and water distribution systems construction hot tool butt-welding procedures].
7. *ISO 12176-1-2006. Plastics pipes and fittings – Equipment for fusion jointing polyethylene systems. Part 1: Butt fusion (IDT)*.
8. *GOST R 12176-1-2011. Truby i fitingi plastmassovyye. Oborudovanie dlja svarki polijetilenovykh sistem. Ch. 1: Svarka nagretym instrumentom vстыk* [Plastics pipes and fittings. Polyethylene systems welding equipment. Part 1: Hot tool butt-welding].
9. *Website of ADR-Technology LLC*. Access mode: http://www.adr-t.ru/support/technology/butt_welding/.
10. Kimmelblat V.I., Volkov I.V. *Problemy normativno-tehnicheskoy dokumentacii na kontaktnuju svarku polimernykh trub vстыk* [Regulatory and technical documentation issued for the polymer pipes contact butt-welding]. *Svarka i diagnostika = Welding and diagnostics*, 2011, No. 1. P. 58–61.
11. *DVS 2202-1:1989. Imperfections in thermoplastic welding joints: features, descriptions, evaluation*.
12. *GOST R 54792-1-2011. Defekty v svarnykh soedinenijah termoplastov. Opisaniye i ocenka* [Flaws in thermoplastics welded joints. Description and evaluation].
13. Zaitsev K.I., Matsyuk L.N., Bogdashevskiy A.V. et al. *Svarka polimernykh materialov: Spravochnik* [Polymer materials welding: Reference book]. Under general editorship of K.I. Zaitsev, L.N. Matsyuk. Moscow, Mechanical Engineering, 1988. 312 pp.
14. Zaitsev K.I. *Svarka plastmass pri sooruzhenii ob'ektov nef'tjanoj i gazovoj promyshlennosti* [Plastics welding during the oil and gas industry facilities construction]. Moscow, Nedra, 1984. 224 pp.
15. Kimmelblat V.I., Volkov I.V., Chuprak A.I. *Variacii reologicheskikh svoystv, kak stimuly optimizacii osnovnykh parametrov svarki nagretym instrumentom vстыk* [Flow characteristics variation as the drive for the hot tool butt-welding basic parameters optimization]. *Svarka i diagnostika = Welding and diagnostics*, 2012, No. 2. P. 49–52.
16. Volkov I.V., Kimmelblat V.I. *Rol' reologicheskikh svoystv PJe pri vybore osnovnykh parametrov svarki* [PE flow characteristics role during the selection of basic welding parameters]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, 2011, No. 14. P. 119–123.
17. Volkov I.V., Glukhov V.V., Kamalov A.B., Kimmelblat V.I. *Svjaz' pokazatelej svarivaemosti PJe 100 i ego makromolekuljarnoj struktury* [PE 100 welding characteristics indicators and its macromolecular structure connection]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, 2010, No. 10. P. 600–602.
18. Kimmelblat V.I., Volkov I.V. *Relaksacionnyye harakteristiki rasplavov polimerov i ih svjaz' so svoystvami kompozicij* [Polymer melts relaxation characteristics and their relation to the compositions properties]. Kazan, Kazan State Technological University, 2006. 188 pp.
19. Volkov I.V., Mysyak R.S., Kimmelblat V.I. *Techenie rasplavov novykh marok PND* [HDPE new grades melts flow]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, 2014, No. 17. P. 128–133.