

ИСПЫТАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЭ ТРУБ ВСТЫК НА РАСТЯЖЕНИЕ

И.В. Волков, А.Н. Сеньковский,
Н.В. Прокопьев, В.И. Кимельблат, А.Н. Крючков

В конце XX века в СССР была создана необходимая нормативная база в области технологии применения труб из ПВД и ПНД, в частности, ПЭ 50 и ПЭ 63. Технология сварки и контроль соединений были вполне адекватны мировой науке и практике. Разработками в этой области успешно занимались, в частности, НИИ Сантехники, ВНИКТИПП (НПО «Пластик»), ВНИИСТ, НИИМосстрой.

Негативную оценку авторов вызывали разработки, содержащие многочисленные отклонения от общепризнанной теории и практики в части параметров сварки, организации испытаний и ультразвукового контроля (УЗК) [1]. Последний метод, не имеющий ни теоретического обоснования, ни практической эффективности, тем не менее и к сожалению, продолжает пропагандироваться и использоваться компиляторами при составлении новых технических документов.

Дальнейший макромолекулярный и композиционный дизайн полиэтиленов привел к освоению производства унимодальных и бимодальных ПЭ 80, а также бимодальных ПЭ 100. В настоящее время ПЭ 100 преобладает как на мировом, так и на российском рынке трубных марок ПЭ. Актуальной инновацией трубной отрасли является производство труб больших и супербольших диаметров. При производстве таких труб возникает проблема гравитационного стекания расплава, для устранения которого применяют слабо стекающие марки ПЭ 100.

Стремительный прогресс в производстве материалов труб и фитингов в мировой практике учитывается путем периодических и систематических НИР в области технологии сварки ПЭ труб. Эти работы проводятся производителями сырья и труб и объединенными национальными структурами, в частности, под эгидой DVS в Германии, British Gas в Великобритании и PPI в США.

В современной России разработки технологии применения ПЭ сильно отстают от прогресса в области производства полимерных материалов, ПЭ труб и потребности стройиндустрии. Ряд документов газопроводного назначения содержит многочисленные необоснованные решения и к тому же со всеми ошибками копируются в воднохозяйственных документах [1]. При этом современный мировой опыт должным образом не учитывается. Следует отметить также, что российские марки ПЭ 100 имеют ряд специфических особенностей, в частности, очень низкие показатели текучести расплава. В этой связи НИИ ПОЛИПЛАСТИК при участии Климовского трубного завода был предпринят цикл экспериментальных работ, направленных на формирование обоснованных критериев качества сварных соединений современных ПЭ труб.

Технология сварки

Упруго-вязкие свойства расплавов многочисленных градаций и марок ПЭ различных производителей имеют существенные отличия, а сварка встык представляет собой реологический процесс, естественно зависящий от свойств расплавов полимеров [2]. Качество сварки нагретым инструментом (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.

Учитывая этот факт, специалисты по стандартизации сварки, многие производители труб, фитингов и сварочных машин предлагали оригинальные технологии сварки. Однако не согласованные между собой технологии создают недопустимую неопределенность в выборе технологами оптимального варианта параметров сварки. Пытаясь уменьшить неопределенность, Международная организация по стандартизации (ISO) составила стандарт ISO 21307 [3], содержащий три процедуры сварки водо- и газопроводов с варьируемыми основными параметрами. Российский ГОСТ Р ИСО 55276-2012 [4] создан на основе аутентичного перевода ISO 21307 с добавлением четвертой, авторской процедуры.

Все образцы для настоящей работы были получены из сварных соединений труб НИ встык при температуре нагревателя 220°C. Сварка проводилась при трех различных режимах в соответствии с предлагаемыми ГОСТ Р ИСО 55276-2012 вариантами процедур. Первая процедура сварки (рис. 1) проходит при «единственном низком давлении» p_1 и p_3 0,15–0,19 МПа в плоскости сварки.

Процедура сварки при «единственном высоком давлении», широко распространенная на американском континенте, предусматривает увеличение давления p_1 и p_3 примерно в три раза по сравнению с процедурой сварки при «единственном низком давлении».

Сварка при «двойном низком давлении» предусматривает сброс давления после соединения торцов труб (рис. 2).

Известные авторам экспериментально обоснованные и хорошо апробированные на практике технологии сварки содержат в явном или неявном виде границы применимости. Так, ограничения касаются температуры окружающей среды (не ниже +5°C согласно DVS), размеров свариваемых труб и испытываемых образцов, характеристик ПЭ и т.д. При сварке за пределами областей применения обоснованных технологий следует пользоваться специальными инструкциями (указаниями) производителей труб и/или разработчиков специальной технологии.

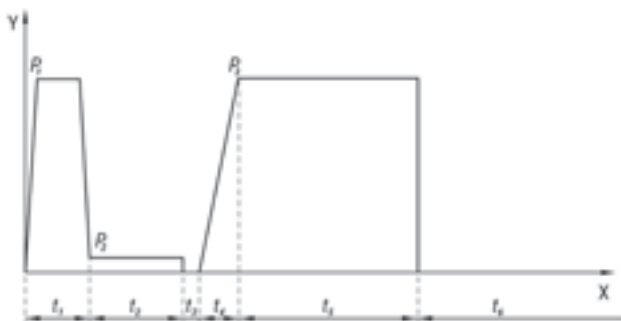


Рис. 1 Циклограмма процедуры сварки при «единственном низком давлении»

X – время;
 Y – давление;
 t_1 – время выравнивания;
 t_2 – время прогрева;
 t_3 – технологическая пауза;
 t_4 – время подъема давления;
 t_5 – время охлаждения в машине под давлением;
 t_6 – время охлаждения вне машины;
 p_1 – давление выравнивания;
 p_2 – давление прогрева;
 p_3 – давление сварки.

Эти соображения учитывались авторами при выполнении опытно-промышленных сварочных работ на КТЗ и ООО ТЭП.

Принято считать, что наиболее обоснованные в научном отношении данные о надежности и долговечности сварных соединений дают длительные испытания их на осевое растяжение. Но эти испытания, по определению, требуют очень больших затрат времени, трудоемки, непригодны для испытания соединений толстостенных труб и потому выполняются очень редко.

В международной практике контроля сварных соединений нагретым инструментом встык значительное внимание уделяется кратковременным механическим испытаниям на осевое растяжение, а также изгиб. В России чаще применяют испытания на растяжение.

Испытания сварных соединений на растяжение

Главной оценкой качества сварного шва при испытаниях на растяжение является характер разрушения. Пластический характер разрушения свидетельствует о его хорошем качестве, хрупкий – о неудовлетворительном. Однако оценки результатов испытаний супертолстых труб часто вызывают дискуссии, поскольку качество поверхности разрушения не может быть однозначно охарактеризовано. Вместе с тем, при испытаниях на растяжение могут быть получены также численные оценки упруго-деформационных свойств сварного соединения, полезные для уточнения оценок качества сварки.

На практике применяется несколько процедур растяжения. Необходимо было сравнить эффективность разных процедур испыта-

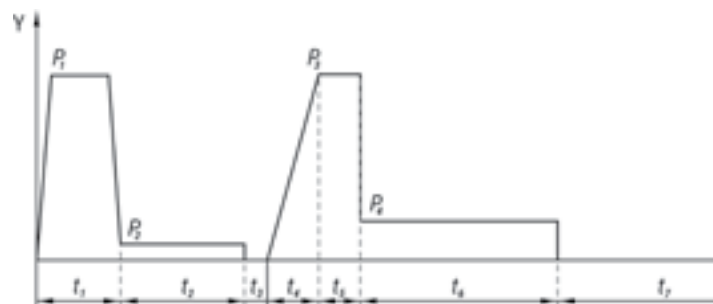


Рис. 2 Циклограмма процедуры стыковой сварки при «двойном низком давлении»

X – время;
 Y – давление;
 t_1 – время выравнивания; t_2 – время прогрева;
 t_3 – технологическая пауза; t_4 – время подъема давления;
 t_5 – время сварки;
 t_6 – время охлаждения в машине при пониженном давлении;
 t_7 – время охлаждения в машине без давления или вне машины;
 p_1 – давление выравнивания; p_2 – давление прогрева;
 p_3 – давление при сварке;
 p_4 – пониженное давление при охлаждении в машине.

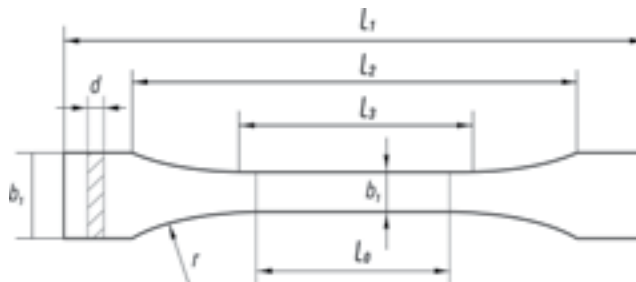


Рис.3 Образец для испытаний, тип 2.

Таблица 1 Размеры образцов типа 2 ГОСТ 11262-80

Параметр	Значения, мм
Общая длина L_1 , не менее	150
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце L_2	115 ± 5
Длина рабочей части L_3	$60 \pm 0,5$
Расчетная длина L_4	$50 \pm 0,5$
Ширина головок b_1	$20 \pm 0,5$
Ширина рабочей части b_2	$10 \pm 0,5$
Общая длина L_1 , не менее	150
Толщина d	толщина стенки трубы
Радиус закругления r , не менее	60

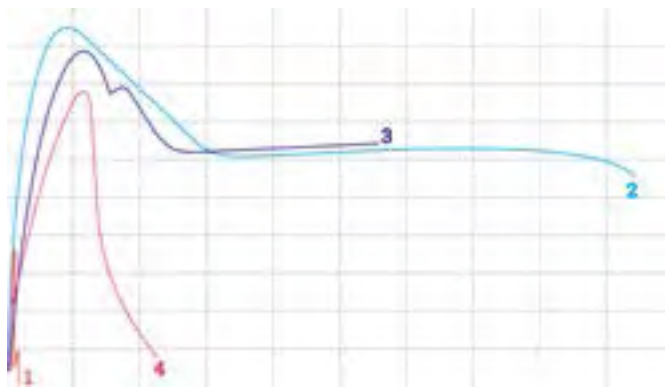


Рис. 4

Диаграммы растяжения образцов сварных соединений с хрупким (№1, 4) и пластическим характером разрушения. Скорость растяжения 5 мм/мин.

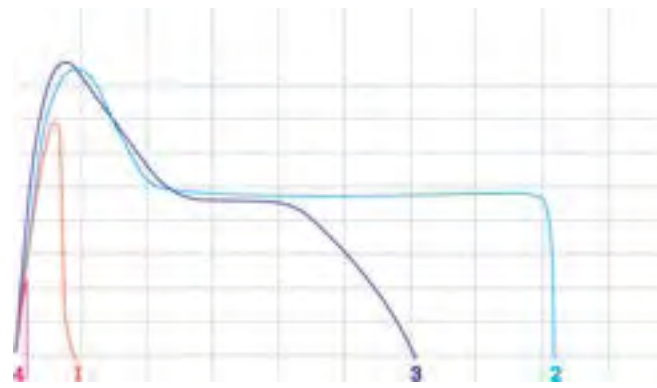


Рис. 5

Диаграммы растяжения образцов сварных соединений с хрупким (№1, 4) и пластическим характером разрушения. Скорость растяжения 50 мм/мин.

ний и попытаться выбрать оптимальную. В связи с этим разрушающие испытания проводились по трем методикам, описанным в нормативных документах.

В соответствии с ГОСТ 11262-80, из сварного соединения вырубался (фрезеровался) образец (лопатка) тип 2 (рис. 3, табл. 1). Испытания проводили при скорости растяжения 5, 25 и 50 мм/мин.

Рассмотрим пример совместного применения оценки качества сварки по характеру разрушения и механическим свойствам.

На рисунках 4 и 5 приведены диаграммы растяжения сварных соединений труб из ПЭ 100 Ø900 мм с толщиной стенки 54,5–55,3 мм. Образцы были сварены в неблагоприятных условиях, на сварочной машине, предварительно охарактеризованной, как не жесткая. Таким образом, было получено частичное несплавление сварного соединения. Несплавление было выявлено по характеру разрушения сварного соединения и низким упруго-деформационным показателям (таблица 2).

Параметр	№ образца	Скорость растяжения мм/мин.		
		5	25	50
Относительное удлинение при разрыве ϵ , %	1	7	10	32
	2	313	112	272
	3	186	—	202
	4	76	76	6
Предел текучести σ , МПа	1	9	16	21
	2	22	25	26
	3	21	—	26
	4	19	20	12

Таблица 2

Влияние скорости растяжения на упруго-деформационные свойства сварных соединений.

Для испытаний по ГОСТ Р 52779-2007 были фрезерованы образцы в виде лопаток тип В и тип С (рис. 6). Размеры приведены в таблице 3. Испытания проводили при скорости растяжения (5 ± 1) мм/мин.

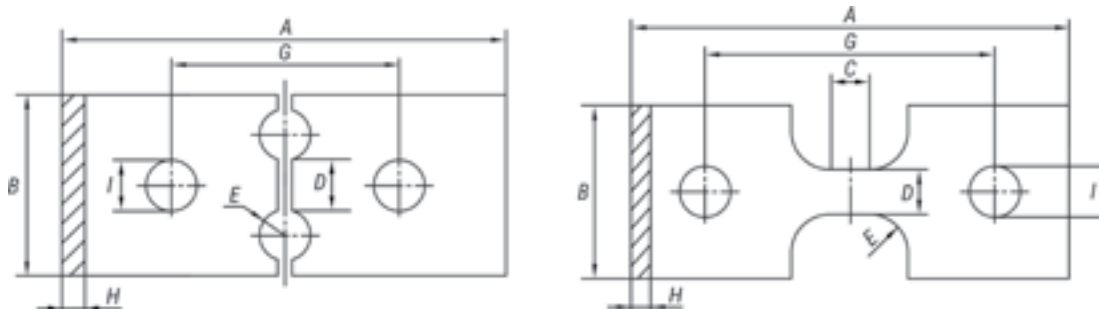


Рис. 6

Испытуемые образцы, тип В и тип С

Размеры, мм	Образец типа В		Образец типа С
	$d_s \leq 160$	$d_s > 160$	
Общая длина A , не менее	180	180	250
Ширина головки B	60 ± 3	80 ± 3	100 ± 3
Длина рабочей части C	—	—	25 ± 1
Ширина рабочей части D	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
Радиус E	$5 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	25 ± 1
Начальная длина между зажимами G	90 ± 5	90 ± 5	165 ± 5
Толщина H	Полная толщина стенки		
Диаметр отверстий для штифтов I	20 ± 5	20 ± 5	30 ± 5

Таблица 3

Размеры испытываемых образцов типа В и С

Для испытаний согласно DVS 2203-2, контрольный образец имел форму 3 (рис. 7, табл. 4). Испытания на разрыв проводили со скоростью растяжения 50 мм/мин. Часть образцов были ослаблены в месте сварного шва отверстием диаметром 4 мм.

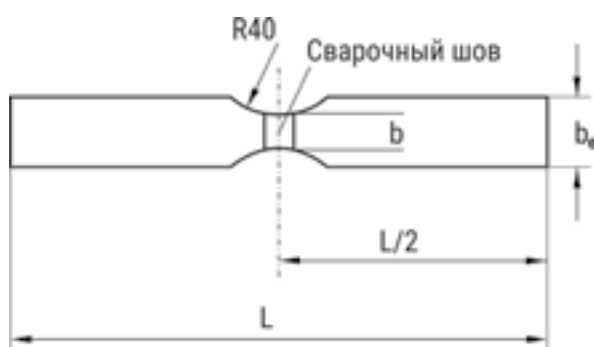


Рис. 7 Контрольный образец, форма 3

Таблица 4 Размеры контрольных образцов формы 3 для труб

Диаметр d (номинальный размер трубы), мм	L , мм	b , мм	$b = b_n / 2$, мм
20	160	10	5
25–63	160	12	6
75–110	160	14	7
125–160	180	16	8
200	180	18	9
225–250	180	20	10
280–315	180	22	11
355	180	24	12
400	180	26	13
450	180	28	14

Примечание. В отличие от исходных норм, испытания проводились также для труб диаметром до 1600 мм.

Из каждого образца сварного соединения труб больших диаметров вырезали по 12 образцов-лопаток, по 4 для каждого вида испытаний. Из труб малых диаметров вырезали максимально возможное число образцов трех типов.

Статистическая обработка результатов

На данном этапе, на основании априорной информации и предварительного анализа экспериментальных данных, была принята гипотеза о линейной зависимости упруго-деформационных показателей от толщины стенки трубы. Предполагалось получить стохастические модели зависимости предела текучести и относительной деформации при разрыве от толщины стенки трубы.

Затем можно было анализировать отклонения упруго-деформационных показателей, обусловленных качественными факторами, от данных, нормированных по толщине стенки.

Доверительные интервалы были рассчитаны для доверительных вероятностей $p = 0,99, 0,95, 0,9, 0,85$ и $0,8$. В результате совместного анализа данных было принято решение выбрать $p = 0,95$, как это обычно делается в практике обработки данных технических экспериментов.

Испытания по ГОСТ 11262-80

На рис. 8 изображены результаты испытаний с учетом некоторых принципов ГОСТ 11262-80 (в части формы образцов и испытательных машин) и расчетов уравнения линейной регрессии, доверительных интервалов уравнения и всего массива значений предела текучести (σ МПа). Количество сварных соединений $n = 40$.

Уравнение линии регрессии:

$$y = 0,056 x + 23,2; R^2 = 0,68 \quad (1)$$

Уравнение границ доверительной области линии регрессии

$$y = 0,056 x + 23,2 \pm (-0,627 + 0,014 x - 2,2 \cdot 10^{-4} x^2)$$

Уравнение границ доверительной области значений предела текучести

$$y = 0,056 x + 23,2 \pm (-2,03 + 0,002 x - 3,9 \cdot 10^{-5} x^2)$$

Мелкими кружками изображены данные ЦТД Мосводоканала, не использованные в расчетах. В расчетах также не учтены результа-

ты образцов разрушившихся по хрупкому механизму. Бесцветные точки относятся к трубам из неизвестного полиэтилена. Точки, помеченные крестами, относятся к зимнему циклу сварки. Марки сварочных машин особым образом не учтены при маркировке точек.

Черные кружки относятся к трубам, изготовленным из сырья производства завода ПНД «Казаньоргсинтез», голубые – ПНД «Нижекамскнефтехим», зеленые квадраты – из ПЭ производства Sabic. Пустые кружки – материал неизвестного происхождения.

Мелкими кружками изображены данные ЦТД Мосводоканала. Эти данные не были использованы в расчетах, поскольку были получены при особой процедуре испытаний, не предусматривающей разрушение.

Зависимость относительного удлинения при разрыве ϵ от толщины стенки трубы S изображена на рис. 9.

Количество сварных соединений – 41.

Уравнение линии регрессии:

$$y = -4,34x + 420; R^2 = 0,78 \quad (2)$$

Уравнение границ доверительной области линии регрессии:

$$y = -4,34x + 420 \pm (-46,0 + 0,988x - 1,6 \cdot 10^{-2}x^2).$$

Уравнение границ доверительной области значений относительного удлинения:

$$y = -4,34x + 420 \pm (-160 + 0,187x - 3,1 \cdot 10^{-3}x^2).$$

Результаты расчетов дали удовлетворительную нормировку ϵ от толщины стенки S . Относительное удлинение при разрыве, определенное по ГОСТ 11262-80, закономерно снижается с ростом толщины стенки, что следует учитывать при оценке результатов испытаний сварных соединений.

Испытания по ГОСТ 52779

Зависимость упругих свойств (предел текучести) от толщины стенки для 34 исследованных образцов сварных соединений может быть аппроксимирована линейной функцией с низким коэффициентом корреляции:

Уравнение линии регрессии:

$$y = 0,032x + 22,0; R^2 = 0,14 \quad (3)$$

Уравнение границ доверительной области линии регрессии:

$$y = 0,032x + 22,0 \pm (-1,50 + 0,032x - 4,8 \cdot 10^{-4}x^2).$$

Уравнение границ доверительной области значений предела текучести:

$$y = 0,032x + 22,0 \pm (-4,33 + 0,006x - 9,2 \cdot 10^{-5}x^2).$$

В связи с отсутствием рабочей зоны у образца типа В и весьма короткой рабочей зоной образца типа С, деформационные свойства соединений при испытании на растяжение по ГОСТ 52779 нет смысла нормировать по толщине стенки.

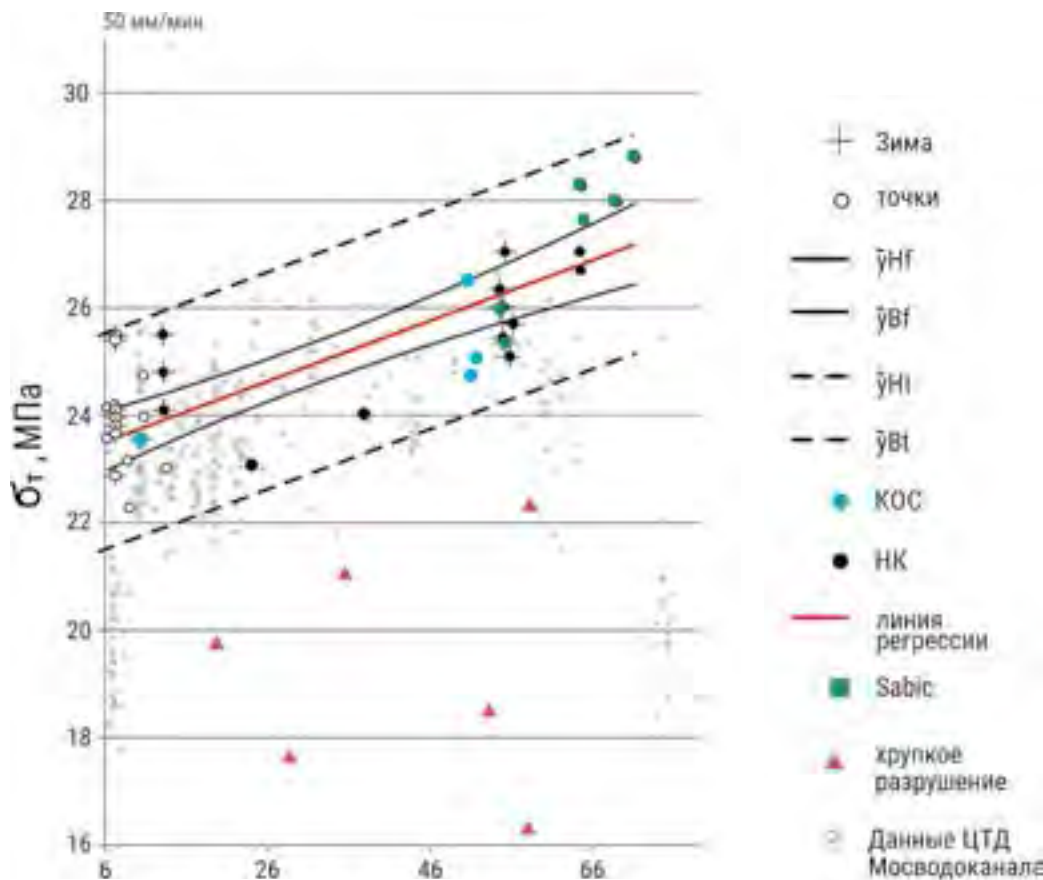


Рис. 8

Результаты регрессионного анализа зависимости предела текучести σ от толщины стенки S (скорость растяжения 50 мм/мин.)

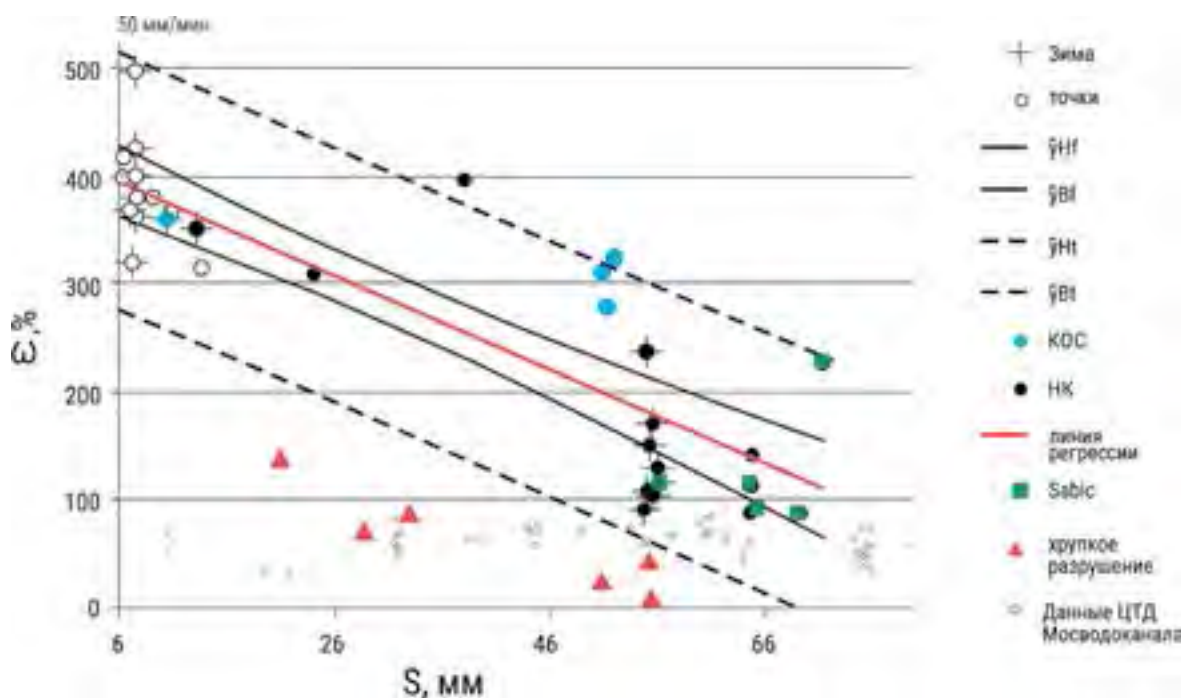


Рис. 9

Результаты регрессионного анализа зависимости относительного удлинения при разрыве ε от толщины стенки S (скорость растяжения 50 мм/мин.)

Таким образом, процедура испытаний по ГОСТ 52779 дает наименее достоверные количественные данные о качестве сварки.

Испытания по DVS 2203

Примечание: Ограничения DVS по толщине стенки (30 мм) не учитывались.

Испытания образцов без отверстий.

Количество опытов – 34.

Уравнение линии регрессии для предела текучести:

$$y = 0,053x + 25,1; R^2 = 0,36 \quad (5)$$

Уравнение границ доверительной области линии регрессии:

$$y = 0,053x + 25,1 \pm (-1,38 + 0,029x - 4,4 \cdot 10^{-4}x^2).$$

Уравнение границ доверительной области значений предела текучести:

$$y = 0,053x + 25,1 \pm (-3,96 + 0,006x - 8,4 \cdot 10^{-5}x^2).$$

Результаты расчетов показали удовлетворительную нормировку предела текучести σ от толщины стенки S .

Предел текучести, определённый по DVS 2203, закономерно увеличивается с ростом толщины стенки, что следует учитывать при оценке результатов испытаний сварных соединений. Темп прироста достаточно высок и приближается к этому показателю для испытаний по ГОСТ 11262-80.

Процедура испытаний образцов с отверстиями, вероятно, наиболее жесткая и позволяет выявить наибольшее количество несплавлений в сварных соединениях, но она дает сравнительно большой разброс количественных оценок упруго-деформационных показателей сварных соединений.

Таким образом, наиболее информативные количественные результаты дают испытания образцов по процедуре, использующей принципы ГОСТ 11262-80; при этом следует ориентироваться на отклонение результатов от доверительных интервалов (рис 8, 9).

Заниженные величины пределов текучести и относительного удлинения при разрыве характерны для образцов, демонстрирующих хрупкое разрушение. Если качественная оценка характера разрушения вызывает сомнения, то следует принять во внимание количественные результаты испытаний.

Литература

1. Волков И.В., Кимельблат В.И. Проблемы нормативно-технической документации на контактную сварку полимерных труб встык. – Сварка и диагностика №1 2011, с. 58–61.
2. 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. Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2010. № 10, с. 600–602.
3. 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).
4. ГОСТ Р 55276-2012 (ISO 21307:2011) Национальный стандарт Российской Федерации. Трубы и фитинги пластмассовые. Процедуры сварки нагретым инструментом встык полиэтиленовых (ПЭ) труб и фитингов, используемых для строительства газо- и водопроводных распределительных систем.