

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анализ** причин технологических нарушений в работе электроустановок. Ежегодные выпуски. — М.: Союзтехэнерго. Служба передового опыта ОРГРЭС, 1990–1998, 2001.
2. **Анализ** нарушений в работе электроустановок и рекомендации персоналу. Ежегодные выпуски. — М.: Союзтехэнерго. Служба передового опыта ОРГРЭС, 1990–1995.
3. **Верещагин И.П., Калинин А.В.** Новые подходы в обеспечении молниезащиты воздушных линий и подстанций. — Новое в российской электроэнергетике, 2004, № 3.
4. **Воротницкий В.Э.** Повышение эффективности управления распределительными сетями. — Энергосбережение, 2005, № 10: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=3046](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3046)
5. **Правила** устройства электроустановок (извлечение). — М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2005.
6. **Правила** устройства электроустановок. Минэнерго СССР. 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. **Инструкция** по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей. РД 34.20.801-2000. — М.: ЗАО «Энергосервис», 2001 г.

8. РД 153-34.3-35.125–99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений/Под ред. Н.Н. Тиходеева. — СПб: Изд-во ПЭИПК, 1999.

9. **Методические** указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ от грозových перенапряжений. — М.: Изд-во ОАО «РОСЭП», 2004.

*Авторы: Верещагин Игорь Петрович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1955 г. В 1975 г. защитил докторскую диссертацию «Методы расчета электрического поля и поведения частиц при униполярном коронном разряде» в МЭИ. Профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений МЭИ.*

*Ильина Елена Валентиновна окончила Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2002 г. Ведущий специалист Центральной службы диагностики ОАО «Московская объединенная электросетевая компания».*

\* \* \*

## Об особенностях воздействия поверхностного разряда на диэлектрические барьеры<sup>1</sup>

ЛАЗУКИН А.В., МИТИН А.Н., СОКОЛОВА М.В., КРИВОВ С.А.

*Представлены экспериментальные результаты воздействия поверхностного разряда на диэлектрические барьеры с разным составом поверхностного слоя. Установлено, что характер повреждения поверхности находится в зависимости от химического состава и структуры материала барьера. При этом у разных барьеров повреждения возникают при разном времени воздействия разряда. Изменение поверхностных свойств барьера ведет, в свою очередь, к изменению характеристик поверхностного разряда.*

**Ключевые слова:** *поверхностный разряд, диэлектрический барьер, повреждение поверхности барьера, время действия разряда*

Первое направление изучения поверхностного разряда (ПР) было связано с необходимостью его предотвращения на элементах электротехнических устройств, для которых появление разряда по поверхности изоляционной конструкции вело к нарушению целостности изоляции. Еще в начале прошлого века в работах Теплера была установлена связь напряжения возникновения ПР и напряже-

*Results from experiments on studying the effect of surface discharge on dielectric barriers having different compositions of their surface layers are presented. It is found that the nature of damage inflicted to the barrier surface depends on the chemical composition and structure of the barrier material. It is also found that the time taken to inflict damage to a barrier due to discharge is different for different barriers. A change in the surface properties of a barrier entails a change in the characteristics of surface discharge.*

**Key words:** *surface discharge, dielectric barrier, damage of barrier surface, discharge action time*

ния его перехода в скользящий разряд с параметрами диэлектрического барьера, вдоль которого может развиваться поверхностный разряд. Было установлено, что указанные напряжения зависят от толщины барьера и значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  материала барьера.

В дальнейшем возникло новое направление изучения ПР, связанное с использованием такого разряда в электротехнологиях. Сегодня ПР находит широкое применение в различных электротехнологических устройствах в качестве источника заряженных и химически активных частиц [1], для мо-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Проекта 2.1.2/13478 АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» Минобразования РФ.

дификации поверхностей материалов [2, 3], а также в медицине [4] и ряде других областей. Одним из наиболее распространенных устройств на базе ПР является генератор озона, имеющий широкий спектр применения.

В технологических устройствах используют ПР при воздействии переменного напряжения повышенной частоты (от 1 до 20 кГц) в начальной стадии существования разряда, когда он не перешел еще в стадию скользящего разряда, сопровождающуюся выделением большого количества тепла, что нарушает целевой технологический процесс.

В последнее время внимание к исследованию ПР заметно возросло, что связано с расширением спектра его применения, с необходимостью оптимизации уже разработанных технологий и с появлением новых диэлектрических материалов. Круг диэлектрических материалов, используемых в качестве барьера в уже разработанных технологиях и при проведении исследований, результаты которых приводятся в литературе, весьма широк: – боросиликатное и кварцевое стекло, керамика на основе двуокси алюминия, полимерные материалы, например оргстекло. В ряде случаев используют комбинированные барьеры, у которых на поверхность основного материала, например керамики, нанесен тонкий слой другого диэлектрического материала. Работа таких комбинированных барьеров рассмотрена, например, в [5], где показано существенное влияние внешнего слоя барьера на структуру и характеристики поверхностного разряда. Однако при развитии разрядных процессов происходит и обратное действие разряда на поверхность барьера. В статье рассмотрены возможные механизмы воздействия ПР в воздухе на диэлектрический барьер и характер разрушения поверхности барьера в зависимости от его материала.

**Особенности работы диэлектрического барьера при воздействии поверхностного разряда.** Условия воздействия ПР на барьер отличны от условий воздействия на поверхность барьера объемного барьерного разряда, который развивается в газовом промежутке между электродами, а диэлектрический барьер расположен на поверхности одного из электродов. Подобные условия характерны, например, для электродной системы генераторов озона. В электродной системе, в которой формируется объемный барьерный разряд, приложенное внешнее поле имеет четко выраженную нормальную к поверхности барьера составляющую, и разряд развивается по направлению силовых линий, перпендикулярных к барьеру. При ПР напряженность поля вдоль силовых линий, по которым возможно развитие разряда, имеет значительную тангенциальную составляющую. Нормальная составляющая

при этом существенно меньше, чем при объемном барьерном разряде. В тех местах, где каналы поверхностных микрозарядов доходят до поверхности барьера, кинетическая энергия заряженных частиц, передаваемая поверхности, снижена из-за меньшей нормальной напряженности поля. В результате уменьшается вероятность разрушения поверхности барьера, наблюдаемая при барьерном разряде после определенного срока работы. Тем не менее, и в процессе длительной работы под действием ПР возможно нарушение внешней поверхности барьера, что может привести как к изменению характеристик разряда, так и к изменению изоляционных свойств барьера.

Многими экспериментальными исследованиями установлено, что ПР при переменном напряжении как в положительный, так и в отрицательный полупериод представляет собой совокупность дискретных микрозарядов, создающих импульсы тока в электрической цепи. Длительность импульсов тока микрозарядов оценивается в 10 нс. В газе, где возникает и формируется поверхностный разряд при нормальных условиях, каждый микрозаряд имеет канальную форму. С повышением напряжения длина каналов возрастает, начинается их ветвление. Установлено [6], что каналы микрозарядов возникают от края электрода и сначала развиваются в газе на расстоянии до 1,0 мм от поверхности барьера и лишь на расстоянии более 1–2 мм от края электрода (в зависимости от приложенного напряжения) доходят до поверхности барьера. Подобное расположение каналов в каждый полупериод приложенного напряжения связано с воздействием поля зарядов, остающихся на поверхности барьера от микрозарядов в предыдущий полупериод.

Развитие микрозарядов у поверхности барьера сопровождается целым рядом электрофизических и плазмохимических процессов [7], многие из которых идут с «участием» поверхности барьера. При длительном воздействии микрозарядов на поверхность барьера может происходить деструкция (модификация) поверхности, что не только меняет поверхность, но и влияет на характеристики разряда.

Для определения и анализа факторов, определяющих подобное влияние, было проведено экспериментальное исследование характера изменения поверхности барьеров из разных материалов после воздействия разряда. К числу факторов, которые могут повлиять на барьер при горении разряда, могут быть отнесены:

мощность разряда, определяемая рабочим напряжением и его частотой и определяющая интенсивность микрозарядов; при этом амплитуда и длительность импульсов тока микрозарядов, в

свою очередь, зависят от материала диэлектрического барьера, структуры его поверхности, конфигурации электродной системы и параметров источника питания;

энергия, передаваемая поверхности барьера при горении разряда, которая определяется мощностью и временем воздействия разряда и идёт на изменение внутренней энергии частиц, образующих поверхность барьера; это изменение энергии выражается в увеличении их кинетической энергии частиц, что приводит к нагреву диэлектрика, особенно характерному для материалов кристаллической структуры с высокой энергией связи частиц, таких как керамические материалы; увеличение кинетической энергии частиц может привести к разрыву межмолекулярных связей, что весьма характерно для полимерных материалов, обладающих относительно невысокой энергией связи макромолекулы, и к изменению структуры поверхности, что наблюдается у материалов с аморфной структурой, например у стекол;

характеристики газовой среды, в которой развивается поверхностный разряд (род газа, его давление, влажность и температура).

Для определения характера изменения свойств барьера под действием поверхностного разряда в работе поддерживались неизменными внешние факторы, определяющие разряд: воздействующее напряжение, газовая среда и электродная система. Это позволяло определить характер воздействия разряда на поверхность в зависимости только от материала барьера.

**Экспериментальные условия.** Были исследованы материалы, широко применяющиеся в настоящее время в электротехнологических устройствах в качестве барьеров. К числу таких материалов могут быть отнесены: керамика 22ХС на основе диоксида алюминия с покрытием слоем стеклоэмали, та же керамика с нанесенной на ее поверхность пленкой диоксида титана  $TiO_2$ , ситалл с нанесенной пленкой диоксида титана и полиметилметакрилат (как представитель полимерных материалов). Стеклоэмаль часто используется для защиты коронирующих электродов от эрозии при горении поверхностного разряда в генераторах озона. Диоксид титана, являющийся фотокатализатором, находит все большее применение в разных устройствах и при изготовлении комбинированных барьеров. Пленка  $TiO_2$  наносится на поверхность керамической пластины и пластины ситалла методом высокочастотного ионно-плазменного распыления.

Объектом исследования в данном случае являлась поверхность диэлектрического барьера, подвергавшаяся длительному воздействию поверхност-

ного разряда. Эксперименты проводились с использованием атмосферного или осушенного воздуха с влажностью не более 1%. В качестве барьеров использовались диэлектрические пластины размерами 40×60 мм и толщиной от 1,0 до 1,1 мм, на поверхность которых нанесены электроды в виде тонкого металлического слоя толщиной 30–50 мкм. Слой стеклоэмали и пленка диоксида титана нанесены поверх поверхности пластин, включая электроды. На рис. 1 приведена использованная электродная система. Исследуемый образец электродной системы помещался в закрытую ячейку, через которую поддерживался поток воздуха с расходом 1 л/мин.

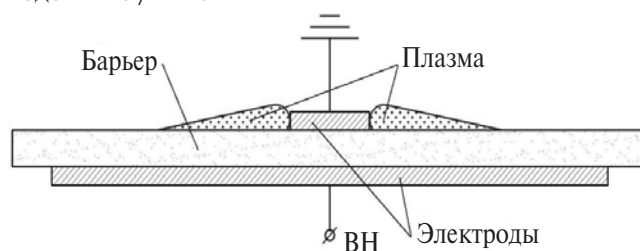


Рис. 1. Электродная система

В общем случае под поверхностным разрядом понимается электрический разряд, развивающийся в газе с краёв электрода, расположенного на поверхности диэлектрического барьера. Поверхностный разряд в использованной электродной системе образуется лишь на заземленном электроде (коронирующем) с меньшими размерами, а высоковольтный электрод расположен на противоположной стороне пластины. Края высоковольтного электрода закрыты слоем эпоксидного компаунда для предотвращения возникновения там разряда. Разряд инициируется переменным напряжением, подаваемым от источника питания повышенной частоты (14 кГц). Рабочее напряжение было кратностью  $K=1,4, 1,5$  по отношению к начальному напряжению зажигания разряда. Это позволяет создать во всех случаях одинаковую мощность воздействия разряда на поверхность барьера.

**Воздействие разряда на поверхность стеклоэмали.** Для оценки возможных изменений структуры поверхности под действием поверхностного разряда исследовалась поверхность образцов из керамики, покрытой слоем стеклоэмали толщиной около 300–400 мкм, с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа OLYMPUS LEXT OLS 3100, оснащенного компьютером. Проводился анализ поверхности до и после воздействия поверхностного разряда. Особенностью работы с микроскопом OLYMPUS LEXT в отличие от сканирующих электронных микроскопов является то, что исследуемый образец помещается непосред-



венно под объектив без предварительной подготовки, без сломов и надрезов. Кроме этого, измерительный комплекс микроскопа позволяет проводить обработку полученных данных, включающую удаление паразитного шума, возникающего при сканировании поверхности.

Поверхность стеклоэмали подвергалась воздействию разряда в общей сложности в течение 30 ч. При этом эксперименты проводились с перерывами, время непрерывной работы составляло 3–4 ч. Охлаждения барьера не проводилось.

На рис. 2 приведена полученная с помощью микроскопа с 20-кратным увеличением фотография поверхности стеклоэмали у края электрода до и после воздействия разряда. На фотографиях четко видно, что после воздействия разряда происходит нарушение гладкой структуры поверхности в местах наиболее интенсивного разряда. Образующиеся выступы имеют высоту до 5 мкм.

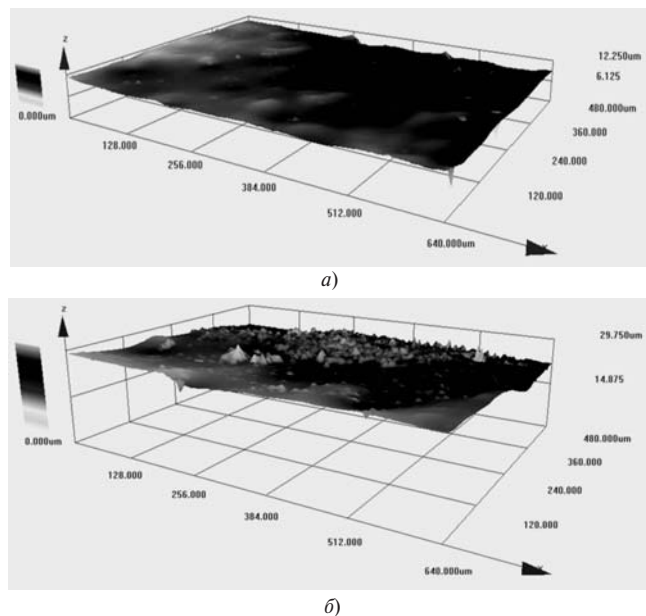


Рис. 2. Поверхность стеклоэмали, нанесенной на пластину керамики 22ХС, до (а) и после (б) воздействия поверхностного разряда

Исследования разряда по поверхности керамических пластин с разной степенью шероховатости [8] показали, что увеличение шероховатости ведет к повышению интенсивности поверхностных микроударов. Увеличение шероховатости поверхности стеклоэмали, полученное в описанных экспериментах, означает, что при дальнейшей работе интенсивность разряда в рассматриваемой области будет возрастать, что приведет к еще более интенсивному разрушению поверхности.

**Воздействие разряда на поверхность оргстекла.** Для анализа воздействия поверхностного разряда на полимерные материалы исследовались повреждения поверхности образцов оргстекла (ПММА –

линейный полимер метилметакрилата), представляющих собой пластины толщиной 1 мм с нанесенными на их поверхности электродами толщиной 50 мкм. Воздействие разряда на поверхность образца происходило в течение часа при кратности рабочего напряжения до  $K=1,5, 1,7$ . Исследовался поверхностный разряд в атмосферном воздухе. Известно, что удельное поверхностное сопротивление оргстекла велико (более  $10^{15}$  Ом) и не меняется при изменении влажности окружающей среды. Анализ поверхности оргстекла после воздействия поверхностного разряда проводился с помощью интерферирующего микроскопа МИИ-4. На рис. 3 показана поверхность оргстекла после воздействия на нее разряда при 70-кратном увеличении. Видны кратеры (каверны), образовавшиеся вблизи края электрода, причем глубина каверны непосредственно у края коронирующего электрода может достигать 40 мкм. Вдали от края электрода (на расстоянии более 1 мм) степень разрушения поверхности существенно ниже, разрушения представляют собой небольшие точечные углубления на поверхности оргстекла, т.е. своего рода треки, оставляемые микроударными.

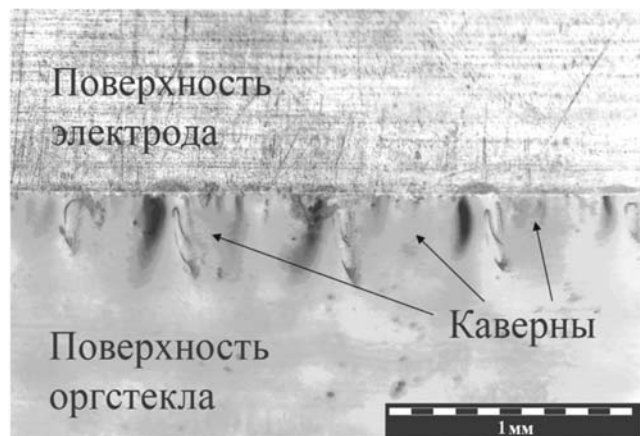


Рис. 3. Внешний вид барьера из ПММА после разряда

Можно предположить, что при воздействии разряда за счет передаваемой энергии верхние слои оргстекла на глубину порядка десятка микрометров модифицируются: происходит сшивание и деструкция цепей полимера, а при продолжительном воздействии и эрозия поверхности [9].

Кроме того, из-за достаточно низкой теплопроводности оргстекла, составляющей  $0,1-1$  Вт/(мжрад), повреждения поверхности могут быть вызваны локальным нагревом, приводящим к снижению степени полимеризации поверхностного слоя барьера.

Установленный сложный характер повреждения поверхности оргстекла связан с внешней структурой микроударов. Как показано, например, в [5],

каждый поверхностный микроразряд в газе при нормальных условиях имеет четко выраженный канал у края электрода, а затем имеет место интенсивное ветвление канала. Аналогичная структура микроразрядов наблюдается и по поверхности оргстекла (рис. 4).

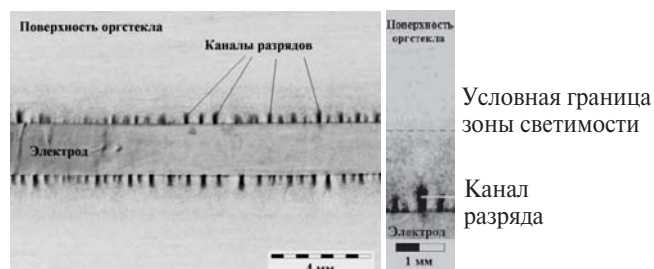


Рис. 4. Микроразряды по поверхности оргстекла (фото)

Картина повреждения поверхности оргстекла у края электрода, представленная на рис. 3, соответствует структуре микроразряда. С энергией канала микроразряда связано наибольшее разрушение поверхности, в то время как ветви оказывают меньшее воздействие в результате меньшей энергии, выделяющейся при их развитии.

Таким образом, поверхность оргстекла достаточно легко модифицируется поверхностным разрядом вследствие относительной слабости связей в макромолекулах.

**Воздействие разряда на поверхность барьеров с пленкой диоксида титана.** Влияние разряда на поверхность барьера с пленкой исследовалось на двух образцах, из которых один изготовлен на базе пластины из керамики 22ХС, второй – на базе пластины ситалла С50-1 с шероховатой поверхностью. На поверхность каждой пластины нанесена пленка диоксида титана толщиной около 100 нм. Анализ структуры поверхности барьера с помощью сканирующего микроскопа OLYMPUS LEXT показывает, что нанесение пленки не меняет исходной шероховатости поверхности пластин. Обычно шеро-

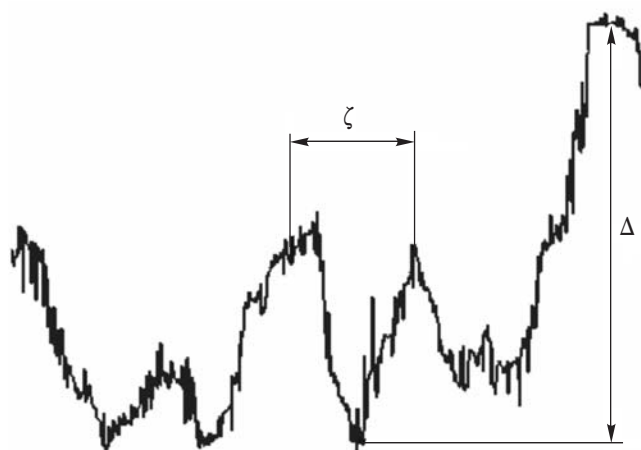


Рис. 5. Вид структуры поверхности

ховатость поверхности характеризуется такими величинами, как перепад высот между выступом и впадиной на поверхности  $D$ , зернистость  $z$ , т.е. расстояние вдоль поверхности между двумя соседними выступами (рис. 5) и среднеквадратичная шероховатость  $h$ , характеризующая неоднородность поверхности в целом.

Далее представлены данные по структуре поверхности барьеров из керамики и ситалла с пленками диоксида титана:

Материал поверхности барьера	Параметры структуры, мкм		
	$D$	$z$	$h$
Керамика с покрытием $TiO_2$	3	15	0,70
	3	15	0,70
Ситалл без покрытия	5	20	0,75
	5	20	0,75

Здесь  $D$  – максимальный перепад высоты между выступом и впадиной на поверхности, определенный из более чем 600 значений;  $z$  – среднеарифметическое значение расстояния между соседними выступами на поверхности;  $h$  – усредненный разброс значений высоты выступов и глубины впадин поверхности; значение определено при математической обработке данных по структуре поверхности, полученных с помощью микроскопа OLYMPUS LEXT. Из приведенных данных видно, что покрытие вследствие его малой толщины не изменяет профиль поверхности барьера.

Исследование обоих образцов барьера с пленкой на поверхности проводилось в осушенном воздухе при кратности рабочего напряжения  $K=1,4$ . При анализе состояния поверхности барьеров было установлено, что после воздействия на барьер разряда в течение 10 ч на поверхности обоих образцов выявлена область потемнения, напоминающего налет. Потемнение находится на расстоянии около 1 мм от края электрода, и в случае керамического барьера с протяженным электродом ширина полосы потемнения примерно равна ширине светящейся области разряда, равной 1 мм (рис. 6).

Такое же потемнение на поверхности пленки диоксида титана вследствие длительной работы в условиях поверхностного разряда наблюдалось и на барьере из ситалла С50-1.

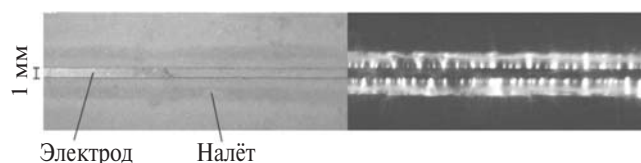


Рис. 6. Внешний вид барьера с покрытием после работы под разрядом (слева) и фотография разряда (справа) по поверхности с налетом при  $U=2,5$  кВ

Анализ образовавшегося потемнения показал, что появившийся налет не меняет структуры поверхности. На рис. 7 приведены фотографии поверхности, полученные с помощью микроскопа с 50-кратным увеличением и показывающие неизменность внешней структуры поверхности барьера после воздействия разряда. Несмотря на неизменность внешней структуры барьера, после воздействия разряда в течение 10 ч произошло изменение внешнего вида самого разряда (рис. 6). Разряд оказался ограниченным по длине каналов областью от электрода до полосы образовавшегося потемнения. Увеличение приложенного напряжения при этом ведет к «растеканию» области вдоль полосы налета, который как бы препятствует распространению разряда по его поверхности. Аналогичное изменение структуры разряда после появления налета на поверхности барьера имеет место и для барьера из ситалла с пленкой  $TiO_2$ .

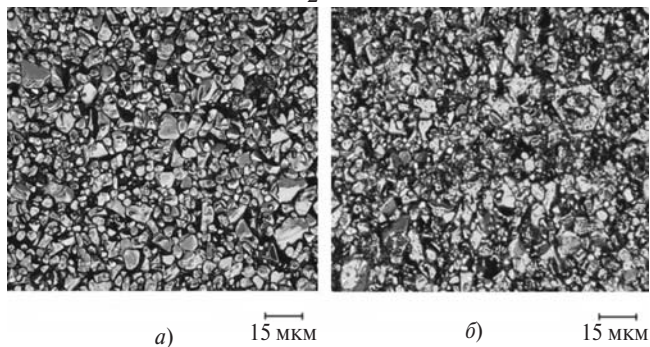


Рис. 7. Структура поверхности керамики 22ХС с покрытием диоксидом титана до (а) и после (б) воздействия разряда

Так как структура поверхности барьера не изменилась после воздействия разряда, то изменение его структуры, вероятнее всего, вызвано изменением свойств плёнки диоксида титана, покрывающей поверхность керамики. В [10] было выявлено, что при воздействии на диоксид титана излучения с длиной волны 190 нм происходит фазовый переход в материале от анатазной к рутильной форме. Можно предположить, что этот эффект имеет место и в плёнке диоксида титана в случае поверхностного разряда, поскольку развитие микроразрядов сопровождается интенсивным излучением, в том числе и коротковолновым. Так как развитие микроразряда, имеющего каналный стримерный характер, происходит с интенсивным излучением вблизи головки стримера, то длительное горение разряда может привести к фазовым переходам в диоксиде титана вблизи границы области, занятой плазмой поверхностных каналов. Фазовый переход от анатазной к рутильной форме диоксида титана возможен также при очень интенсивном нагреве [11] диоксида титана (около 150 °С). В нашем случае столь интенсивный нагрев не был зафиксиро-

ван. Однако возможно совместное действие некоторого локального нагрева и излучения, что может также привести к фазовому переходу в плёнке диоксида титана.

Таким образом, в отличие от стеклоэмали, на поверхности керамики и ситалла с плёнкой из диоксида титана не происходит заметного изменения профиля поверхности. Но, тем не менее, в результате воздействия ПР происходит изменение химических характеристик покрытия, что влияет на характеристики разряда.

**Заключение.** В результате проведённых исследований выявлено, что воздействие ПР на поверхность барьера определяется во многом материалом, из которого он состоит. Так, поверхность стеклоэмали, имеющей аморфное строение, разрушается, что приводит в конечном итоге к увеличению шероховатости поверхности и изменению параметров разряда. Поверхность керамики или ситалла с характерной кристаллической решёткой не изменяется под действием ПР вследствие сильных межатомных связей. Однако тонкая диэлектрическая плёнка, покрывающая поверхность, может достаточно сильно меняться под действием разряда, что отчётливо заметно на примере покрытия из диоксида титана, обладающего способностью изменять порядок атомов в кристаллической решётке под действием излучения, приходящего на его поверхность. В результате изменяются свойства покрытия (цвет, диэлектрическая проницаемость и др.), что также приводит к изменению параметров ПР. Поверхность полимерных материалов модифицируется наиболее сильно: на ней образуются каверны глубиной до 40 мкм вблизи электрода и треки от микроразрядов в местах их наибольшей интенсивности.

Все эти виды воздействий разряда на поверхностный слой барьера должны учитываться при выборе материала и параметров работы технологических устройств в той или иной области промышленности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bucek A., Homola T., Aranyosiova M. et al. Atmospheric pressure nonequilibrium plasma treatment of glass surface. — II Central European Symposium on Plasma Chemistry, 2008.
2. Kim H., Kang W., Hong S. Metal Surface Treatment for Enhancement of Hydrophilic Property Using Atmospheric-Pressure Dielectric Barrier Discharge. — Proc. of 19th ISPC, Bochum, 26–31 July, 2009, P. 1.3.18.
3. Vyhnalikova J., Polachova L., Krcma F. et al. Decomposition of VOC in surface discharge combined with photocatalysis. — Proc. of 19th ISPC, Bochum, 26–31 July, 2009. P2.14.18
4. Hong Y., Seo Y., Lee H. et al. Non-thermal atmospheric pressure plasma sources for biomedical applications. — Proc. of 19th ISPC, Bochum, 26–31 July, 2009, P3.13.05.

5. Sokolova M.V., Kozlov K.V., Krivov S.A. et al. The influence of dielectric films on the macro- and microscopic properties of the barrier surface discharges. – Proc of Int. Symp. on Low Temperature High Pressure Plasma Chemistry (NAKONE 12)? Slovakia, 2010, vol. 1.

6. Соколова М.В., Козлов К.В., Кривов В.Г. и др. Исследование излучения поверхностного разряда в сухом воздухе. – Письма в ЖТФ, 2009, т. 35, вып. 5.

7. Соколова М.В., Темников А.Г., Кривов С.А. О механизме взаимодействия поверхностного электрического разряда с диэлектрическим барьером. – Электричество, 2010, №7.

8. Sokolova M., Hulka L., Pietsch G. Influence of a Bias Voltage on the Characteristics of Surface Discharges in Dry Air. – Plasma Processes and Polymers, 2005, vol. 2.

9. Багиров М.А., Малинин В.П., Абасов С.А. Воздействие электрических разрядов на полимерные диэлектрики. – Изд-во Элм, 1975.

10. Митрев. П., Бенвенути Дж. и др. Фазовые переходы в тонких плёнках оксида титана под действием излучения эксимерного лазера. – Письма в ЖТФ, 2005, т. 31, вып.21.

11. Ахметов Т.Г., Порфирьева Р.Т., Гайсин Л.Г. и др. Химическая технология неорганических веществ. Кн. 1/Под ред. Т.Г. Ахметова. – М.: Высшая школа, 2002.

*Авторы: Лазуткин Александр Вадимович окончил Институт электроэнергетики (ИЭЭ) Московского энергетического института (МЭИ) в 2011 г. Аспирант кафедры ТЭВН МЭИ.*

*Митин Алексей Николаевич окончил ИЭЭ МЭИ в 2010 г. Аспирант кафедры ТЭВН МЭИ.*

*Соколова Марина Владимировна окончила электроэнергетический факультет (ЭЭФ) МЭИ в 1960 г. В 1970 г. защитила кандидатскую диссертацию «Коэффициент ионизации и начальные напряжения в смесях простейших газов» в МЭИ. Ведущий научный сотрудник кафедры ТЭВН МЭИ.*

*Кривов Сергей Анатольевич окончил ЭЭФ МЭИ в 1980 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка научных основ электрической сепарации по проводимости» в МЭИ. Профессор кафедры ТЭВН МЭИ.*