

А.С. Жутяев, менеджер по маркетингу
направления кабелей среднего
и высокого напряжения фирмы Borealis AG

Развитие технологии полиолефинов для кабельного производства. Мировые тенденции и новые материалы

Аннотация. В статье приведена обобщенная информация по основным этапам развития технологии сшитого полиэтилена для кабельной изоляции, описаны особенности различных технологий химической сшивки полиэтилена, а также основные области их использования и направления развития.

Ключевые слова: электроэнергетика; возобновляемые источники электроэнергии; перекисная вулканизация (или пероксидная сшивка); силанольная вулканизация, сшитый полиэтилен.

Annotation. The article contains general information on main steps of XLPE technology development for cable insulation; main techniques of chemical cross-linking are described as well as major applications and future development trends for XLPE.

Key words: power industry, renewable energy sources, peroxide vulcanization (or peroxide cross-linking), silane cross-linking, crosslinked polyethylene.

Материал поступил в редакцию 29.07.2016
E-mail: Alexey.Zhutyayev@borealisgroup.com

Электроэнергетика выходит на новую ступень своего развития, где возобновляемые источники электроэнергии играют все большую роль. Так, согласно статистике, опубликованной «Международным Агентством по Возобновляемой Энергии» (IRENA) [1], глобальный рост мощностей возобновляемых источников электроэнергии в 2015 г. составил 152 ГВт, а отрасль на протяжении последних 6 лет растет более, чем на 8 % в год. При этом самый большой прирост мощности относится к ветроэнергетике – 63 ГВт, солнечной энергетике – на 47 ГВт, и только на третьем месте находится гидроэнергетика – на 35 ГВт. В то же время рост мощностей в атомной энергетике в 2015 г. составил 9,48 ГВт.

Внедрение новых технологий в области генерации электроэнергии требует развития кабельных технологий. Причем развитие идет во всех классах напряжения – от низкого до сверхвысокого. Появляются новые типы кабелей, например, кабели для подключения солнечных панелей на крышах частных домов и подводные кабели среднего и высокого напряжения к оффшорным ветряным электростанциям. Кроме того, задача передачи электроэнергии на значительные расстояния с минимальными потерями, а также растущий объем трансграничной торговли электроэнергией повышают интерес к системам электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения постоянного тока. Во всех перечисленных выше областях применение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена является наиболее технологичным и современным решением. В данной статье сделана попытка представить общую информацию по развитию различных технологий сшивки полиэтилена при производстве кабелей на различные классы напряжения.

Вместе с внедрением новых технологий генерации и транспортировки электроэнергии продолжают развиваться и модернизироваться существующие сети передачи и распределения электроэнергии. Главным образом развитие идет в направлении повышения надежности сетей, что требует, в частности, переноса воздушных ЛЭП под землю (Германия,

Финляндия), использования более долговечных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена для распределительных сетей среднего и низкого напряжения вместо кабелей с ПВХ и бумажной изоляцией.

Опережающими темпами идет развитие инфраструктуры в густонаселенных странах Азии и Ближнего Востока.

Использование полиэтилена в кабелях берет свое начало в сороковых годах XX века, когда он применялся в качестве изоляции авиационных проводов (рис. 1). Сшитый полиэтилен (СПЭ) впервые был использован в качестве кабельной изоляции в 1968 г. В результате развития технологий производства сшитого полиэтилена и его переработки наибольшее распространение получили два способа химической поперечной сшивки молекул полиэтилена и, в меньшей степени, технология радиационной сшивки. Для химической сшивки полиэтилена используются два типа реакции – перекисная вулканизация (или пероксидная сшивка), происходящая при высокой температуре, необходимой для разложения перекиси дикумила, и силанольная вулканизация, с участием молекул воды. Пероксидная сшивка получила наибольшее применение в производстве кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения, а силанольная – в кабелях низкого и среднего напряжения, а также в самонесущих изолированных проводах.

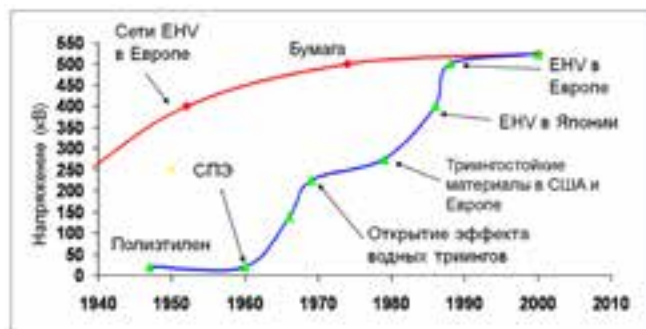


Рис. 1. Этапы развития технологии сшитого полиэтилена

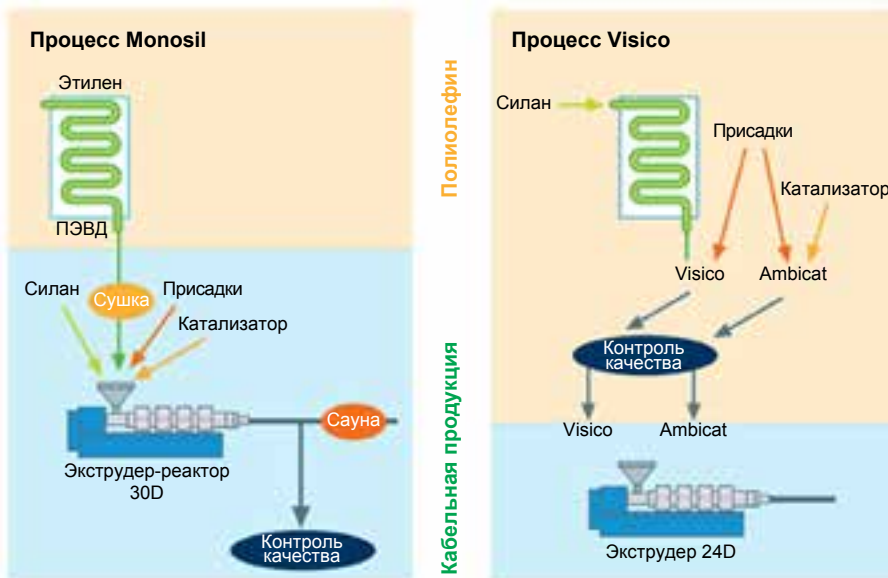


Рис. 2. Сравнение процессов силанольной сшивки полиэтилена

Для осуществления реакции силанольной сшивки к молекуле полиэтилена необходимо предварительно привить соединения силана, через которые, с участием молекул воды, и происходит химическая реакция поперечной сшивки. Это может быть сделано тремя способами: в экструдере для наложения изоляции (технология Monosil), на этапе компаундирования (технология Sioplas) и непосредственно в реакторе, в результате сополимеризации этилена и винилсилана (например, технология Visico компании Borealis). Схемы технологий Monosil и Visico показаны на рис. 2. У каждого способа есть свои преимущества и недостатки. При этом наилучший баланс качества, технологичности и стабильности свойств обеспечивает технология сополимеризации этилена и винилсилана в реакторе высокого давления.

В рамках данной технологии производство материала осуществляется в один этап, в очень больших объемах, посредством хорошо контролируемого технологического процесса. Благодаря этому процессу соединения винилсилана равномерно распределяются вдоль молекул полиэтилена, что впоследствии обеспечивает равномерную структуру сшитого полимера, а, следовательно, и высокое качество кабельной изоляции.

В дополнение к технологии Visico была разработана технология Ambicat, позволяющая отказаться от использования сауны или горячей ванны и обеспечивающая гарантированную вулканизацию на воздухе. Кроме того, в рецептуру материалов Visico входит замедлитель подсшивки в экструдере, обеспечивающий длительную, до месяца, работу экструзионной линии между чистками, а также частую смену инструмента при смене типоразмера производимого кабеля со значительно сниженной вероятностью появления дефектов изоляции.

Технология Visico используется не только для низковольтных кабелей и проводов типа СИП. Система материалов Visico для кабелей на напряжение до 35 кВ позволяет наладить эффективное производство, благодаря ряду преимуществ над другими решениями. В первую очередь это меньшие инвестиционные затраты на оборудование и инфраструктуру, благодаря использованию горизонтальных экструзионных линий и отсутствию системы азотного охлаждения. При

запуске и остановке таких линий образуется гораздо меньше отходов, а качество готовой продукции соответствует требованиям по старению изоляции во влажной среде (рис. 3).

Относительным недостатком данной технологии на сегодняшний день является меньшая производительность экструзионных линий по сравнению с наклонными линиями непрерывной вулканизации. Долгое время себестоимость материалов была выше, чем у пероксидно-сшиваемых аналогов, но в настоящее время и эта задача решена. Таким образом, технология Visico для кабелей среднего напряжения может использоваться как самостоятельно, так и в дополнение к перекисной вулканизации, к примеру, обеспечивая эффективное производство кабелей небольших длин и сечений.

Технология перекисной вулканизации нашла наибольшее применение в производстве кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения, как переменного, так и постоянного тока. В настоящее время наблюдается несколько векторов развития технологии пероксидно-сшиваемых материалов. Повышение рабочего напряжения кабеля (вследствие чего растет напряженность поля в кабельной изоляции) предъявляет особые требования к чистоте изоляционного материала и правилам обращения с ним, причем как у производителя материалов, так и в кабельном производстве. На всех этапах производства и использования СПЭ требуется соблюдение высочайшего уровня чистоты, а также должен производиться отбор образцов для контроля физико-химических свойств и чистоты материала.

Другим важным направлением является повышение экономической эффективности производства кабелей за счет снижения затрат и повышения производительности. Это может быть достигнуто за счет повышения реакционной способности сшиваемого полимера. Стандартный полиэтилен низкой плотности обладает не очень большим количеством двойных связей, участвующих в реакции вулканизации. Количество двойных связей можно увеличить за счет внедрения в структуру полимера винилового сомономера

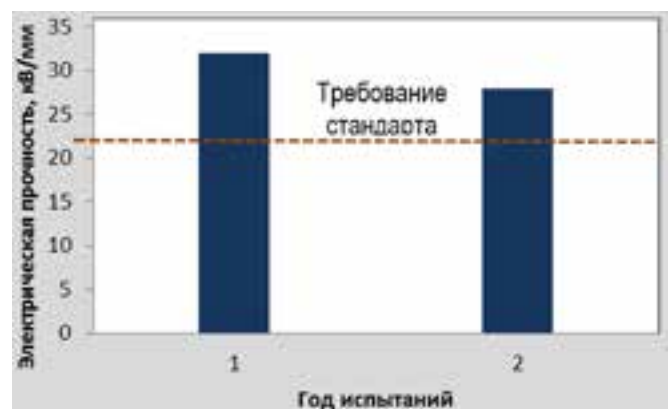


Рис. 3. Результаты испытаний по стандарту CENELEC. Кабель на 15 кВ, испытан как 20 кВ. Среднее значение электрической прочности 2,6 кВ/мм (требование 2,1 кВ/мм). Кабель с изоляцией Visico



Рис. 4. Схематичная иллюстрация базового полимера Borlink™ Supercure. Оранжевым цветом обозначены двойные связи, повышающие реакционную способность

(рис. 4). Больше за счет виниловых групп количество активных связей повышает скорость реакции вулканизации. На основе данного принципа компанией Borealis была разработана технология Borlink™ Supercure.

Способность полимера к ускоренной сшивке можно использовать двумя способами. Во-первых, сохранив обычное содержание пероксида в составе материала, можно повысить производительность экструзионной линии (за счет ускоренной реакции изолированная жила кабеля меньше времени находится в трубе вулканизации). Во втором случае, снижая содержание пероксида в рецептуре материала, можно уменьшить количество побочных продуктов реакции вулканизации полиэтилена. Это свойство дает ряд преимуществ такому материалу. В первую очередь, уменьшается эффект подшивки полиэтилена в экструдере. Это позволяет увеличить время работы экструзионной линии между чистками, а также снизить количество брака и отходов. В случае производства кабелей высокого и сверхвысокого напряжения данная технология обеспечивает существенное уменьшение промежутка времени, необходимого для дегазации, что, в свою очередь, позволяет сократить полное время производственного цикла и снизить себестоимость

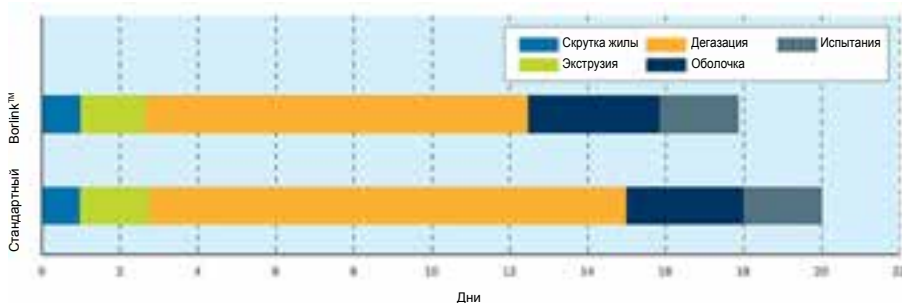


Рис. 5. Сокращенный производственный цикл для высоковольтных кабелей крупных сечений, изолированных материалами Borlink™ Supercure LS4201 и классическим LE4201

Год	1997	2000	2001	2007	2012
кВ	30	80	150	300	525
МВт	3	60	220	700	1000
Сечение жилы	95 мм ² Al	630 мм ² Al	1400 мм ² Al	2000 мм ² Al	2000 мм ² Al

Рис. 6. Эволюция кабелей постоянного тока с 1997 года

кабеля (рис. 5). Например, материал LS4201S для изоляции кабелей напряжением до 220 кВ компании Borealis, использующий технологию Borlink™ Supercure, позволяет увеличить интервал между чистками экструдеров минимум в 2 раза по сравнению с традиционным СПЭ. Технология Borlink™ Supercure нашла свое применения в материалах для изоляции кабелей от среднего до сверхвысокого напряжения, а также в системах изоляции кабелей постоянного тока.

Первый опыт эксплуатации образцов кабелей среднего напряжения с изоляцией из СПЭ выявил высокий уровень отказов вследствие образования специфических дефектов в изоляции, называемых водными триингами (от англ. tree – дерево). В результате работы над выявлением причин появления и роста водных триингов, а также поиска способа подавления их роста, появились триингостойкие изоляционные материалы на основе СПЭ. В настоящее время используются два способа подавления роста водных триингов. В одном случае в состав компаунда вводятся химические добавки, препятствующие их росту. Данная технология в основном используется в Северной Америке для кабелей с легко отделяемым экраном по изоляции. Во втором случае в состав полиэтилена вводится сополимер этилена и акрилата, и эта технология нашла большее применение в Европе для кабелей с пришитым экраном по изоляции. Подробно особенности сополимерных материалов для изоляции кабелей среднего напряжения описаны в статье, опубликованной в журнале «Кабели и провода» в 2005 г. [3]. В настоящее время на рынке представлены материалы, сочетающие в себе сополимерную технологию, обеспечивающую длительный срок службы кабеля с технологией Borlink™ Supercure, позволяющей наладить экономически эффективное производство таких кабелей.

В настоящее время в развитии магистральных сетей передачи электроэнергии видны две основные тенденции. Во-первых, во многих густонаселенных регионах, таких как Западная Европа, происходит перенос воздушных линий электропередачи под землю. Во-вторых, развитие возобновляемой энергетики дает импульс использованию новых технологических решений, таких как системы постоянного тока высокого напряжения, подводные кабельные линии и т.п. Так, в Европе, в ближайшие 10 лет должно быть построено более 10 тыс. км кабельных линий постоянного тока высокого напряжения. Интерес к подобным решениям появляется в Китае и США. Растущий объем передаваемой электроэнергии и протяженность линий требуют повышения рабочего напряжения в кабельных системах как переменного, так и постоянного тока (рис. 6). Уже анонсированы работы над кабелями переменного тока напряжением до 750 кВ.

Конечно, такие задачи не могут быть выполнены без использования надежных решений на основе высокотехнологичных материалов. В частности, в 2015 г. компания Borealis вывела на рынок систему изоляции на основе сшитого полиэтилена для кабелей постоянного тока напряжением до 525 кВ. Появление таких материалов стало возможным благодаря технологии Borlink™ Supercure. В кабелях постоянного тока высокого

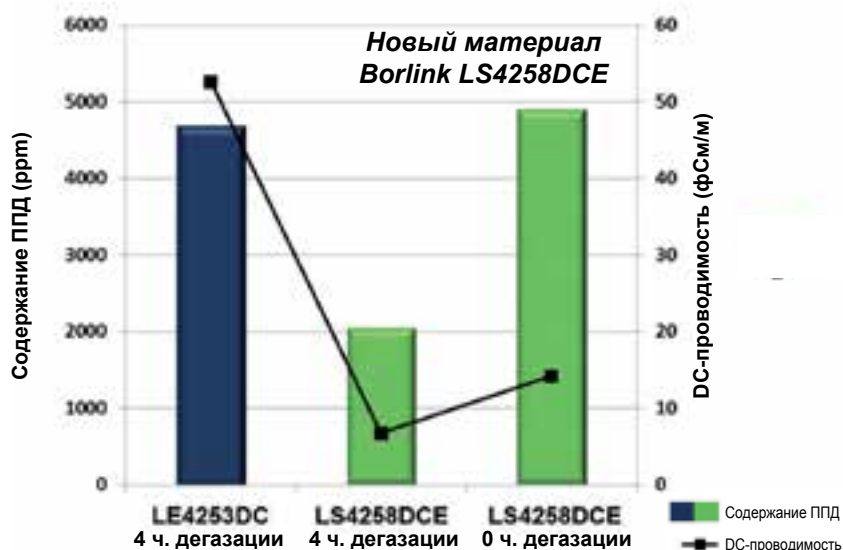


Рис. 7. Сравнение материалов для кабелей постоянного тока

напряжения, кроме требования к физической чистоте изоляционного материала, предъявляются особые требования к химической чистоте. Это связано с необходимостью обеспечения минимально низкой проводимости изоляции для предотвращения эффекта накопления объемного заряда и снижения вероятности теплового пробоя.

На рис. 7. показано содержание полярных продуктов разложения перекиси дикумила, негативно влияющих на

проводимость изоляции, в новом изоляционном материале LS4258DCE в сравнении с предыдущим поколением изоляции LE4253DC.

На рис. 7 видно, что первоначальное содержание полярных побочных продуктов разложения (ППД) в новом материале практически соответствует таковому в прежнем материале после 4 часов дегазации, а после дегазации в новом материале нежелательных веществ значительно меньше. Новые материалы открывают новые горизонты для использования сшитого полиэтилена в системах передачи очень больших объемов электроэнергии на значительные расстояния, где до недавнего времени использовались только кабели с бумажной изоляцией. В табл. 1 перечислены наиболее значительные проекты кабельных линий высокого напряжения постоянного тока с экструдированной изоляцией, реализованные более, чем за 15 лет.

Описанные выше инновационные технологии на основе сшитого полиэтилена обеспечивают эффективное производство различных кабелей для решения задач передачи и распределения электроэнергии. Мы можем не сомневаться в том, что инженерная мысль не стоит на месте, и в ближайшие годы будут появляться новые решения в области материалов, дающие возможность строить системы, позволяющие удовлетворить растущую потребность общества в надежном снабжении электроэнергией.

Таблица 1

Перечень проектов – более 15 лет опыта в области кабельных систем постоянного тока с экструдированной изоляцией

Проект	Мощность (МВт)	Напряжение (кВ)	Длина кабеля (км)	В эксплуатации с
Gotland, Швеция	60	80	140	1998
Tjoerborg, Дания	8	9	9	2000
Direct Link, Австралия	180	84	390	2000
Cross Sound, США	330	150	84	2002
Murraylink, Австралия	200	150	360	2002
Troll A 1&2, Норвегия	80	60	68	2004
Estlink, Финляндия-Эстония	350	150	105	2006
Trans-Bay, США	400	200	85	2010
Borwin 1, Гермагия	400	150	400	2010
East West IC, Ирландия-Великобритания	500	200	512	2014
Zhoushian, Китай	1160	200	294	2014
Nan'Ao Islands, Китай	100	160	37	2014
Borwin 2, Германия	800	300	400	2015
Helwin 1, Германия	576	250	260	2015
INELFE, Франция-Испания	1000	320	264	2015
Sylwin 1, Германия	864	320	410	2015
Helwin 2, Германия	690	320	260	2015
Dolwin 1, Германия	800	320	330	2015

ЛИТЕРАТУРА

1. IRENA Renewable Energy Statistics 2016. URL: <http://www.irena.org> (дата обращения: 28.06.2016).
 2. Ethylene-Vinyl Silane Copolymers for Medium Voltage Cable Applications. Bertil Ahlinder 1, Ola Fagrell 2, Kenneth Johansson 1, Lena Lindbom 2, 1 Draka Kabel AB, 2 Borealis AB; NORD-IS 2005.
 3. Бустром Дж.О., Кампус А., Хэмптон Р.Н., Хейккала П., Ягер К.М., Смедберг А., Валд Д. Соплимерные композиции сшитого полиэтилена (Super COPO™) для высоконадежных силовых кабелей среднего напряжения // «Кабели и провода». – 2005. – № 5. – С. 7–22.