



ОПТИМИЗАЦИЯ

ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ВСТЫК.

УЧЕТ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ

В.И. Кимельблат, д.т.н., профессор. И.В. Волков, к.т.н., доцент. В.В. Глухов

Монтажно-эксплуатационные характеристики полимерных труб превосходят показатели традиционных труб в основных сферах применения. Мировая практика и отечественный опыт подтверждают высокую надежность и долговечность полимерных трубопроводов. Остановить или даже затормозить процесс вытеснения традиционных труб полимерными, как мы полагаем, уже невозможно. При этом следует отметить ряд проблем и задач, которые необходимо решать для повышения эффективности применения полимерных труб. Наш опыт трех десятилетий анализа причин аварий полимерных трубопроводов показал: наиболее частой и основной причиной аварий полимерных трубопроводов являются грубые нарушения технологии контактной сварки нагретым инструментом, обусловленные «человеческим фактором».

Вместе с тем разрушения сварных соединений часто происходят тогда, когда суммируются эффекты нескольких факторов, прямо не зависящих от сварщиков. В число причин аварий полимерных трубопроводов входят неоптимальные характеристики полимеров и недопустимые сочетания материалов и раз-

меров свариваемых деталей. Почему оптимизация технологии сварки полимерных труб с учетом свойств полимеров часто является проблемой?

Сварка полимерных труб является завершающей стадией переработки полимера, но выполняется обычно в сложных условиях строительства. Руководят сварочно-монтажными работами не переработчики пластмасс, а инженеры строительных специальностей.

Часто можно услышать от практиков: «Я строю безнапорный или низконапорный трубопровод, поэтому качество материала меня не интересует». Между тем, сварные соединения разрушаются обычно не от внутреннего давления, а от температурного сжатия трубопровода, причем вероятность аварии в значительной степени определяется свойствами материала.

Опасные напряжения и их моделирование

Давление P среды, транспортируемой по трубопроводу, создает в стенке трубы тангенциальное напряжение σ_{φ} , которое в инженерной практике часто определяют по формуле Надаи:

$$\sigma_{\varphi} = P (dn - e) / 2e$$

где: dn – наружный диаметр, а e – толщина стенки.

Осевое напряжение σ_z , вызывающее разрушение стыковых соединений, при аналогичных приближениях рассчитывают по формуле:

$$\sigma_z = P (dn - e) / 4e.$$

Таким образом, труба с заглушенным торцом испытывает тангенциальные напряжения вдвое большие, чем осевые. Следовательно, напряжения, обусловленные внутренним давлением, менее актуальны для сварных соединений встык, чем для трубы. Эти соображения естественным образом подтверждаются практическими наблюдениями о разрушении трубопроводов под действием нескомпенсированных температурных деформаций.

Соответственно, испытания внутренним гидростатическим давлением, необходимые для оценки материала труб, неактуальны для сварных соединений. В тех случаях, когда нужно оценивать роль характеристик материала в формировании показателей надежности и долговечности сварных соединений, их следует заменять на осевое растяжение образцов со швом посередине, вырезанных из труб вдоль их оси. Подобные испытания рекомендованы как в зарубежных нормах, так и в российских НТД, правда, в качестве дополнительных.

Характер разрушения сварных соединений

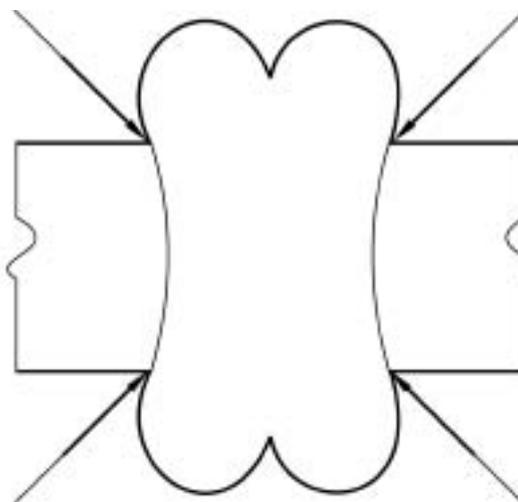
При кратковременных испытаниях на разрывных машинах, при комнатной температуре, однородные (т.е. сваренные из одного материала) сварные швы разрушаются всегда по основному материалу, с образованием шейки, по механизму вынужденной эластичности. В практике контроля качества соединений такое разрушение называют пластическим. Разрушения хрупкого характера в плоскости сварки при кратковременных испытаниях свидетельствуют о грубых нарушениях технологии сварки. Результаты кратковременных испытаний не характеризуют материал с позиции свариваемости и не позволяют прогнозировать эксплуатационную надежность сварных соединений.

Напротив, длительные испытания сварных соединений в режиме, обеспечивающем квазихрупкое растрескивание, позволяют оценить долговечность сварных соединений в процессе эксплуатации. Здесь уместно напомнить, что наблюдаемые в практике эксплуатации разрушения сварных швов тоже носят хрупкий характер.

Хрупкое разрушение качественных соединений при длительных испытаниях (а также при эксплуатации) не затрагивает плоскость сварки, а происходит в форме роста подгратовых трещин (рис. 1). Зародыши подгратовых трещин неизбежно образуются в области гра-

ницы проплавления полимера при сварке [1] вследствие параболичности формы границы расплава.

Рис. 1. Расположение подгратовых трещин



Влияние свойств полиолефинов на качество сварных соединений

Логично полагать, что долговечность однородных сварных соединений в условиях длительного нагружения будет, подобно долговечности труб, зависеть от молекулярной, макромолекулярной и надмолекулярной структуры материала.

Эти соображения получили надежное экспериментальное подтверждение [2].

Для партий полиэтилена, модифицированного пропенном, получена корреляция долговечности сварных соединений t_c с показателем текучести расплава ПТР₅ и напряжением σ :

$$\lg t_c = 5,41 - 1,32\text{ПТР}_5 - 2,57\sigma, \pm \lg t_c = 0,247$$

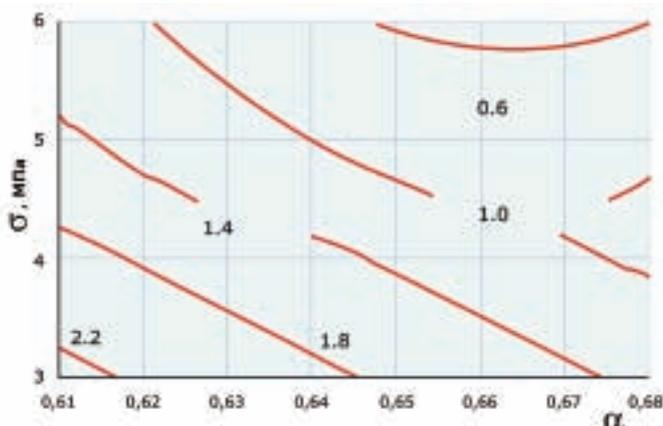
с коэффициентом корреляции $R = 0,967$, что позволяет говорить о влиянии молекулярной массы ПНД с пропиленом на долговечность сварных соединений.

В области хрупкого разрушения долговечность t_c качественных сварных соединений полиэтилена низкого давления трубных марок, модифицированного бутеном, при заданном напряжении зависит от концентрации бутена, оцениваемой по степени кристалличности (рис. 2). В исследованной нами области варьирования плотности (от 961 до 951 кг/см³) t_c возрастала примерно на порядок, что представляет большой практический интерес.

Увеличение размеров короткоцепных ветвлений, образованных сомономерами этилена в ряду пропен – бутен – гексен, действует на долговечность сварных соединений аналогично увеличению концентрации бутена [2].

Приведенные результаты хорошо объясняются в рамках представлений о роли проходных цепей между кристаллами в формировании показателей длительной прочности полиэтиленов [3].

Рис. 2. Зависимость долговечности сварных соединений $Ig \tau_c$ (линии равного уровня) от степени кристалличности полиэтилена α и осевого напряжения σ



Сварка гетерогенных соединений

В этом разделе авторы не рассматривают заведомо неверные случаи сварки разных классов полимеров, типа проектного решения: «варить полиэтиленовые трубы винипластовым прутком», поскольку последние 25 лет подобные нонсенсы встречаются очень редко. Случаи сварки ПВД и ПНД тоже не часты, поскольку ПВД практически исчез с трубного рынка. Однако попытки варить трубы из ПНД разных градаций (MRS) происходят постоянно.

Последние 30 лет наблюдалось стремительное развитие трубных марок полиолефинов. Наряду с новыми марками гомополимеров полипропилена на строительном рынке появились блок- и статистические сополимеры пропилен с этиленом трубного назначения. Эволюция трубных марок полиэтилена: ПЭ 32, ПЭ 50 → ПЭ 63 → ПЭ 80 → ПЭ 100, PE RT → ... — вызывает законное восхищение специалистов, знакомых с этими достижениями, но не вполне понятна практикам строительства. Полиэтилены разных градаций существенно отличаются по мономерному составу, макромолекулярной, надмолекулярной структурам и свойствам. Однако они часто, и ошибочно, воспринимаются строителями, как подобные и равноценные.

В начале 1980-х годов, испытывая дефицит бутена и с благословения химиков, в течение нескольких лет в качестве трубной марки выпускался сополимер этилена с пропенем. Следует отметить, что сомономер пропен, в отличие от бутена и гексена, способен входить в кристаллическую решетку полиэтилена и поэтому менее эффективен в качестве модификатора надмолекулярной структуры сополимера.

Статистический анализ длительной прочности труб с пропиленом показал, что при норме показателя текучести расплава $ПТР_5 = 0,3 \div 0,5$ г/10 мин. необходимый уровень длительной хрупкой прочности имеют только те полимеры, которые обладали относительно высокой молекулярной массой, характеризующейся $ПТР_5 < 0,4$ [3].

Тем не менее, из сополимера этилена с пропенем, имеющего заниженный уровень показателей длительной прочности, экструдированы сотни тысяч тонн труб диаметром от 20 до 1200 мм. Старые трубы до сих пор эксплуатируются и могут свариваться с современными трубами в порядке ремонта и перекладки трубопроводов. Таким образом, в зажимах сварочной машины могут оказаться трубы из разных материалов! Долговечность сварных соединений разных градаций и марок полиэтиленов может различаться в десятки раз.

Долговечность гетерогенных сварных соединений определяется долговечностью материала сварного шва, имеющего меньшую стойкость к растрескиванию. Разрушение таких образцов происходит по подгратовой области со стороны наименее долговечного ПНД [2].

Как известно, многие нормы позволяют сваривать разные полиэтилены близкой природы, если они входят в одну группу по вязкости расплава, оцениваемой по величине показателя текучести расплава. Однако задача оптимизации сварки гетерогенных соединений (из полимеров близкой химической структуры, но отличающихся по показателям длительной прочности), часто не имеет простых решений. Наиболее часто на практике производится недопустимая сварка разнотолщинных деталей (с одинаковым MOP) из материалов разных градаций. Применение вставок с фасками из полиэтиленов высоких градаций затрудняется отсутствием труб с нужной толщиной стенки. Дополнительные разъёмные соединения не предусматриваются проектами. В результате принимаются некорректные решения, которые находят некоторые сомнительные извинения в том, что авторы решений «не ведают, что творят».

Роль стабилизирующей системы

Роль антиоксидантов в составе свариваемых композиций особенно важна, поскольку доступ кислорода в разогретую зону сварки облегчен, а резервы стабилизирующих систем в значительной мере исчерпываются на предшествующих стадиях переработки. В условиях дефицита антиоксидантов интенсифицируются процессы термоокислительной деструкции полиолефинов, причем ПНД демонстрируют склонность к сшивке [5]. Сшитые структуры ухудшают свариваемость и ускоряют растрескивание ПНД под напряжением. Визуально сшивку при сварке можно обнаружить по неровной, бугристой поверхности грата. Плохо стабилизированные материалы демонстрируют заниженную долговечность сварных соединений [2].

Здесь уместно напомнить, что некоторые производители труб не используют компаундированные марки ПНД. Сажевые концентраты вводят в базовые марки непосредственно при экструзии труб или литье фитингов. О необходимости стабилизации материалов при этом просто забывают. Контроль материала

труб и фитингов по показателям термостабильности, таким образом, превращается в важный элемент технологии сварки.

Применение методов контроля материалов свариваемых изделий

Авторы полагают, что в настоящей статье приведены достаточно убедительные доводы в пользу актуальности контроля характеристик свариваемых полимеров с целью прогнозирования надежности и долговечности сварных соединений.

Разумеется, нецелесообразно расширять процедуру рутинного входного контроля труб и фитингов в строительных фирмах.

Контроль материалов вполне естественно включить в процедуры различных видов аттестации технологий сварки, производственных испытаний при освоении технологии сварки полимеров, при разработке специальных технологий сварки и оптимизации параметров сварки, например, в неблагоприятных условиях, а также при анализе причин аварий.

Часть методов контроля стандартизованы и применяются при производстве полимеров и их переработке. Это, в частности, определение плотности, показателя текучести расплава, термостабильности, распределения наполнителей. Подготовленным специалистам по сварке в ряде случаев достаточно ознакомиться с показателями полимерного сырья. Другие показатели может предоставить производитель труб и фитингов. Однако некоторые измерения необходимо выполнить специально.

Предусмотренное нормами, но не реализованное в широкой производственной практике определение долговечности сварных соединений при растяжении можно рекомендовать как заводам, так и строительным фирмам.

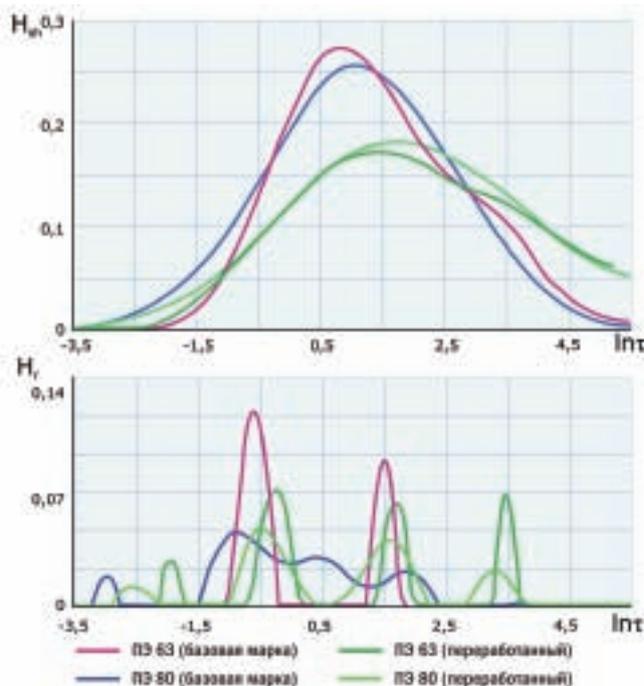
В своих исследованиях в области сварки авторы используют также специально разработанные высокоточные реологические и релаксационные (РДР – релаксация давления расплава) методы контроля макромолекулярных характеристик полимеров [5–7].

Возможности метода РДР иллюстрируют рисунки 3, 4 и 6.

Для расчета спектров H из данных по релаксации давления используются два взаимодополняющих метода. Применение двух методик расчета спектра РДР позволяет получить наиболее полные представления о релаксационных процессах в расплавах исследуемых образцов. Причем в результате расчетов методом регуляризации получаются спектры H_r с высоким разрешением, а аппроксимационные спектры H_{sh} служат для проверки валидности пиков, которые могут иметь расчетное происхождение.

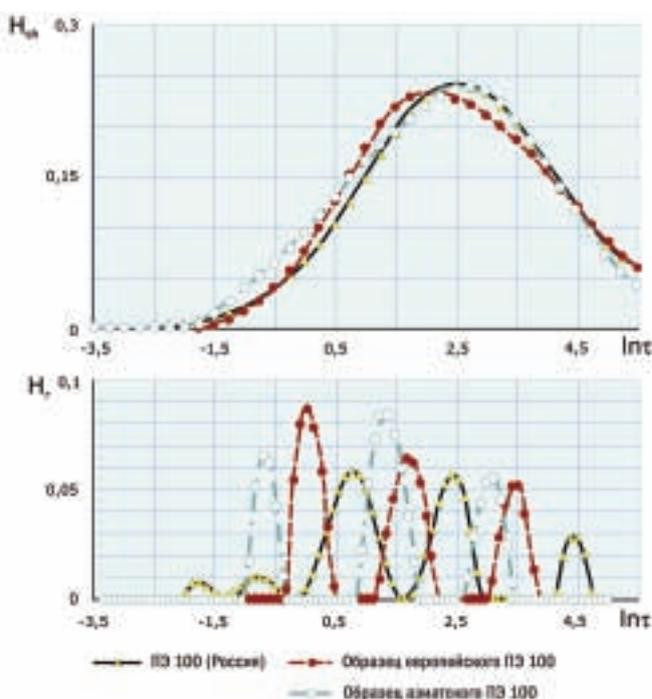
Различия в изменении макромолекулярной структуры при переработке ПЭ 63 и ПЭ 80 хорошо отражаются в изменениях спектров РДР, показанных на рис. 3 [6].

Рис. 3. Изменения спектров времён релаксации давления ПЭ 63 и ПЭ 80 в результате термомеханодеструкции.



а – спектры, рассчитанные по аппроксимационной методике (по формуле Шварцеля–Ставермена); б – спектры, рассчитанные по регуляризационной методике.

Рис. 4. Спектры времён релаксации давления ПЭ 100 различных производителей



а – спектры, рассчитанные по аппроксимационной методике (по формуле Шварцеля–Ставермена); б – спектры, рассчитанные по регуляризационной методике.

На рис. 4 показано, что анализируемая партия ПЭ 100 российского производства имеет высокомолекулярную фракцию, о чем свидетельствует пик в области $\ln \tau = 4,5$. Этот пик отсутствует у полиэтиленов других производителей и может быть отнесен к сшитым структурам – дефектам микроструктуры. Наличие такого рода микродефектов приводит к увеличению высокоэластичности расплава (снижению пластичности).

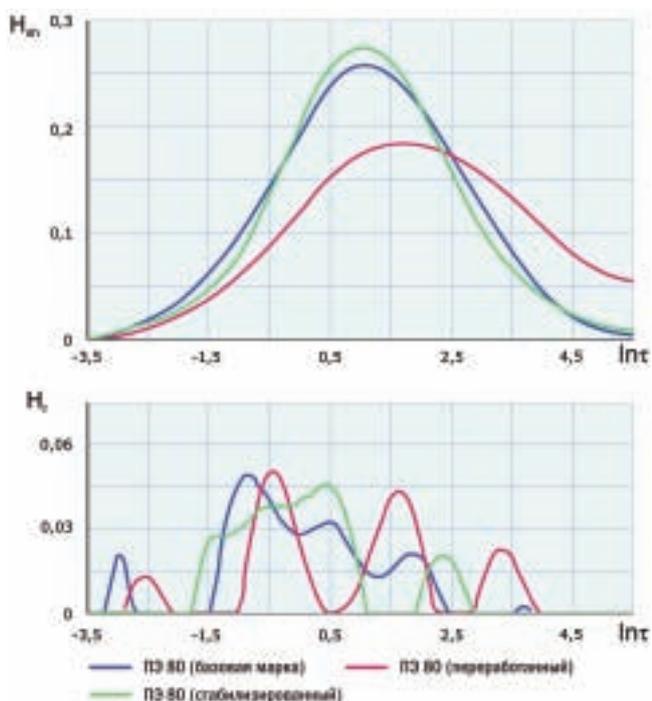
В результате при обычных параметрах сварки формируется высокий и узкий грат, внешний вид которого (рис. 5) является браковочным признаком. Устранить этот дефект удастся использованием специальной технологии сварки с параметрами, отличающимися от нормативных.

Рис. 5. Дефектное сварное соединение



Роль стабилизирующих систем в сохранении исходной структуры полимера при переработке хорошо отражена на рис. 6. В отсутствие стабилизаторов появляются нежелательные сшитые структуры, присутствие которых отражает пик при $\ln \tau = 3$ на спектре H_r .

Рис. 6. Влияние стабилизирующих систем на изменение спектров времен релаксации давления ПЭ 80 в процессе термомеханодеструкции [6].



а – спектры, рассчитанные по аппроксимационной методике (по формуле Шварцеля–Ставермена); б – спектры, рассчитанные по регуляризационной методике.

Учебно-методический аспект проблемы

Использовать характеристики полимеров в практике прогнозирования надежности сварных соединений смогут специалисты по технологии сварки, получившие надлежащую профессиональную подготовку.

При этом явно недостаточно сообщить сварщикам тривиальные положения физико-химии и материаловедения о том, что различные по природе полимеры обычно несовместимы и поэтому не свариваются.

Как мы отмечали выше, эти сведения не актуальны для практики анализа свариваемости полиолефиновых труб и фитингов, хотя бы потому, что их качественно сваренные соединения прочнее основного материала и разрушаются не в плоскости сварки, а по подгратовым трещинам. Поэтому оптимизация технологии сварки должна базироваться на научно обоснованных представлениях о роли строения макромолекул, макромолекулярных и надмолекулярных структур в формировании показателей надежности сварных соединений.

Практическое применение изложенных в данной работе соображений, по нашему мнению, позволит осуществить дальнейшее повышение эффективности применения полимерных труб.

Авторы благодарят профессора Комарова Г.В. и инженера Прокопьева Н.В. за полезные дискуссии, которые, в определенной мере, побудили к написанию этой статьи.

Литература

- Каган Д.Ф. Трубопроводы из пластмасс. – М: Химия, 1980.
- Кимельблат В.И., Черезов С.В., Юденков И.М., Лялина Н.А. Влияние свойств полиэтилена низкого давления на долговечность сварных соединений // Механика композитных материалов, 1996, №6.
- Будтов В.П. Моделирование роли переходных цепей в частично-кристаллических полимерах // Высокомолекулярные соединения, 1981, Сер. А, т. 23, №1.
- Черезов С.В., Серебренникова Т.А., Кимельблат В.И., Юденков И.М. Влияние качества сырья на эксплуатационные свойства ПЭ труб // Пластические массы, 1988, №2.
- Кимельблат В.И., Волков И.В., Тунгусков О.Ю., Соколов С.Ю. Традиции и инновации в производстве полимерных труб. Казань: ОАО «Набережночелнинская типография», 2007.
- Богомолов И.В., Глухов В.В., Кимельблат В.И. Оценка эффективности стабилизирующих систем ПЭ 80 методом релаксации давления расплава // Структура и динамика молекулярных систем: Сборник статей (ч. 1) на XIII Всероссийской конференции «Яльчик – 2006». Уфа – Казань – Москва – Йошкар-Ола, 2006.
- Кимельблат В.И., Дорогиницкий М.М., Валеев И.Н., Волков И.В., Вольфсон С.И. Расчет спектров релаксации давления в расплавах с применением метода регуляризации // Структура и динамика молекулярных систем: Сборник статей. Вып. 10, ч.1. Казань, 2003.