

Э. Д. ШУМИЛОВА, к.т.н., доцент, Донбасский государственный педагогический университет

Ю. Н. ШУМИЛОВ, д.т.н., проф., ГП «Научно-исследовательский институт высоких напряжений»

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПЛЁНОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Работа посвящена изучению электрической прочности и закономерностям разрушения многослойной полимерной плёночной изоляции МПИ в среде криогенных жидкостей при напряжённости электрического поля близких к рабочим. Показано, что основным разрушающим фактором МПИ являются частичные разряды ЧР в полостях, заполненных криогенной жидкостью. Воздействие ЧР в зависимости от материала приводит к растрескиванию плёнок, либо к образованию на поверхности науглероженных проводящих побегов. Даны рекомендации по выбору МПИ для криогенных устройств.

Ключевые слова: многослойная полимерная плёночная изоляция, криогенные жидкости, электрическая прочность, частичные разряды, разрушение плёночной изоляции

Криогеника – раздел физики низких температур, изучающий изменение свойств различных веществ в условиях крайне низких (криогенных) температур. Наибольшее количество работ по изучению свойств материалов при криогенных температурах посвящено чистым металлам и их сплавам после открытия явления в них сверхпроводимости [1-2]. Применение сверхпроводящих токопроводов в электро-техническом оборудовании позволит создавать различные энергетические устройства, такие как трансформаторы, токоограничители, индуктивные накопители, кабели и так далее. Их применение может значительно улучшить ситуацию в существующих энергосистемах и сетях, увеличить их устойчивость, надёжность и пропускную способность [3]. К сожалению очень мало работ по изучению свойств диэлектрических материалов при криогенных температурах.

Целью настоящей работы явилось изучение электрической прочности и закономерностей разрушения многослойной полимерной плёночной изоляции МПИ в криогенных жидкостях при напряжённости электрического поля близких к рабочим частотой 50 Гц.

Полимерная плёночная изоляция обладает высокой электрической и механической прочностью, гибкостью, технологичностью нанесения на токопроводящие элементы электрооборудования. Однако

одним из недостатков МПИ является возможность появления между слоями и стыками лент газовых полостей заполненных впоследствии криогенной жидкостью. При повышении напряжения свыше рабочего в этих полостях могут возникать частичные электрические разряды ЧР, разрушающим образом воздействующие на изоляцию, которые, в конечном счёте, могут привести к её пробоям.

Методика исследования. Исследования МПИ проводились на модельных образцах, представляющих собой стопку вырезанных плёнок с количеством слоёв от 3 до 12. Сверху плёнок накладывалась слюдяная пластинка толщиной 0,11 мм с отверстием диаметром 4 мм для создания полости, в которой инициировали частичные разряды. Полученный образец зажимался между дискообразными металлическими электродами: высокопотенциальный диаметром 25 мм и низкопотенциальный электрод диаметром 35 мм. Специальное приспособление с образцом и электродами помещалось в дьюар с криогенной жидкостью и на образец подавалось переменное напряжение 50 Гц. При исследованиях измеряли характеристики ЧР: напряжение возникновения ЧР, напряжение погасания ЧР, интенсивность ЧР. В работе использовались широкополосные регистраторы ЧР «Корона-5М» и «Корона-6». Чувствительность схемы измерения составляла не менее $3 \cdot 10^{12}$ Кл. После пробоя образца или длительной выдержки под напряжением он разбирался и изучалась с помощью микроскопа поверхность в зоне действия ЧР.

В качестве МПИ использовались следующие промышленные плёночные диэлектрики:

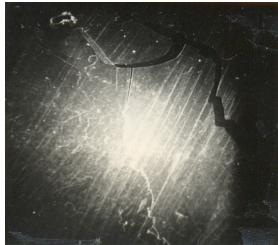
- полиэтилентерефталат (ПЭТФ) толщиной 10-30 мкм,
- политетрафторэтилен (ПТФЭ) толщиной 15-30 мкм,
- полиимид (ПИ) толщиной 40 мкм,
- полиэтилен (ПЭ) толщиной 40 мкм,
- полипропилен (ПП) толщиной 10 мкм.

Экспериментальные результаты. При изучении закономерностей разрушения полимерных плёнок в среде жидкого азота и гелия было установлено, что ЧР могут существовать в виде разрядов, перпендикулярных диэлектрическим поверхностям и в виде поверхностных скользящих разрядов. Первый вид разрядов оставляет следы эрозии в виде кратеров круговой формы, второй – каналы белого цвета или тёмные науглероженные побеги (треки). Микроскопическими исследованиями поверхности разрушения были установлены три типа разрушения в месте пробоя:

Тип 1 – пробой в виде отверстия (Рис.1б и 2), которому предшествует образование кратеров;

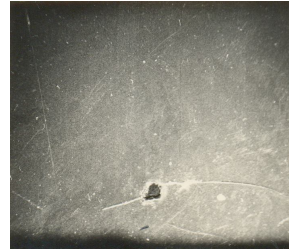
Тип 2 – пробой после образования науглероженных каналов на поверхности плёнки (Рис.4);

Тип 3 – пробой в результате растрескивания плёнок (Рис.2);



увеличение X 10

а



увеличение X 10

б

Рис.1– Разрушение полимерных плёнок при пробое в жидком гелии, $f=50$ Гц:

а – полиэтиленовые плёнки ПЭ, 3 слоя x 40 мкм;

б – ПЭТФ плёнки, 5 слоёв x 15 мкм.

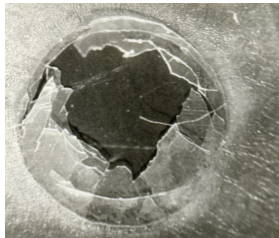


Рис. 2 – Растрескивание ПЭ плёнки в зоне ЧР при выдержке в жидком азоте.

Толщина образца - 2 слоя, 40 мкм, частота 50 Гц, напряжение 6 кВ.

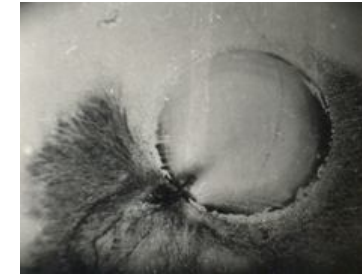


Рис. 3 – Пробой в жидком азоте ПТФЭ плёнки в центре полости (Тип 1).

Толщина образца 3 слоя x 40 мкм., частота 50 Гц.

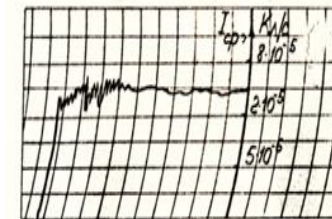
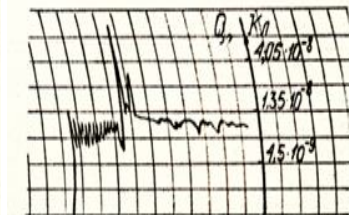
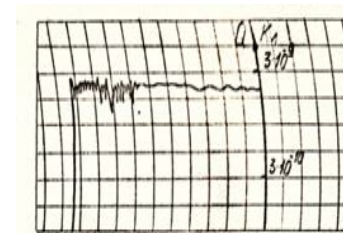


увеличение x 6.



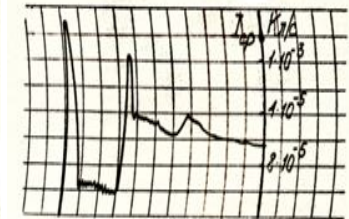
увеличение x 6.

Рис.4 – Образование науглероженных побегов и пробой в зоне ЧР образцов полиимидной плёнки (ПИ) в жидком азоте (Тип 2). Толщина образцов 4 сл x 30 мкм.



$v = 0.02$ мм/с ←

а



$v = 0.02$ мм/с ←

б

Рис. 5 – Изменение характеристик ЧР в момент появления трещин в плёнках ПЭ. а – колебания тока ЧР при появлении первоначальных трещин; б – резкое возрастание тока при интенсивном растрескивании плёнок.

Если образцы не доводить до пробоя, то указанные виды разрушения присутствуют только в первом слое, прилегающем к газовой полости.

Эффект растрескивания. В ряде плёнок перед пробоем наблюдалось растрескивание. Нестойкими к растрескиванию являются плёнки ПЭ и ПП, в меньшей степени ПТФЭ. В полиэтиленовых плёнках перед пробоем наблюдалось резкое самопроизвольное возрастание среднего тока ЧР, вызванное интенсивным растрескиванием плёнки в зоне ЧР (Рис.2).

Наиболее стойкими к растрескиванию являются ПЭТФ и ПИ, но они склонны к образованию науглероженных побегов. Высокие энергетические характеристики ЧР в криогенных жидкостях ($Q=10^{-7} - 10^{-9}$) Кл,

$I_{cp.}=(10^{-6} - 10^{-3})$ Кл/с, а также присутствие науглероженных побегов и трещин на поверхности плёнок позволяет допустить возможность разрушения МПИ вследствие термического воздействия ЧР.

Стойкость полимерных диэлектриков при криогенных температурах к растрескиванию в условиях импульсного теплового воздействия ЧР оценивалась с помощью известного критерия:

$$k = \frac{\sigma_p}{\alpha E} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c}}$$

Где σ_p – предел прочности при растяжении, кг/м²,

α – температурный коэффициент линейного расширения, 1/К,

E – модуль упругости, кг/м²,

λ, ρ, c – коэффициенты теплопроводности, плотности и удельной теплоёмкости диэлектрика.

Согласно [4], чем больше критерий k , тем выше термостойкость диэлектрика. Вычисленные значения k возрастают в направлении ПЭ, ПТФЭ, ПЭТФ, ПИ (от 0,2 до 4,7). Эта последовательность совпадает с рядом устойчивости к растрескиванию полимерных плёнок в зоне ЧР, который был получен экспериментально, что позволяет использовать критерий k при выборе МПИ для криогенных устройств.

Образование науглероженных побегов (треков). Высокие энергетические характеристики ЧР в криогенных жидкостях - интенсивности $Q=10^{-7}-10^{-9}$ Кл) и среднего тока $I_{cp.} = (10^{-6} - 10^{-3})$ Кл/с, а также отсутствие окислительной среды в полостях способствует образованию трековых дорожек в зоне ЧР. Тенденция к образованию науглероженных проводящих побегов при воздействии поверхностных дуговых разрядов при нормальных температурах в воздухе рассматривается в работе [4], в которой проводится анализ терморазрушения полимера с энергетической точки зрения. Считается, что при воздействии высоких

температур термодеструкция полимера происходит следующим образом:

Полимер – (температура) – углерод + газообразные продукты.

$$\Delta H_{срd} = \Delta H_c + \Delta H_{vol} ,$$

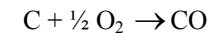
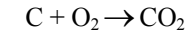
Где $\Delta H_{срd}$ - суммарная энергия связей основного структурного звена полимерной молекулы,

ΔH_c - суммарная энергия связей, разрыв которых приводит к образованию свободного углерода,

ΔH_{vol} - суммарная энергия связей, разрыв которых способствует удалению углерода вместе с газообразными продуктами.

Согласно этой гипотезе считается, что на поверхности полимера образуются науглероженные побеги только в том случае, если при терморазложении углерод остаётся на поверхности и в объёме материала. Если углерод окисляется, то он удаляется вместе с газообразными продуктами и возникает только эрозия материала.

При нормальных условиях удалению углерода из зоны разряда способствует присутствие в воздухе кислорода, который поглощает образующийся свободный углерод и образует летучие газообразные продукты:



С увеличением мощности источника скорость пиролиза становится выше скорости окислительных процессов. Это способствует образованию и появления треков на поверхности полимерных материалов.

Показано, что при соотношении $\Delta H_c / \Delta H_{срd} < 0,4$ терморазрушение полимеров приводит только к образованию эрозионных кратеров в зоне разрядов без образования проводящих побегов. При $\Delta H_c / \Delta H_{срd} > 0,4$ терморазрушение полимеров сопровождается интенсивным образованием проводящих науглероженных побегов. К полимерам первого типа ($\Delta H_c / \Delta H_{срd} < 0,4$) относятся полиэтилен, полипропилен, полиметилметакрилат, кремнийорганические каучуки. К полимерам второго типа - полистирол, поликарбонат, фенолформальдегидные смолы, диановые эпоксидные смолы и др.

В среде криогенных жидкостей ввиду отсутствия кислорода и большой интенсивности ЧР, как и в изоляции при нормальных условиях, образование науглероженных побегов облегчается [4], что и наблюдалось в описываемых экспериментальных результатах. Возникновение проводящих побегов способствует также образованию полисо-

пряжённых соединений, к чему склонны полимеры, содержащие в структуре ароматические соединения и боковые группы со слабыми звеньями. С этих позиций объясняется высокая устойчивость к образованию проводящих побегов у исследуемых полимеров – ПЭ, ПП, ПТФЭ – как не имеющих в структуре цепи боковых групп со слабыми связями и ароматических соединений. ПЭТФ и ПИ, содержащие в структуре ароматические соединения, образуют проводящие побеги. Структура полиимидов наиболее предрасположена к образованию полисопряжённых структур "паркетного" типа и поэтому наиболее подвержена образованию проводящих науглероженных побегов.

Заключение.

Анализ результатов по электрической прочности, напряжённости возникновения ЧР и устойчивости к разрушению позволяет следующие рекомендации по выбору МПИ для криогенных устройств:

1. В устройствах, к которым предъявляются повышенные требования к обеспечению минимальных диэлектрических потерь, рекомендуется применять неполярные диэлектрики ПП, ПЭ, ПТФЭ, обеспечивающие одновременно низкие диэлектрические потери и высокие значения напряжённости возникновения ЧР.

2. В устройствах с более низкими требованиями к диэлектрическим потерям могут быть рекомендованы плёнки из ПЭТФ, как обладающие повышенной устойчивостью к растрескиванию и менее выраженной склонностью к образованию науглероженных побегов.

Список литературы: 1. *П.Де-Жен*. Сверхпроводимость металлов и сплавов / *П.Де-Жен* // М.: Мир. – 1968 с. 2. *Г.Брехна*. Сверхпроводящие магнитные системы./ *Г.Брехна*.// М.: Мир. – 1976.с. 3. *Н.А.Черноплеков*. Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения.// Вестник Российской академии наук.– № 4. – 2001. – с 303 – 319. 4. *D.I.Parr, R.M. Scarisbrik*. Performance of syntetic insulating materials under polluted conditions. " Proc. IEE ", № 8, p.1625 – 1632. 5. *А.К. Шидловский*, Высоковольтные полимерные изоляторы. / *А.К. Шидловский, Ю.Н., Шумилов, А.А.Щерба, Золотарёв В.М.* // Киев, Сучасність, 2008..

Bibliography (transliterated):1. P.De-Zhen. *Sverhprovodimost' metallov i splavov*. Moscow «Mir», 1968. 2. G.Brehna. *Sverhprovodjashhie magnitnye sistemy*. Moscow: Mir. 1976. 3. N.A.Chernoplekov. *Sverhprovodnikovye tehnologii: sovremennoe sostojanie i perspektivy prakticheskogo primenenija*. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2001.No 4, 303 – 319. Print. 5. A.K. Shidlovskij, Ju.N., Shumilov, A.A.Sherba, Zolotarjov V.M. *Vysokovol'tnye polimernye izoljatory*. Kiev: Suchasnist'. 2008.

Поступила (received) 03.07.2014