

Ю.Н. ШУМИЛОВ, докт. техн.наук, проф., ГП «НИИВН», Славянск;
М.Ю. ШУМИЛОВ, ГП «НИИВН», Славянск

СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ В ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В работе приведены результаты исследования электрофизических процессов в стеклопластиковых стержнях, которые предшествовали их «хрупкому разрушению» при комплексном действии эксплуатационных факторов (сильных электрических полей, влаги, механических нагрузок). Поданы рекомендации относительно повышения стойкости высоковольтных полимерных изоляторов к данному виду разрушения в эксплуатации.

У роботі приведені результати дослідження електрофізичних процесів в склопластикових стрижнях, які передували їх «крихкому руйнуванню» при комплексній дії експлуатаційних чинників (сильних електричних полів, вологи, механічних навантажень). Подано рекомендації щодо підвищення стійкості високовольтних полімерних ізоляторів до даного виду руйнування в експлуатації.

The research shows results of study of electric and physical processes in fiberglass rods. The processes precede the rods' "brittle fracture" at combined influence of operational factors (intensive electric fields, moisture, mechanical strengths). Recommendations as for increasing of high-voltage polymer insulators' resistance to such kind of fracture during operation were made.

В настоящее время во всех промышленно развитых странах намечалась устойчивая тенденция к применению полимерных изоляторов на воздушных линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения. Более чем 25-летний опыт эксплуатации подтвердил высокую надежность полимерных изоляторов, однако в процессе эксплуатации были обнаружены и их немногочисленные недостатки [1 – 5].

Наиболее подробно типы и причины отказов, хотя и немногочисленных, приведены в отчетах американского института Electric Power Research Institute (EPRI), в которых проанализирована работоспособность около четырех миллионов полимерных изоляторов, установленных на воздушных линиях 110 – 750 кВ [6]. Виды отказов были сгруппированы и представлены в виде гистограммы (рис. 1).

Из гистограммы следует, что по данным зарубежной эксплуатации наибольшее число отказов это «хрупкое разрушение» стеклопластикового стержня полимерного изолятора. Несмотря на сравнительно небольшое количество отказов (74 из 4-х миллионов, установленных на воздушных линиях) по причине «хрупкого разрушения» каждый отказ полимерного изолятора сопряжен с необходимостью его замены. На отыскание места повреждения линии и проведение восстановительных работ может потребоваться большое количество времени.

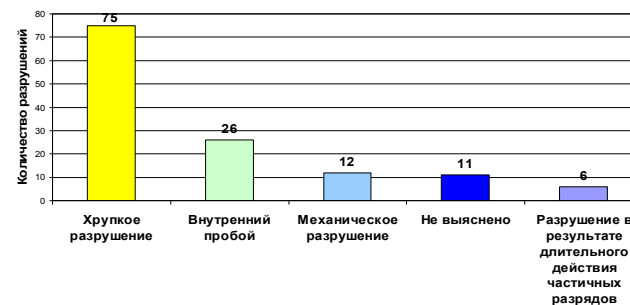


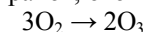
Рис. 1 – Виды разрушения полимерных изоляторов

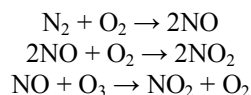
Явление «хрупкого разрушения» впервые было обнаружено в 1970 г. на полимерных изоляторах первого поколения, установленных в магистральных линиях Италии и Южной Африки [7]. Внешний вид разрушения, рис. 2, существенно отличается от обычного разрушения стеклопластика при растяжении – в виде «метелки». Как видно, значительная часть сечения разрушенного стеклопластикового стержня имеет идеально гладкую поверхность.



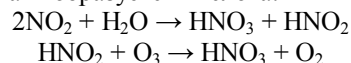
Рис. 2 – Внешний вид «хрупкого разрушения» полимерного изолятора

Подобные разрушения наблюдались также в 1980 г. и 1990 г. в США. В России такой тип разрушения был обнаружен на линии напряжением 330 кВ Магистральных электрических сетей Северо-Запада [8]. В сетях Украины явных признаков «хрупкого разрушения» изоляторов не было обнаружено. Как правило, «хрупкое разрушение» в подвесных изоляторах наблюдается около высоковольтного провода или внутри оконцевателя, поддерживающего высоковольтный провод. Несмотря на малую вероятность разрушений, возможность их появления вызывает беспокойство как у потребителей, так и у разработчиков изоляторов, поскольку «хрупкое разрушение» сопровождается падением провода. Механизм «хрупкого разрушения» полимерных изоляторов достаточно подробно описан в литературе [3, 9]. Суть состоит в проникновении через дефекты в защитной оболочке изолятора водных растворов азотной кислоты к стеклопластиковому стержню, подверженному растягивающей нагрузке от тяжения провода. Азотная кислота образуется как побочный продукт коронирования воздуха в присутствии влаги в зоне высоковольтных элементов подвески: проводов, экранов, оконцевателей:





В присутствии влаги образуется кислота:



Когда кислый водный раствор вступает в контакт со стекловолоконным происходит обмен между ионами металлов на поверхности стекла с ионами водорода, образуемых при диссоциации кислоты. В основном, это ионы кальция, алюминия, бора и натрия. Процесс ионного обмена истощает слой стекловолокна и приводит к уменьшению его молярного объема. Поверхностный слой стекловолокна после выщелачивания состоит преимущественно из двуокиси кремния.

Уменьшение молярного объема в поверхностном слое сопровождается появлением в нем окружных растягивающих напряжений, которые в значительной степени снижают прочность стекловолокна. Совместное воздействие окружных и продольных растягивающих усилий от тяжения провода приводят к разрушению стекловолокон.

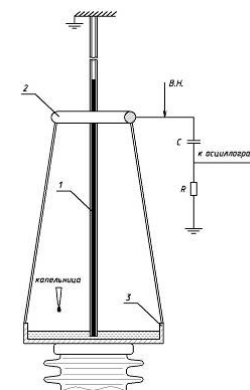
В связи с этим при разработке конструкции изоляторов нового поколения напряжением 110 кВ и выше необходимо ставить задачу – определить пути устранения или сведения до минимума «хрупких разрушений» в эксплуатации. При этом необходимо сохранить высокие требования по электрической прочности (не менее 40 кВ/см) и кратковременной механической (не менее 800 МПа) прочности.

Нужно отметить, что в исследованиях «хрупкого разрушения» полимерных изоляторов, приводимых в многочисленной литературе [103 – 113] по механизму разрушения, нигде не рассматривается вопрос о движении влаги в капиллярах и полостях под оболочкой в сильном электрическом поле и не рассматриваются электрофизические процессы, предшествующие разрушению. При описании механизма разрушения также отсутствует объяснение, почему «хрупкое разрушение» в подавляющем большинстве случаев происходит выше уровня установки электростатических экранов. Так же не установлены причины возрастания вероятности «хрупкого разрушения» изоляторов с увеличением класса напряжения воздушных линий, кроме тривиального объяснения, что в этом случае выше напряженность электрического поля, хотя с увеличением класса напряжения увеличивается степень экранирования изолятора.

Устранение данного «пробела» поможет лучше понять механизм «хрупкого разрушения» и более направлено провести поиск путей улучшения качества полимерных изоляторов. Для этой цели были поставлены специальные эксперименты.

Для исследования движения влаги в пористом диэлектрике в сильном электрическом поле использовались искусственные стеклянные капилляры с диаметром внутреннего канала 0,2 мм (рис.3).

Напряжение подавалось на тороидальный экран 2 и ванночку 3, установленную на опорном изоляторе. Верхняя часть капилляра заземлялась. Для исключения пробоя и разрушения стенок капилляра при разрядах ток через образец ограничивался до уровня 0,1 мА. По мере увлажнения фильтровальной бумаги на дне ванночки и подъема влаги в капилляре до точки, расположенной выше уровня тороидального экрана, в капилляре возникали частичные разряды, которые быстро прекращались из-за испарения влаги и повышения давления в полости капилляра. По мере образования нового столба жидкости процесс повторялся.



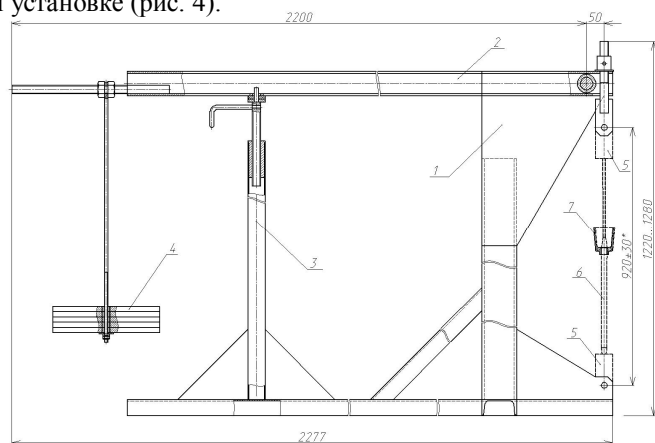
1 – стеклянный капилляр, Ø 0,2 мм; 2 – электростатический экран; 3 – металлическая «заземленная» емкость

Рис. 3 – Схема проведения эксперимента по исследованию движения влаги в стеклянном капилляре под действием сильного электрического поля

Высота подъема жидкости в сильном электрическом поле, как показали опыты, ограничивается зоной возникновения частичных разрядов, испарением влаги и ростом давления газа в капилляре. Эта зона располагается выше установки электростатического экрана. Когда столб жидкости в капилляре стеклопластикового стержня поднимается выше тороидального экрана на конце столба создается область повышенной напряженности электрического поля, причем напряженность электрического поля резко увеличивается по мере продвижения столба вверх и напряженность поля на конце столба достигает напряженности возникновения частичных разрядов. Именно в зоне горения частичных разрядов происходит накопление побочных продуктов электрического разряда, где и начинается «хрупкое разрушение».

Из описанных выше экспериментов становится ясно, что установка электростатических экранов при наличии дефектов в защитной оболочке и увлажнении изолятора не гарантирует его нормальную работу. Принимая во внимание, что при серийном производстве трудно избежать стопроцентного отсутствия дефектов и некачественной герметизации, устранение «хрупкого разрушения» изоляторов необходимо искать, очевидно, в повышении коррозионной стойкости материалов и, в первую очередь, стекловолокна.

Стеклопластики на основе алюмо-боро-силикатных стекловолокон (стекловолокно типа E) обладают недостаточной устойчивостью к «хрупкому разрушению». Бор, вводимый в шихту в качестве плавня, в малощелочном алюмо-боро-силикатном стекловолокне находится в тройной координации. Из химии стекла известно, что стекло, где бор находится в тройной координации, химически нестойко. По этой причине проведен поиск состава стекловолокна исключающего присутствие в структуре B_2O_3 при сохранении необходимых электроизоляционных свойств. В качестве объекта дальнейших исследований выбрано безборное ECR стекловолокно. Сравнительные испытания стеклопластиков типа E и ECR на устойчивость к хрупкому разрушению проводились на рычажной установке (рис. 4).



- 1 – несущая опора;
- 2 – рычаг;
- 3 – поддерживающая опора;
- 4 – груз;
- 5 – захват;
- 6 – образец стеклопластика;
- 7 – силиконовый стаканчик с электролитом.

Рис. 4 – Основные размеры рычажного устройства для определения устойчивости стеклопластиковых стержней к «хрупкому разрушению»

Устойчивость к «хрупкому разрушению» определялась при растягивающей нагрузке 6,7 т и 1-молярном растворе HNO_3 . Приведенные в табл. 1 результаты показали, что устойчивость стержней со стекловолоконного типа ECR несоизмеримо выше, по сравнению со стержнями на волокне типа E, что объясняется высокой химической стойкостью безборного стекловолокна.

Таблица 1 – Полученные характеристики отобранных стеклопластиков электротехнического назначения

Производитель стеклопластика	Golden Phoenix (Китай)	Golden Phoenix (Китай)	Bastion Glassfibre (Англия)	Golden Phoenix (Китай)	Bastion Glassfibre (Англия)	Тверь-стеклопластик (Россия)	Экипаж (Украина)
Тип стекловолокна	ECR	ECR	ECR	E	E	E	E
Диаметр, мм	15	16	16	15	16	15	15
Устойчивость к «хрупкому разрушению», час	> 96	> 96	> 96	2	2,1	1,9	1,9
Электрическая прочность в исх. состоянии, кВ/мм	4,04	4,4	> 6,4	5,4	> 6	4,7	4,5

Дополнительно были проведены сравнительные испытания стеклопластиковых стержней производства «Тверьстеклопластик», изготовленных на базе алюмоборосиликатного стекла (тип E) и стеклопластика производства «Bastion Glassfibre» на базе безборного стекловолокна (тип ECR) на определение механической прочности при растяжении после длительного одновременного воздействия однонормального раствора HNO_3 и статического растягивающего усилия. Образцы стеклопластиковых стержней, проточенные до $\varnothing 8$ мм, поочередно устанавливались в рычажное устройство (рис. 4). К каждому образцу прикладывалось статическое растягивающее усилие 11,7 кН с одновременным воздействием на образец раствора азотной кислоты (в емкость (рис. 4) наливался однонормальный раствор HNO_3) в течение времени 15 мин – для первого образца, 30 мин – для второго и т.д. По истечении заданного времени выдержки образец извлекался из растягивающего устройства, далее определялась его механическая прочность при растяжении до разрушения.

Результаты проведенного испытания (рис. 5) показывают, что механическая прочность стеклопластика, изготовленного на базе безборного

стекловолокна типа *ECR* под действием продуктов горения частичных или коронных разрядов (водный раствор HNO_3) и статического растягивающего усилия длительное время остается неизменной.

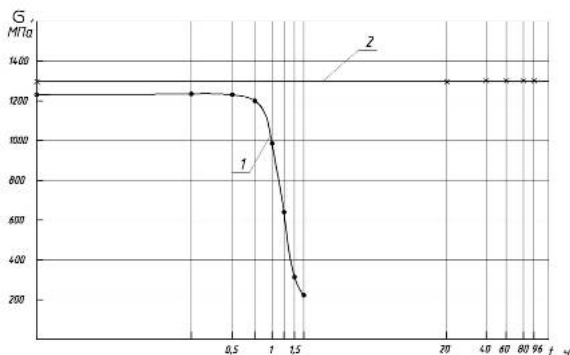


Рис. 5 – Зависимость механической прочности σ стеклопластиков от времени выдержки t под действием однонормального раствора HNO_3 и статической растягивающей нагрузки: 1 – стеклопластик производства «Гверьстеклопластик» на базе алюмоборосиликатного стекловолокна типа *E*; 2 – стеклопластик производства «Bastion Glassfibre» на базе безборного стекловолокна типа *ECR*.

Механическая прочность стеклопластика изготовленного на базе стекловолокна типа *E* под действием однонормального раствора HNO_3 и статического растягивающего усилия существенно снижается менее чем через час вследствие коррозионного «хрупкого разрушения» стекловолокна.

Выводы.

1. Исследование движения жидкости в капиллярах в сильном электрическом поле позволило установить:

- высота подъема водного электролита в капилляре в сильном электрическом поле ограничивается зоной возникновения частичных разрядов, возникающих на концах столба жидкости;
- в результате испарения влаги и роста давления газа частичные разряды в капилляре затухают, однако, по мере подъема новой порции влаги они вновь возникают;
- зона возникновения частичных разрядов расположена на несколько сантиметров выше тороидального экрана, где и происходит наблюдаемое в эксплуатации «хрупкое разрушение» изоляторов, в результате воздействия на стекловолокно продуктов газового разряда.

2. На основании приведенных в данном разделе исследований можно заключить, что при наличии дефектов в защитной оболочке и увлажнении изолятора установка электростатических экранов на защищаемый изолятор не эффективна, по причине выноса потенциала жидкостью, поднимающейся в капиллярах выше уровня установки

электростатического экрана и образования в зоне выноса частичных разрядов, приводящих к «хрупкому разрушению» стеклопластикового стержня.

3. Применение стеклопластиков, выпускаемых известными фирмами Bastion Glassfibre Rod (Англия) и Golden Phoenix (Китай) на основе безборных стекловолокон обеспечивает существенное повышение устойчивости изолятора к «хрупкому разрушению» при сохранении остальных необходимых для нормальной работы изолятора свойств; стеклопластики Bastion Glassfibre Rod (Англия) и Golden Phoenix (Китай) на основе безборных стекловолокон рекомендованы для производства изоляторов на напряжение 330 – 750 кВ.

Список литературы: 1. Владимирский Л. Л. Основные направления работ ОАО НИИПТ в области исследования, внедрения и эксплуатации полимерных изоляторов. / Л.Л. Владимирский // Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытания, опыт эксплуатации, диагностика : международная научно-техническая конф., 4 – 9 окт. 2004 г. : тезисы докладов. – С.Петербург : ПЭИПК, 2004. – С. 15 – 33. 2. Шумилов Ю. Н. Точка зрения производителя современных композиционных изоляторов, основанная на многолетних эксплуатационных и лабораторных испытаниях / Ю. Н. Шумилов // Всемирная конференция по изоляторам, ограничениям перенапряжений и бушингам, Малага, Испания. 2000 г. : тезисы докл. – С. 105 – 108. 3. Kumosa M. Research Program on Brittle Fracture Concludes at University of Denver / M. Kumosa // Insulator News and Market Report Quarterly Review. – 2005. – № 3 (13). – P. 78 – 83. 4. Розов В. А. Некоторые проблемы эксплуатации высоковольтных изоляторов / В. А. Розов, О. Ю. Корхов, Е. А. Каминская // Электрические системы и сети. – 2005. – № 6, – С. 49 – 53. 5. Гайворонский А.С. Опыт эксплуатации и перспективы применения полимерной изоляции в электрических сетях 110 – 500 кВ / А.С. Гайворонский, В. А. Чунчин // Об организации безаварийной работы электрических сетей в период высоких температур; грозовой активности и пожароопасности: совещание ОАО «ФСК ЕЭС», 24 – 27 июня 2003 г. : тезисы докл. - Волгоград : 2003. 6. Phillips A. Survey of Application of Overhead Transmission Line Polymer Insulators in North America and Summary of EPRI Polymer Insulator Failure Database / A. Phillips // World Conference and Exhibition on Insulators, Arresters and Bushings. – Marbella, Spain, Nov. 16 – 19, 2003. – P. 147 – 157. 7. Kumosa M. Research Program on Brittle Fracture Concludes at University of Denver / M. Kumosa // Insulator News and Market Report Quarterly Review. – 2005. – № 3 (13). – P. 78 – 83. 8. Злаказов А.Б. Опыт эксплуатации полимерных изоляторов разработки НИИВН / А.Б.Злаказов, Е.Д. Ким, Ю.П. Афанасьев и др // Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытания, опыт эксплуатации, диагностика : международная науч.-техн. конф., 4 – 9 октября 2004 г. – С.Петербург : ПЭИПК, 2004. – С. 93 – 102. 9. Terry S. Corrosion Resistant Properties of Polymer Insulator Core Rods / Terry S. McQuarrie // Symposium on Non-Ceramic Insulator Technology, June 12, 1996.

Поступило в редколлегию 03.10. 2010