***А.И. Егоров**, канд. техн. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники*
УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»

Особенности адгезионных свойств полиимидно-фторопластовых пленок

Аннотация. Приведены результаты выполненных по различным методикам измерений адгезионной прочности сварных соединений полиимидно-фторопластовых пленок. Обсуждается механизм влияния методики подготовки образца на полученный результат. Сделан вывод о необходимости проведения испытаний в соответствии со стандартной методикой.

Ключевые слова: полиимидно-фторопластовая пленка, изоляция, качество, адгезия.

Abstract. The results of adhesive strength measurements of welded joins of poliimide-fluoroplastic films are presented. The measurements were performed according to different procedures. The mechanism of influence of the specimen preparation method on the obtained results is discussed. A conclusion is made about the necessity of testing in accordance with the standard method.

Key words: poliimide-fluoroplastic film, insulation, quality, adhesion.

Материал поступил в редакцию 28.10.2015
E-mail: elorma@mail.ru

Полиимидные пленки нашли широкое применение в авиации, электротехнике, радиомеханике и многих других отраслях промышленности в качестве изоляционного материала. Использование их в качестве электроизоляции позволяет существенно увеличить удельную мощность и надежность электромашин, механизмов и приборов, повышает температуру их эксплуатации, уменьшает объем и вес. Применение комбинированных полиимидно-фторопластовых пленок (ПМФ) позволило путем обмотки токопроводящей жилы лентами с последующей термообработкой получать провода с монолитной герметичной изоляцией, обладающие повышенной нагревостойкостью, высокими значениями и стабильностью по длине электрической и механической прочности изоляции при ее малой толщине.

Но из-за высокой цены полиимидной пленки ее применение технически и экономически было обосновано только в электрооборудовании, эксплуатирующемся в экстремальных условиях, там, где выход изоляции из строя приводит к ущербу, многократно превышающему затраты на дорогостоящую изоляцию. Однако широкое развитие производства в Китае приводит к заметному снижению цен на полиимидные материалы. На рынке растет доля пленок, имеющих более низкую цену. Качество китайских материалов неуклонно повышается. Это приводит к тому, что на рынке в близких ценовых сегментах присутствуют материалы как низкого, так и высокого качества. Отличить материалы, имеющие различное качество, бывает достаточно сложно – они выглядят зачастую абсолютно одинаково. При этом применение дешевого материала без надежной оценки качества в высокоответственном узле может привести к его отказу. Чем же отличаются изоляционные пленки, имеющие существенно различную цену?

Статистические испытания китайской полиимидно-фторопластовой ленты с односторонним покрытием шириной 12,5 мм в количестве более 1000 бобин показали следующие результаты. Визуально они выглядят абсолютно одинаково. Составы их материалов одинаковы. Испытания на разрывной машине и высоковольтной пробойной установке показывают сравнимые результаты. Испытание на свариваемость дало удовлетворительный результат. Однако после изготовления провода наблюдается отслоение изоляции при изгибах на ряде образцов (рис. 1).

На образце, изображенном слева (рис. 1), отчетливо видно, что изоляция отслоилась от провода. В чем же причина?

Для полиимидной пленки с односторонним фторопластовым покрытием одним из основных показателей качества является адгезионная прочность сварного соединения полиимид-фторопласт. Методика проведения испытаний адгезионной прочности сварных соединений полиимидно-фторопластовых пленок описана в технических условиях (например, ТУ 2255-033-05807999–2003). Для испытаний

***Рис. 1**. Расслоение некачественной полиимидно-фторопластовой изоляции (слева)*

Рис. 2. *Подготовка образцов и проведение испытаний на адгезионную прочность сварного соединения*

обязательно используются образцы пленки шириной не менее 50 мм. После сварки из них нарезаются образцы шириной 10 мм, которые испытываются на разрывной машине. Для эксперимента был взят сваренный образец пленки, зона сварки 100 × 70 мм.

Пленка была разрезана на образцы шириной 10 мм. Крайние образцы были исключены. Оставшиеся 5 образцов были испытаны на разрывной машине. Выступающие с одной стороны из зоны сварки концы пленок закрепляются в разных зажимах разрывной машины, и производится отрыв пленок друг от друга со скоростью 100 мм/с. Усилие отрыва показывает адгезионную прочность сварного соединения. Картина изменения адгезионной прочности сварного соединения низкокачественной пленки по длине образца на подготовленных путем сварки широкого образцах показана на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что хорошая прочность сварного соединения наблюдается на расстоянии не более одного сантиметра от краев образца. Середина же образца на большой площади имеет адгезионную прочность в основном менее 100 Г/см, что не удовлетворяет ТУ. Сварка образцов различной ширины (от 30 до 120 мм) показывает приблизительно одинаковую картину распределения прочности сварного соединения. Разрывное усилие на краях зоны сварки значительно выше, чем в середине.

Такой характер изменения прочности адгезионного соединения по площади образца предположительно может быть связан с наличием в объеме полиимидно-фторопластовой пленки неких соединений, являющихся летучими при температуре сварки. В результате нагрева эти вещества выходят на поверхность. В случае сварки образца малой ширины они выходят наружу с потоком десорбированных с поверхности паров и не оказывают влияния на формирование соединения. Если ширина образца превышает некоторую критическую, то их выход затруднен, они остаются на контактирующих поверхностях и нарушают адгезию (рис. 4). Это могут быть как продукты реакции, происходящей при нагреве некачественной полиимидной основы, так и компоненты фторопластового слоя.

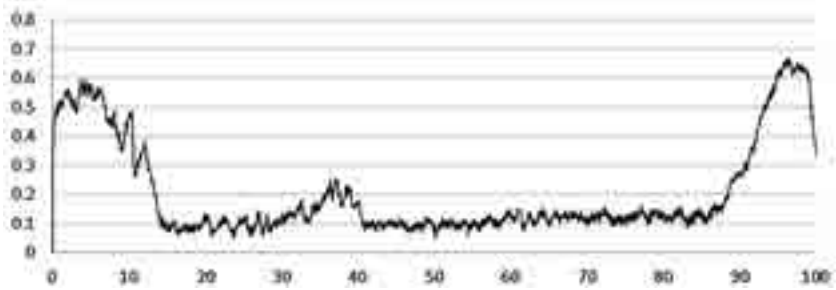

Рис. 3*. Изменение адгезионной прочности сварного соединения низкокачественной пленки вдоль образца при сварке по ТУ (по оси X длина образца в миллиметрах, по оси Y адгезионная прочность сварного соединения полиимид-фторопласт в кГ/см)*

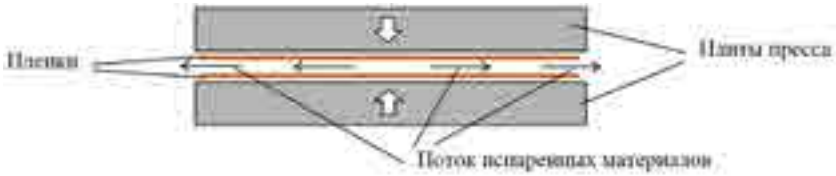

Рис. 4. *Выход потоков испаренных веществ при сварке ПМФ в лабораторном прессе*

Исследования продуктов газовыделения с поверхности пленок при нагреве показали большое число компонентов различной молекулярной массы. Масс-спектр летучих продуктов, выделяющихся из полиимидно-фторопластовой пленки при нагреве, приведен на рис. 5.

Общее количество летучих продуктов невелико, однако, вероятно, его достаточно для нарушения адгезионных свойств. На приведенном масс-спектре видно, что выделение летучих компонентов происходит как из полиимидной основы, так и из фторопластового слоя. Компонент, однозначно приводящий к вышеописанному нарушению адгезионных свойств, выявить не удалось. Опытным путем установлено, что причина такого поведения пленки при сварке может быть различной.

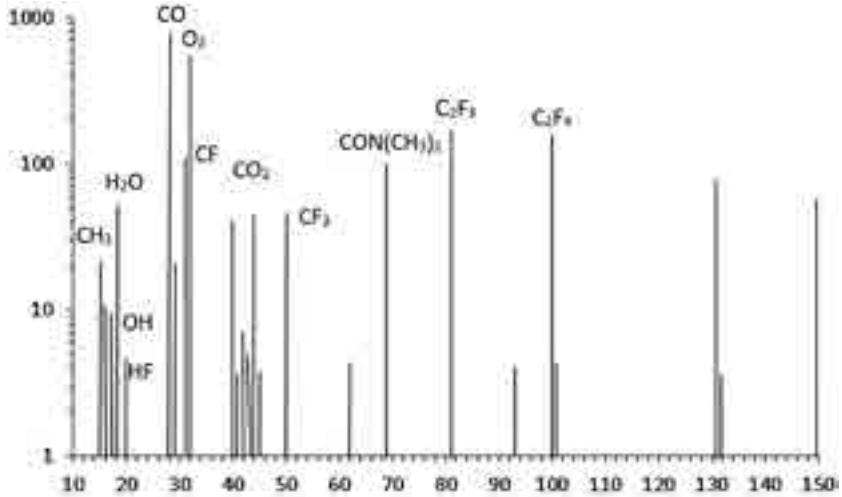

Рис. 5. *Масс-спектр продуктов термодесорбции из полиимидно-фторопластовой пленки при нагреве до 350 °С*

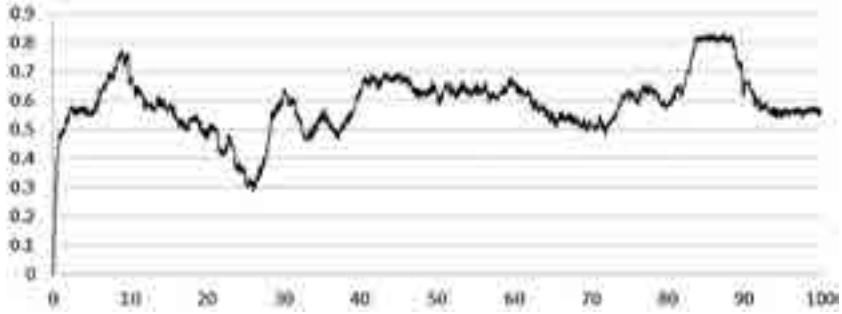

Рис. 6. *Изменение адгезионной прочности сварного соединения пленки удовлетворительного качества вдоль образца при сварке по ТУ*

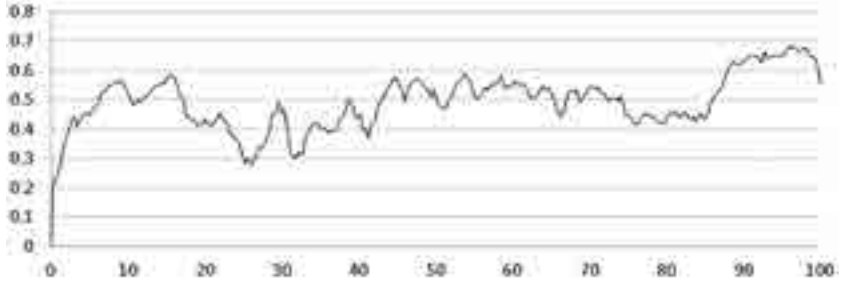

Рис. 7. *Изменение адгезионной прочности сварного соединения низкокачественной пленки вдоль образца при сварке образца шириной 15 мм*

Полиимидная пленка при производстве проходит многостадийную термообработку, при которой происходит поликонденсация с образованием имидных циклов и выделением воды и амидных растворителей. Несоблюдение технологического регламента при производстве пленки приводит к получению продукта с неполной полимеризацией. В процессе хранения такой пленки в ней наблюдается деструкция остаточных амидокислотных групп. При нагреве такой пленки из нее выделяется вода и продукты деструкции. Низкое качество полиимидной основы может быть легко обнаружено путем измерения термической усадки, однако вышеописанная картина плохих адгезионных свойств была замечена и на образцах пленок с удовлетворительной величиной усадки.

Фторопластовый слой на большинстве имеющихся на рынке полиимидно- фторопластовых пленок формируется наносом из водной суспензии с последующей сушкой и оплавлением. Суспензия, кроме основного вещества (сополимера тетрафторэтилена с гексафторпропиленом), содержит поверхностно-активные вещества (в том числе фторорганические), обеспечивающие стабилизацию суспензии и регулирующие ее вязкость и поверхностное натяжение. Неполное удаление этих компонентов приводит к их выделению из слоя фторопласта в результате нагрева при запекании.

При намотке такой пленки на провод в несколько слоев с большим натяжением наблюдается затруднение выхода летучих продуктов из пространства между слоями даже при малой ширине ленты, что, разумеется, может приводить к существенно низкой адгезии, вплоть до ее полного отсутствия.

Для сравнения приведем график изменения адгезионной прочности сварного соединения для качественной пленки (рис. 6).

В настоящее время многие предприятия, расположенные в КНР, поставляют одностороннюю полиимидно-фторопластовую пленку, уже порезанную на ленту шириной 10–15 мм. При попытке испытать такую ленту на адгезионную прочность сварного соединения в стандартном прессе все низкомолекулярные летучие продукты успевают выйти из зоны сварки за счет малой ширины образца. В результате этого мы видим достаточно высокую и стабильную адгезионную прочность. Тот же самый образец пленки, что и на рис. 3, но сначала порезанный на ленту шириной 15 мм, а потом сваренный, показал очень хорошие значения адгезионной прочности (рис. 7).

Можно наблюдать, что адгезионная прочность сваренного в прессе образца шириной 15 мм значительно выше и стабильнее, чем у образца, который сваривался широким. Причина высокой и стабильной адгезионной прочности сварного соединения в данном случае очевидна и хорошо наблюдаема на графике (рис. 3). Высокие значения адгезионной прочности наблюдаются на расстоянии не более 5–10 мм от края свариваемого образца. Однако следует иметь в виду, что в лабораторном прессе нагрев происходит практически одновременно со сжатием, и в процессе сжатия идет активное удаление низкомолекулярных продуктов из зоны сварки. При намотке пленки на провод ситуация совершенно иная – пленка сначала наматывается в несколько слоев с натяжением, а только потом нагревается, и шансов выйти наружу у низкомолекулярных продуктов практически не остается. В результате провод с обмоткой из такой пленки будет иметь склонность к отслаиванию изоляции при изгибах и термоударах.

Эффект нарушения адгезионных свойств полиимидно-фторопластовых пленок в условиях затруднения удаления летучих компонентов из зоны контакта для материалов китайского производства наблюдается достаточно часто. Связан он с нарушением (ускорением) технологического процесса. При этом недостаточно термообработанными могут быть как фторопластовое покрытие, так и полиимидная основа. Если эффект связан с фторопластовым слоем, то

в большинстве случаев дополнительная термообработка (с перемоткой) позволяет его устранить и стабилизировать адгезионные свойства. При недостаточной термообработке полиимидной основы исправить материал невозможно. Неоднократно было замечено, что даже при получении хороших результатов после различных технологических операций по исправлению адгезионных свойств низкокачественной пленки зачастую происходит самопроизвольное разрушение адгезионного контакта через несколько недель после сварки.

В заключение следует отметить, что сравнение первого (рис. 3) и последнего (рис. 7) графиков наглядно демонстрирует невозможность надежной оценки адгезионных свойств узкой полиимидно-фторопластовой ленты. Требования технических условий по методикам контроля качества полиимидно-фторопластовых пленок вырабатывались с учетом всех особенностей данных материалов. Материалы, поставляемые малоизвестными производителями в виде узких лент, невозможно испытать на соответствие нормам ни по адгезионным свойствам, ни по электрическим характеристикам. Поэтому использование таких материалов возможно только в малоответственных и легкозаменяемых узлах. Там же, где выход электрического провода из строя приводит к серьезным потерям, можно применять полиимидные материалы только такого качества, которое можно надежно контролировать.

Выводы

Необходимо стремиться использовать полиимидно-фторпластвые пленки проверенных поставщиков, имеющих положительную историю на рынке.

В случае необходимости работы с непроверенным поставщиком необходимо первоначально на тестовых партиях убедиться в качестве материала и стабильности его параметров, а также технологических свойств на достаточно большой партии.