

Г. Прунк, исполнительный директор компании SIKORA AG

# ПОДВОДНЫЕ И СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ КАБЕЛИ ТРЕБУЮТ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ СШИВАЕМОГО ПОЛИЭТИЛЕНА



**Аннотация.** В статье представлено краткое описание причин, по которым для изготовления изоляции подводных и сверхвысоковольтных кабелей требуется сшиваемый полиэтилен только высокой степени чистоты. Кроме того, в статье описаны технологические решения, обеспечивающие чистоту гранул сшиваемого полиэтилена на различных технологических операциях.

**Ключевые слова:** сшиваемый полиэтилен, подводные кабели, сверхвысоковольтные кабели, экструзионная линия, контроль температуры расплава, контроль чистоты расплава, контроль чистоты гранул.

**Abstract.** This paper outlines the reason for the need of a high purity degree of XLPE material to be used for the insulation of subsea and EHV cables. Furthermore, there will be technological solutions introduced for purity assurance of XLPE pellets that are integrated at specific production stages.

**Key words:** XLPE compound, subsea cables, EHV cables, extrusion line, the control of melt temperature, melt purity control, purity control pellets.

Материал поступил в редакцию 10.08.2015  
E-mail: sales@sikora.net

## НЕОБХОДИМОСТЬ В ЧИСТОМ СШИВАЕМОМ ПОЛИЭТИЛЕНОВОМ КОМПАУНДЕ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ И СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Чистота сшиваемого полиэтиленового компаунда, применяемого для изготовления изоляции подводных и сверхвысоковольтных кабелей, имеет критическое значение. Чем выше чистота компаунда (рис. 1), тем ниже риск разрушения изоляции.

Включения размером всего 50 мкм уже могут привести к повреждениям конечного продукта, что впоследствии приведет к высоким затратам. Например, ремонт дефектного подводного кабеля, повреждение которого произошло из-за присутствия включений, может привести к неделе простоя. Помимо того, что сшиваемый полиэтиленовый компаунд с включениями приводит к появлению дефектов и последующему разрушению изоляции, он также наносит ущерб предприятию уже на этапе производства: на заводе сверхвысоковольтные кабели проходят испытание напряжением, равным 2,5 от номинального. В ходе этого испытания выявляется примерно 5–6 пробоев в год (рис. 2). Ущерб, наносимый данными пробоями, еще даже до того, как кабель будет доставлен в пункт назначения, составляет минимум 30 000 Евро. Пробои приводят к потере драгоценного времени и срыву сроков поставки кабеля. Кроме того, иногда приходится поставлять длины, состоящие из

нескольких соединенных отрезков, что не было оговорено контрактом, и, как следствие, это негативно сказывается на имидже компании и может привести к выплате штрафов, предусмотренных договором. Например, именно по этой причине китайский стандарт на высоковольтные кабели требует, чтобы использованные материалы\* не содержали включений размером более 75 мкм. Более того, существуют рекомендации Ассоциации эдисоновских осветительных компаний (AEIC), которые гласят, что кабели должны быть разработаны таким образом, чтобы срок их использования составлял, по меньшей мере, 40 лет. Соответственно, перед

тем, как материал будет использован для изготовления конечного продукта, необходимо проводить контроль, обеспечивающий его стопроцентную чистоту. Испытание выборочных образцов не является достаточным для надежного выявления и изъятия включений.

Сегодня производители кабелей используют сетки для того, чтобы отсеять включения из состава расплава сшиваемого полиэтилена перед тем, как они попадут в кабель. Сетки располагаются непосредственно по ходу течения расплава за экструдером перед головкой. Однако спустя некоторое время после начала эксплуатации сетки могут быть засорены нагаром или загрязнены. Это приведет к тому, что давление расплава значительно

увеличится. В итоге придется останавливать производство для замены сетки, что в свою очередь приведет к тому, что на данном участке кабеля понадобится делать соединение



Рис. 1. Высококачественный компаунд для изоляции

\* Китайский стандарт МЭК 62067 (для кабелей на 150–500 кВ) применяется: J. Kjellqvist, K.P. Pang, S. Miao, Dow Europe GmbH, Horgen, Швейцария, Dow Chemical (China) Co. Ltd., в технических требованиях Шанхая, Китая для обеспечения надежной работы высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей. Международная конференция Китая по распределению электроэнергии (CICED 2010), Нанкин (20–23 сентября 2010).

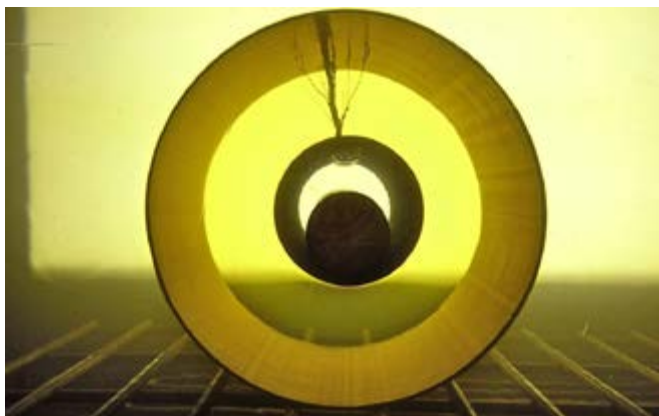


Рис. 2. Пробой изоляции сверхвысоковольтного кабеля (разрез)

двух отрезков. Соединение отрезков производится вручную, и его качество имеет критическое значение, в особенности для подводных кабелей, расположенных на береговой линии. По этой причине производители кабелей стремятся поставлять большие длины с минимальным числом соединений, поскольку они несут потенциальный риск разрушения изоляции кабеля. Одним из аспектов получения больших непрерывных длин является использование сырья только высокой степени чистоты. Поскольку использование сеток приводит к снижению производительности линии, необходимо решение, позволяющее отказаться от их применения. Однако это требует надежных методов выявления и отбора загрязнений в сшиваемом полиэтилене на ранних стадиях.

### ПРОИЗВОДСТВО ПОДВОДНЫХ И СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Подводные и сверхвысоковольтные кабели изготавливаются на наклонных линиях непрерывной вулканизации (CCV) или вертикальных линиях непрерывной вулканизации (VCV). Подобные виды кабелей, как правило, состоят из проводника, внутреннего полупроводящего слоя, изоляции и внешнего полупроводящего слоя. Внутренний и внешний полупроводящие слои, а также изоляция, как правило, изготавливаются из сшиваемого полиэтилена, поскольку этот материал обладает отличными диэлектрическими свойствами, что делает его пригодным для сверхвысоковольтных кабелей на напряжение до 500 кВ переменного тока и 750 кВ постоянного тока. Для того, чтобы достичь высочайшего уровня чистоты сшиваемого полиэтилена, необходимо непрерывно производить измерение и контроль определенных характеристик материала до и во время производственного процесса. Можно сказать, что для подводных и сверхвысоковольтных кабелей требуется беспрецедентная степень чистоты сшиваемого полиэтилена.

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЧИСТОТЫ СШИВАЕМОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА УЧАСТКЕ МЕЖДУ ЭКСТРУДЕРОМ И ГОЛОВКОЙ

Однородность и чистота расплава сшиваемого полиэтилена имеют ключевое значение для качества кабеля. Существуют технологии, применяемые во время процесса экструзии, обеспечивающие необходимые характеристики материала. Устройства, используемые в данных технологиях, устанавливаются между экструдером и головкой.

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА

Температура полиэтилена, при которой производится наложение изоляции подводных и сверхвысоковольтных кабелей, является важным критерием для получения оптимального расплава и, как следствие, максимальной производительности экструдера. Правильно подобранная температура обеспечивает однородность расплава, не позволяет произойти преждевременной сшивке материала, и таким образом обеспечивает отсутствие включений в материале изоляции. Более того, система измерения температуры должна иметь возможность выявлять неоднородность расплава.

Существуют традиционные методы, применяемые для измерения температуры расплава, такие как термопарные датчики. Однако чаще всего для измерения температуры расплава на участке после головки, до момента запуска экструзионной линии, применяются более простые ручные измерители. Данные технологии не дают надежных результатов измерения, поскольку представляют собой контактное измерение, которое имеет относительно длинный период отклика. Более того, такие виды измерений могут оказать влияние на степень текучести расплава, что, в свою очередь, может повлиять на сшиваемость. Существует технология бесконтактного измерения с сокращенным периодом отклика с помощью инфракрасного пирометра. Однако данная технология позволяет измерять преимущественно только температуру на поверхности расплава, поскольку глубина проникновения инфракрасного излучения в полиэтилен высокой плотности составляет всего несколько миллиметров. Кроме того, наличие особых наполнителей в расплаве полиэтилена может существенно снизить глубину проникновения излучения.

Альтернативой данным традиционным методам измерения температуры расплава является бесконтактная система, основанная на неразрушающей ультразвуковой технологии (рис. 3). Данная технология обеспечивает точное измерение температуры расплава во время производственного процесса и не влияет на свойства текучести расплава. Более того, эта система измеряет среднюю температуру расплава, а не температуру в центре потока. Измерительная головка системы, включая ультразвуковые датчики, располагается непосредственно в канале, по которому происходит течение расплава между экструдером и головкой. В отличие от вышеуказанных методов, ультразвуковые датчики не оказывают влияния на текучесть расплава полиэтилена, поскольку расположены вне канала течения расплава. Вследствие этого датчики не оказывают влияния на процесс экструзии, даже если датчики необходимо заменить. Очень высокая частота измерений обеспечивает малое время отклика, а также регистрацию малых отклонений температуры. Только при использовании ультразвуковой системы

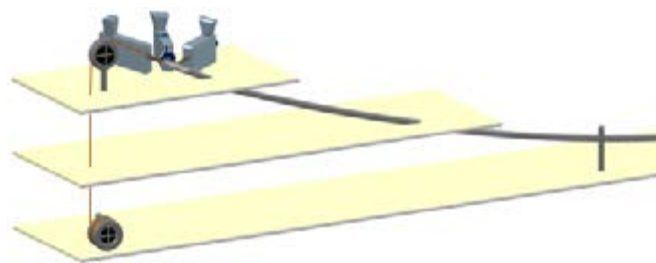


Рис. 3. Измерение температуры расплава на наклонной экструзионной линии

устраняются дефекты неравномерного нагрева расплава. Это обеспечивает однородность вязкости расплава в процессе экструзии и помогает избежать преждевременного сшивания после прохождения сетки, что может привести к образованию гелеобразных частиц и микрочастиц как продуктов воздействия высокой температуры в полиэтилене.

### ПРОВЕРКА ЧИСТОТЫ РАСПЛАВА

Помимо измерения температуры расплава необходимо проверять чистоту сшиваемого полиэтилена в канале прохождения расплава непосредственно перед головкой, поскольку значительная часть загрязнений попадает в материал после очистки шнека экструдера или за счет абразивного износа. С целью выявления загрязнений в материале изоляции высокоскоростная система на основе комбинации рентгеновской и оптической камеры просвечивает изоляционный материал и информирует о наличии подобных загрязнений, а также гелеобразных частиц и продуктов воздействия высокой температуры (рис. 4). Таким образом, производители могут иметь достаточную информацию по всему процессу: от включения экструдера до начала производства.



Рис. 4. Измерение чистоты расплава на наклонной линии

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЧИСТОТЫ СШИВАЕМОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ЭТАПЕ ДО ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА: ПРОВЕРКА И ХРАНЕНИЕ

Две вышеописанные технологии позволяют обеспечить однородность и чистоту расплава сшиваемого полиэтилена и выявить загрязнения расплава, образовавшиеся в экструдере. Однако, в дополнение к этому, также важно осуществлять проверку чистоты гранул материала до того, как он подвергнется экструзии.

На сегодняшний день проверка гранул осуществляется системами, предназначенными как для лабораторных исследований, так и для мониторинга в процессе производства. Большинство систем основано на оптической технологии, которая позволяет обнаружить загрязнения на поверхности гранулы, однако не позволяет выявить загрязнения внутри гранул.

Описанная ниже система проверки и сортировки обеспечивает 100 % гарантию качества при мониторинге в процессе производства благодаря применению рентгеновской технологии и оптического оборудования. Выявляемые загрязнения распознаются с помощью программного обеспечения и в автоматическом режиме отделяются. Данная технология обеспечивает выявление загрязнений размером вплоть до 50 мкм.

### РЕНТГЕНОВСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Основной принцип рентгеновской технологии для выявления объектов состоит в различной степени ослабления излучения в различных материалах. Сшиваемый полиэтилен в основном состоит из углерода. Типичным примером загрязнений могут быть стальные частицы, попадающие из экструдера или гранулятора, состоящие преимущественно из железа. Ядро атома железа содержит 26 протонов. Ослабление излучения в ядре, содержащем 26 протонов, значительно выше, чем у углерода, содержащего 6 протонов, что приводит к контрасту между двумя материалами на рентгеновском изображении.

### ОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

В оптическом исследовании важную роль играет освещение. Благодаря использованию специальной методики создания освещения, осуществляется выявление мельчайших загрязнений. С целью обеспечения точной видеорегистрации потока материала на производственных скоростях используются камеры, основанные на новейших технологиях. Для выявления загрязнений при помощи оптической системы используется высокопроизводительное программное обеспечение, аналогичное программному обеспечению, применяемому при рентгеновских исследованиях. Благодаря этому после задания в программном обеспечении определенного предельного значения все загрязненные гранулы, данные по которым, рассчитанные при помощи математического алгоритма, превышают заданное значение, автоматически отсеиваются.

### ТИПИЧНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ВЫЯВЛЯЕМЫЕ ПРИ ПОМОЩИ РЕНТГЕНОВСКОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Комбинация рентгеновской и оптической технологии обеспечивает выявление загрязнений как собственно в грануле, так и на ее поверхности (рис. 5). Рентгеновская система производит исследование как прозрачных, так и окрашенных (например, черных) гранул, а также полупроводящего сшиваемого полиэтилена на предмет наличия включений. Типичные включения, выявляемые при помощи

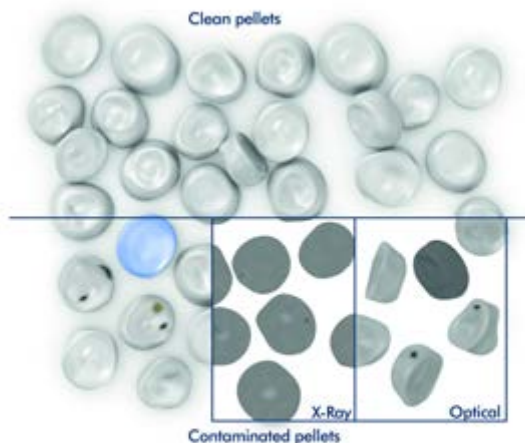


Рис. 5. Исследование при помощи рентгеновской и оптической системы и отбор



рентгеновской технологии – металлические, а также органические загрязнения и неоднородности внутри гранулы. Помимо этого, оптическая система выявляет, например, черные пятна на поверхности гранулы, инородные объекты и инородные гранулы, а также прочие органические и металлические включения.

### СИСТЕМА ПОДАЧИ

Для того, чтобы избежать попадания в материал загрязнений, идущих от системы подачи, транспортировка гранул осуществляется при помощи вибрирующей наклонной панели, изготовленной из нержавеющей стали. Это позволяет избежать попадания загрязнений, которое может происходить при использовании конвейерной ленты. Система транспортировки гранул герметична, что гарантирует отсутствие пыли или других загрязнений в потоке гранул. Кроме того, транспортная система может эксплуатироваться при избыточном давлении. Системы исследования и отбора гранул могут иметь производительность 500, 1000 или 2000 кг/ч и могут быть встроены как в новые, так и в существующие системы подачи.

### ВСТРАИВАНИЕ СИСТЕМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННУЮ ЛИНИЮ

Обычно система устанавливается между бункером (емкостью), в который засыпается сшиваемый полиэтилен и бункером экструдера, куда компаунд подается под действием гравитации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены причины, по которым сшиваемый полиэтилен, применяемый для изоляции подводных

и сверхвысоковольтных кабелей, должен обладать высокой степенью чистоты. Представлен ряд систем контроля качества сшиваемого полиэтилена, с помощью которых производится исследование материала на различных стадиях изготовления кабеля, до и во время переработки полиэтилена. Эти системы могут являться альтернативой или дополнением к технологии с использованием фильтрующих сеток в экструдере.

Во-первых, к их числу относятся технологии измерения температуры расплава и мониторинга текучести расплава в канале, обеспечивающие чистоту обработанного материала на участке между экструдером и головкой. Благодаря этим технологиям загрязнения, источником которых является экструдер, выявляются и отсеиваются.

Во-вторых, это система исследования гранул, применяемые для обеспечения качества как в лабораторных условиях, так и в процессе производства. Такая система выявляет загрязненные гранулы и отделяет их перед тем, как они подвергнутся процессу экструзии. Даже если производители кабеля продолжают использовать в экструдерах сетки, данная технология позволяет избежать засорения включениями, попадающими с загрязненных гранул и, как следствие, обеспечивает большую длительность производственного процесса. Благодаря использованию рентгеновской и оптической технологии выявляются загрязнения внутри и на поверхности гранулы, что обеспечивает 100 % контроль качества.

Подводя итоги, можно сказать, что использование различных технологий для контроля качества сшиваемого полиэтилена на различных этапах производства является очень важным для гарантии качества подводных и сверхвысоковольтных кабелей.

Наряду с этим обеспечение высокой степени чистоты сшиваемого полиэтилена может значительно повысить эффективность линии по производству кабеля. Кроме того, экономятся средства, необходимые для повторного изготовления кабелей, пробившихся при испытании высоким напряжением.

## ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

Стоимость подписки на I полугодие 2016 года (3 номера), в рублях:

- для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1275 руб.,
- для учебных заведений и студентов – 480 руб.,
- для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1380 руб.,
- для подписчиков зарубежных стран – 33 у.е.

НДС не облагается по ст. 145 НК РФ

По вопросам подписки обращайтесь  
к Алле Евгеньевне Тимофеевой  
Тел./факс: (495) 918–1627  
E-mail: kp@vniikp.ru, alla\_timofeeva\_60@mail.ru

### Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427  
КПП 772201001  
р/с: 40702810238120102932  
в Московском банке  
ПАО «Сбербанк», г. Москва  
к/с: 3010181040000000225  
БИК 044525225

Подписной индекс в каталогах агентств «Роспечать» и «Урал-Пресс» – **79943**