

УДК 621

КИМ ЕН ДАР^а, Б. П. ГОРДИЕВИЧ^б, В. И. КОВАЛЕВ^с, С. М. ЦУРАК^б

^а Українська інженерно-педагогічна академія, ^б ЗАО «Южноуральская межрегиональная электротехническая компания», ^с Донбасский государственный педагогический университет

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Установлено, что инородные микровключения с проводящими или слабопроводящими свойствами, а также микротрещины или полуткрытые воздушные поры, способные сорбировать влагу, являются наиболее существенными дефектами в стекле, влияющими на электрическую прочность высоковольтных изоляторов. Даны рекомендации по контролю технологических параметров с целью минимизации таких дефектов.

высоковольтный стеклянный изолятор, технология, электрическая прочность, проводящие инородные микровключения, полуткрытые микропоры

ВВЕДЕНИЕ

Анализ причин выхода из нормальной работы высоковольтных изоляторов в электрических сетях является чрезвычайно сложной задачей. Это связано с тем, что в первичных материалах энергосистем в большинстве случаев содержатся элементы субъективного подхода в определении возможных факторов, вызвавших повреждения изоляторов [1]. Тем не менее, в качестве основных причин раннего отказа изоляторов из закаленного стекла на линиях электропередачи рассматриваются так называемое саморазрушение и электрический пробой стеклодетали. В процессе закалки происходит не только упрочнение изоляционной детали, но и закладываются очаги опасных перенапряжений, которые могут инициировать самопроизвольное разрушение диэлектрика. Для снижения вероятности попадания изоляторов с такими дефектами в эксплуатацию их изоляционные детали подвергаются термическим воздействиям (как положительным, так и отрицательным).

Исследование центров разрушения изоляционных деталей при этих испытаниях показали наличие в них различного рода инородных включений, приводящих к искажению закалочных напряжений в стекле. Многолетняя практика как отечественная, так и зарубежная [2, 3] свидетельствует о наличии достаточно тесной корреляции между отказом изоляторов и интенсивностью атмосферных и коммутационных перенапряжений в электрических сетях. В связи с этим в новой редакции МЭК60383-2 предусматривается обязательное дополнительное электрическое испытание изоляторов импульсным напряжением с крутым фронтом волны. Вместе с тем статистика выходного контроля производителей изоляторов свидетельствует, что проблемы, связанные с неудовлетворительной электрической прочностью, периодически возникают.

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА СТЕКЛА НА ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Ранее было рассмотрено влияние параметров и различного рода дефектов, определяющих качество изоляционной детали стеклянных изоляторов, на их электрическую прочность [4]. К ним относятся однородность стекломассы, равномерность закалочных напряжений, наличие грубых поверхностных дефектов, таких как: воздушные пузыри, сколы, складки, кованость, след от отреза ножниц, песочки, инородные включения [ГОСТ 18328].

Испытанию подвергались модели изоляторов, укомплектованные из изоляционных деталей класса 120 и 160 кН, взятых из одних и тех же выборок, но подвергнутых различным условиям и режимам термообработки: А – закаленные на заводе-изготовителе; В – отожженные в условиях лаборатории;

© Ким Ен Дар, Б. П. Гордиевич, В. И. Ковалев, С. М. Цурак, 2014

С – повторно закаленные в условиях лаборатории по технологии, существенно отличной от применяемой изготовителем. Результаты испытания показали, что закалочные напряжения в поверхностном слое стекла не оказывают значимого влияния на его электрическую прочность как при воздействии импульсного напряжения (таблица 1), так и при воздействии переменного напряжения промышленной частоты (таблица 2).

Таблица 1 – Результаты испытаний импульсным напряжением изоляторов с различной термообработкой изоляционной детали

Особенность термообработки	Кол-во испытанных /кол-во пробитых изоляторов	
	Изолятор, 120 кН	Изолятор, 160 кН
А	10/4	10/0
Б	12/4	10/0
В	10/3	10/0

Таблица 2 – Результаты испытаний напряжением промышленной частоты изоляторов с различной термообработкой изоляционной детали

Напряжение пробоя, кВ					
Особенность термообработки					
А		Б		В	
Изолятор 120 кН	Изолятор 160 кН	Изолятор 120 кН	Изолятор 160 кН	Изолятор 120 кН	Изолятор 160 кН
170*	170*	170*	170*	136 + 170*	170*
170*	170*	170*	170*	170*	170*
149+	170*	170*	170*	170*	170*
170*	170*	128+	170*	170*	170*
170*	170*	170*	170*	155+	170*
136+	170*	140+	170*	142+	170*
139+	170*	170*	170*	170*	170*
170*	170*	170*	170*	170*	170*
170*	170*	122+	170*	146+	170*
128+	170*	170*	170*	170*	170*
170*	170*	130+	170*	170*	170*

+ – пробой в головке

* – изолятор не пробился

Неоднородность диэлектрика обусловлена недостаточной гомогенизацией стекломассы в процессе варки. Влияние этого фактора исследовались на образцах из щелочного стекла, используемого на изоляторных заводах. Образцы представляли собой плоские диски диаметром (200±10) мм, толщиной (10±2) мм и сферическим углублением в центре. Толщина наиболее тонкой части стекла составляла (6±1) мм. Сравнивались две группы образцов с допустимой (1,8 °С) и недопустимой (6,8 °С) степенью однородности стекла. Для испытаний отбирались образцы без видимых дефектов в стекле в области углубления. Углубление образцов заполнялось цементно-песчаной связкой, и при испытании связка присоединялась к высоковольтному электроду.

С противоположной стороны на стекло наклеивалась алюминиевая фольга диаметром 40 мм. К ней присоединялся заземленный электрод такого же диаметра. Испытания показали высокую устойчивость образцов, существенно отличающихся по степени однородности стекла. Из 40 испытанных ни один образец не был пробит при импульсном воздействии с крутизной фронта 2 500 кВ/мкс и при приложении напряжения 100–110 кВ промышленной частоты, по величине близкой величине напряжения перекрытия образцов в испытательной среде.

Проведенные испытания показали, что реальная удельная электрическая прочность щелочного стекла при напряжении промышленной частоты превышает, по крайней мере, 220 кВ/см, что значительно превышает напряженность поля в диэлектрике изолятора при нормированном напряжении.

В то же время прямая зависимость результатов испытания изоляторов от характерных видимых дефектов в стекле (скол стекла, газовые включения (пузыри), посечки, следы от отреза ножниц, кованость, складки) не наблюдалась. Исключение составляли дефекты стекла в виде инородных твердых включений. Установлено, что в случае дислокации этих дефектов в головной части стеклodela, достаточно вероятны повреждения изоляторов при напряжениях, ниже нормированных. Следуя

[4], из упомянутых дефектов наибольший интерес представляют инородные включения в стекле, другими, упомянутыми выше, дефектами стекла, в условиях выполненных нами исследований, можно пренебречь.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Известные гипотезы и теории электрического пробоя можно разделить на две группы:

- базирующиеся на механическом начале пробоя диэлектрика;
- имеющие в качестве критерия пробоя рассматривают стадию нарушения электрической прочности.

Как известно, по Гриффитсу [5] зависимость предельной прочности твердого тела $\sigma_{пр}$, на поверхности которого имеются микротрещины глубиной λ т механических характеристик материала, имеет вид:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\frac{8\nu M}{\pi\lambda(1+\mu)}}, \quad (1)$$

где M, μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно;
 ν – коэффициент поверхностного натяжения.

Диэлектрик, находящийся в электрическом поле E , испытывает давление, определяемое формулой [6, 7]:

$$\rho = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{2} E^2, \quad (2)$$

где $\varepsilon, \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;
 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная.

Полагая, $\sigma_{пр} = \rho$, получаем соотношение для первичной оценки критической напряженности поля, при которой возможен разрыв стекла под действием электрического поля:

$$E_{кр} = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \sqrt{\frac{8\nu M}{\pi\lambda(1+\mu)}}}, \quad (3)$$

Подставляя в (3) усредненные значения параметров отожженного стекла: $\nu = 510-9$ Дж/м²; $M = 7,5 \cdot 10^{10}$ Па; $\mu = 0,3$; $\lambda = 20 \div 30 \cdot 10^{-6}$ м, получим:

$$E_{кр} \sim 1 \cdot 10^6 \text{ кВ/см}, \quad (4)$$

что достаточно близко к значению теоретической прочности твердых диэлектриков.

Для достижения такой напряженности поля в бездефектном изоляторе потребовалось бы приложить к изолятору, например, при испытании напряжением промышленной частоты, порядка 700 кВ действующего значения. Но в случае, если в приповерхностном слое имеются проводящие или слабопроводящие микровключения, то, как и в [4], они могут выполнять функцию локальных усилителей напряженности поля в стекле.

На рис. 1 приведены результаты численных исследований электрического поля в окрестности инородных включений в приповерхностном слое стекла для случая, когда они вытянуты вдоль силовых линий поля в головке стеклотетали. Приведенные графические зависимости усиления локального поля проявляются явно, если включения обладают электропроводящим свойством. Максимальное усиление имеет место при удельном сопротивлении $\rho_{вкл} \leq 1 \cdot 10^4$ Ом·м, и в первом приближении эту величину можно оценить по известной геометрии инородного тела, исходя из эмпирической формулы:

$$K_{ЭМ} = 1 + (h/r)^{0,95}, \quad (5)$$

где h, r – длина и радиус включения соответственно, в мм.

Таким образом, существует вероятность того, что максимальная напряженность поля E_m в локальных точках в диэлектрике изолятора при относительно невысоких напряжениях может превысить критическое значение (4). Абсолютная величина E_m зависит от характеристики включения, а также от места его расположения. Наиболее напряженными участками в стеклотетали являются области края головки стержня и торца шапки изолятора. Следовательно, наибольшую опасность представляют включения, расположенные вблизи этих участков головки изоляционной детали.

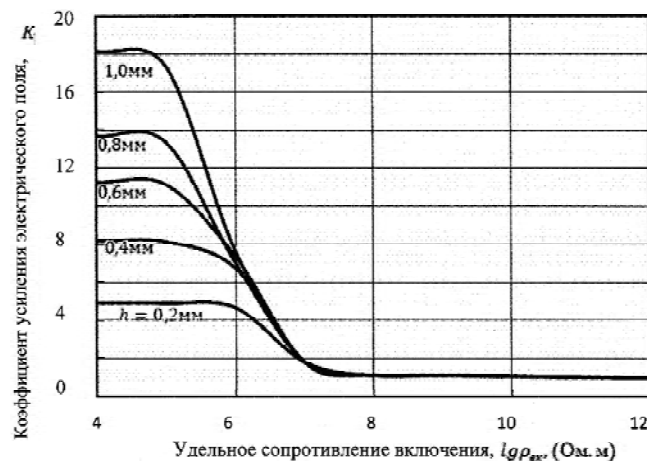


Рисунок 1 – Кратность усиления поля в стекле в окрестности включения (радиус включения, $r = 0,05$ мм).

Инородные включения на внутренней и на внешней поверхностях головки изоляционной детали могут возникать в процессе формирования стеклянного изделия. Источниками электропроводящих загрязнений могут быть углеродсодержащие смазочные материалы, используемые при прессовке стеклотеталей. Кроме того, формирующий элемент может внести собственное загрязнение в поверхностный слой стекла.

На фотографии рис. 2 запечатлен фрагмент стекла с характерными следами отложения продукта горения смазочного материала. В центральный участок литьевой формы, в котором формируется головка стеклотетали, перед падением стекломассы впрыскивают ацетилен, продукты горения которого выполняют функцию смазки. Можно предположить, что в момент падения стекломассы часть смазочного материала – сажа вытесняется наружу с большой скоростью и может образовать кольцевую канавку на поверхности стеклотетали вдоль сопряжения головка – тарелка. Такой дефект на поверхности стекла идентифицируется согласно ГОСТ18328 как складка, и глубина канавки может достигать нескольких сотен микрон. Не исключено, что продукты горения ацетилена в отдельных точках могут внедриться в тело стекла еще глубже, таким образом создавая дополнительные очаги локальной напряженности. Как показывают испытания, такого рода дефекты могут существенно увеличить вероятность пробоя изоляторов при напряжениях меньших, чем нормированное значение.

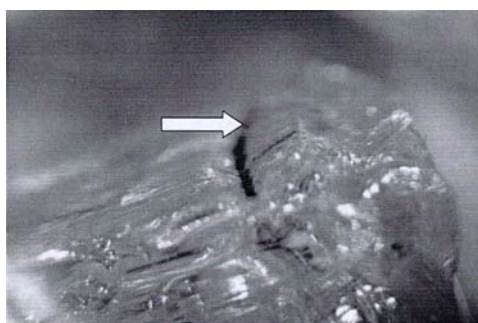


Рисунок 2 – Сажеобразное отложение в канавке-складке на стекле в районе сопряжения головка – тарелка.

Что касается механизма разрушения стеклянных изоляторов, то под воздействием высокого электрического поля, по-видимому, не столько имеет место разрыв стекла избыточным давлением (2), а сколько развитие локальных разрядных процессов в стекле, оканчивающихся электрическим пробоем. Такое предположение основывается на том обстоятельстве, что в выполненных нами исследованиях не было установлено сколько-нибудь весомых отличий в электрической прочности закаленных и отожженных стекол. Современная (в большей степени, качественная), теория пробоя [8] рассматривает электрический пробой как процесс возникновения и роста нитевидных структур (дендритов), обладающих высокой проводимостью и температурой (рис. 3).

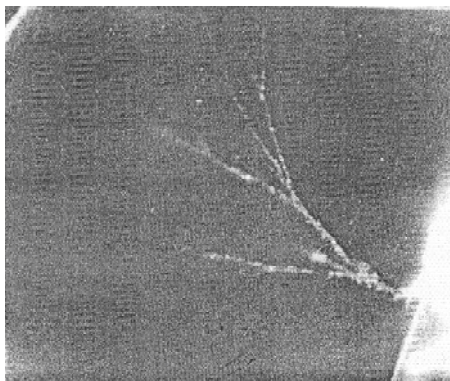


Рисунок 3 – Следы неполного пробоя в отоженном стекле.

Ток, проходящий через дендрит на этапе роста относительно не велик, соответственно температура газа в дендрите также не высока. Но после того, как дендрит пересечет диэлектрик, по образовавшемуся мостику проходит большой ток, что сопровождается нагреванием и расширением канала, приводящими к образованию макротрещин, к полному разрушению изолятора.

ВЫВОДЫ

Основываясь на результатах выполненных исследований, можно дать следующие рекомендации по стабилизации электрической прочности высоковольтных изоляторов:

- минимизировать возможность образования в приповерхностном слое стекла, в особенности на внутренней стороне головки изоляционной детали, а также на внешней поверхности сопряжения головка-тарелка микродефектов, приводящих к возникновению локальных областей с повышенной напряженностью электрического поля;
- к наиболее опасным дефектам, по нашему мнению, относятся инородные микровключения, обладающие проводящими или слабопроводящими свойствами, а также микротрещины или полуоткрытые воздушные поры, способные сорбировать влагу;
- источниками электропроводящих загрязнений могут быть углеродсодержащие смазочные материалы, используемые при прессовке стеклодеталей. При избыточном количестве продукты горения смазки могут способствовать образованию на поверхности микроуглублений, например, в виде складок, и конденсироваться в них. Не исключено, что электропроводящие загрязнения могут также проникнуть в приповерхностный слой стекла;
- образование микротрещин кроется в самой природе стекла и обуславливается его физико-механическими свойствами, но более глубокие трещины, именно на внутренней поверхности головки стеклодетали, скорее всего, могут зарождаться во время прессовки детали с пониженной температурой, формирующей детали;
- для минимизации областей электрически напряженных очагов необходимо исключить технологически образованных им дефектов на поверхности стекла в головной части стеклодеталей и ее окрестности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрин, Э. А. Показатели надежности изоляторов на ВЛ СВН [Текст] / Э. А. Тюрин // Электрические станции. – 1995. – № 4. – С. 29–34.
2. Эдельман, В. Н. Надежность воздушных линий электропередачи 35–750 кВ [Текст] / В. Н. Эдельман. – М. : Информэнергия, 1983. – 52 с.
3. Aro, M. On factors affecting the reproducibility of impuls voltage puncture test on insulators in air [Текст] / M. Aro, J. Huhdanmaki, M. Kokkonen // SANHO Electricity and Electronics 61. – 1988. – 6. – P. 36–41.
4. Ким, Ен Дар Исследование устойчивости стеклянных изоляторов к воздействию высокого напряжения [Текст] / Ен Дар Ким // Энергетика и электрификация. – 1996. – № 3. – С. 40–42.
5. Разрушение [Текст] : Пер. с англ. Т. 4. / Под ред. Г. Либовиц. – М. : Машиностроение, 1977. – 400 с.
6. Вершинин, Ю. Н. Электрический пробой твердых диэлектриков [Текст] / Ю. Н. Вершинин. – Новосибирск : Наука, 1968. – 211 с.
7. Сканави, Г. Н. Физика диэлектриков [Текст] / Г. Н. Сканави. – М. : Физмат, 1958. – 907 с.

8. Arbab, M. Growth of electrical trees in solid insulation [Текст] / M. Arbab, D. W. Auckland // IEEE Proc. – 1989. – 136, № 2. – P. 73–78.

Получено 09.01.2014

КИМ ЄН ДАР ^a, Б. П. ГОРДІЄВИЧ ^b, В. І. КОВАЛЬОВ ^c, С. М. ЦУРАК ^b
ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ЕЛЕКТРИЧНУ МІЦНІСТЬ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ СКЛЯНИХ ІЗОЛЯТОРІВ

^a Українська інженерно-педагогічна академія, ^b ЗАТ «Південноуральська міжрегіональна електротехнічна компанія», ^c Донбаський державний педагогічний університет

Встановлено, що чужорідні мікрровключення з тими, що проводять або слабо-провідними властивостями, а також мікротріщини або напіввідкриті повітряні пори здатні сорбувати вологу, є найбільш суттєвими дефектами в склі, що впливають на електричну міцність високовольтних ізоляторів. Дані рекомендації по контролю технологічних параметрів з метою мінімізації таких вад.
високовольтний скляний ізолятор, технологія, електрична міцність, провідні чужорідні мікрровключення, напіввідкриті мікропори

KIM EN DAR ^a, BOGUSLAV GORDIEVICH ^b, VOLODIMIR KOVALEV ^c,
SVETLANA ZURAK ^b
INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE DIELECTRIC
STRENGTH OF THE HIGH-VOLTAGE GLASS INSULATORS

^a Ukrainian Engineer-Pedagogical Academy, ^b LTD «South Ural Interregional Electrical Engineering Company», ^c Donbas State Pedagogical University

Foreign micro inclusions with conducting or low-conducting properties, as well as micro-cracks or semi-open air pores that can absorb moisture are the most significant defects in the glass, affecting the electrical strength of high-voltage insulators have been determined. Recommendations for the control of process parameters in order to minimize such defects have been given.

high-voltage glass insulator, technology, electric durability, on the electrical conductive foreign micro inclusions, semi-open air pores

Кім Єн Дар – доктор технічних наук, професор кафедри загально-інженерних дисциплін Української інженерно-педагогічної академії. Наукові інтереси: електрофізика, техніка високої напруги, високовольтна ізоляція.

Гордієвич Богуслав Павлович – генеральний директор ЗАТ «Південноуральська міжрегіональна електротехнічна компанія». Наукові інтереси: високовольтна лінійна ізоляція.

Ковальов Володимир Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри математики Донбаського державного педагогічного університету. Наукові інтереси: фізика твердих тел.

Цурак Світлана Михайлівна – старший викладач кафедри електромеханічних систем Української інженерно-педагогічної академії. Наукові інтереси: високовольтна лінійна ізоляція.

Кім Єн Дар – доктор технических наук, профессор кафедры общинженерных дисциплин Украинской инженерно-педагогической академии. Научные интересы: электрофизика, техника высоких напряжений, высоковольтная изоляция.

Гордиевич Богуслав Павлович – генеральный директор ЗАО «Южноуральская межрегиональная электротехническая компания». Научные интересы: высоковольтная линейная изоляция.

Ковалев Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры математики Донбасского государственного педагогического университета. Научный интерес: физика твердых тел.

Цурак Светлана Михайловна – старший преподаватель кафедры электромеханические системы Украинской инженерно-педагогической академии. Научные интересы: высоковольтная линейная изоляция.

Kim En Dar – DSc (Eng.), Professor, General Engineering Disciplines Department, the Ukrainian Engineer-Pedagogical Academy. Scientific interests: electro physics, high-voltage technique, high-voltage isolation.

Gordievich Boguslav – general director of LTD «South Ural Interregional Electrical Engineering Company». Scientific interests: high-voltage isolation.

Kovalev Volodimir – PhD (Eng.), Associate Professor, Mathematics Department, Donbas State Pedagogical University. Scientific interest: solids physics.

Zurak Svetlana – senior teacher, Electro Mechanics Systems Department, Ukrainian Engineer-Pedagogical Academy. Scientific interests: high-voltage linear isolation.