

УДК 533.907:533.011

## ТЕРМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМЕННЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ

© 2022 г. Л. В. Фуров\*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых”, Владимир, Россия

\*E-mail: lfurov@vlsu.ru

Поступила в редакцию 17.01.2022 г.

После доработки 07.02.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

Выполнено термическое испытание поверхности диэлектрических материалов электроразрядной плазмой. Опыты проводились в свободной атмосфере. Представлено описание устройства, методики и результатов воздействия плазменного образования на поверхность ситалла.

DOI: 10.31857/S0367676522060138

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что тепловой удар возникает, когда под действием градиента температуры разные части нагреваемого образца расширяются на разную величину. При испытании тепловым ударом материал подвергается чередующемуся воздействию низкой и высокой температур для ускорения разрушительных процессов в материале. Исследования тепловых воздействий на материалы имеют обширную историю [1]. Прежде всего, это испытание изоляции и оболочек на стойкость к растрескиванию (испытание на тепловой удар) [2]. Этот стандарт устанавливает порядок проведения на стойкость изоляции и оболочек к растрескиванию при повышенной температуре. Он регламентирует испытание образцов при температуре  $150 \pm 3^\circ\text{C}$  в течение 1 ч. Также существуют способы испытания на тепловой удар в испытательных камерах. В таких камерах переход между экстремальными температурами происходит со скоростью  $15^\circ\text{C}/\text{мин}$ . С одной стороны это достаточно быстрый нагрев. С другой стороны – это очень большое время, так как при испытании таким тепловым ударом изделие подвергается чередующемуся воздействию низкой и высокой температур для ускорения разрушительных процессов в материале в результате циклического воздействия температуры или тепловых ударов в процессе его обычной эксплуатации. В настоящей работе предлагается однократное тепловое воздействие на поверхность диэлектрического материала в течение относительно короткого промежутка времени  $\approx 0.1$  с плазменным образованием (электроразрядной плазмой). Температура воздействия до-

стигает 4500 К. Такое кратковременное термическое воздействие на образец невозможно получить ни в одной современной испытательной камере. В предлагаемой работе рассматриваются натурные эксперименты в свободной атмосфере, которые относятся к методам испытания материалов, в частности к способам воздействия на диэлектрический материал термического (теплового) удара.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Экспериментальная установка является оригинальной и состоит из следующих основных частей: накопителя электрической энергии (использовался индукционный накопитель электрической энергии) [3]; устройств коммутации электрических цепей; устройства кумуляции плазменных струек [4, 5] и устройств диагностики.

Накопительная индуктивность является оригинальной и представляет собой индуктивность на основе U-образного разомкнутого сердечника сечением  $0.8 \times 0.75 \text{ м}^2$ , собранного из трансформаторной стали Э310 толщиной 0.35 мм и весом  $22 \cdot 10^3$  кг. На сердечник намотано 15 витков из параллельных медных проводов с сечением  $3 \times 95 \text{ мм}^2$ , имеющих суммарное сечение около  $4 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$ . Габаритные размеры индуктивного накопителя следующие: длина – 4.5 м, ширина – 3.0 м, высота – 2.2 м. Общий вес накопителя около  $40 \cdot 10^3$  кг. Максимальная запасаемая энергия при токе пи-

тания 30 кА около 500 кДж. Длительность импульса тока, в зависимости от условий эксперимента, может варьироваться от 70 до 120 мс.

К важнейшему элементу относится устройство для испытания диэлектрических материалов. В зависимости от научных задач были разработаны разнообразные устройства [4, 6]. На рис. 1 представлено устройство для испытания диэлектрических материалов [7]. Инициатор электрического разряда — проводящая диафрагма 4 в форме круга, составленная из нескольких слоев проводящей фольги (толщина одного слоя 8 мкм). В качестве материала диафрагмы использовалась, как правило, алюминиевая фольга, но опыты проводились со стальными и медными фольгами. Диафрагма располагается на диэлектрической подложке 3 (испытываемый материал) и прижимается к ней кольцевым токоподводом 2. Его внутренний диаметр изменялся от 60 до 150 мм. Тем самым варьировалась площадь воздействия на испытываемый образец. В центр диафрагмы устанавливается токоподвод 1 из скрученных проволочек диаметром 1.0–2.4 мм, количество которых, в зависимости от условий опыта, может изменяться от 2 до 8. Другой конец проволочек крепится по кругу на токоподвод 6. Вся конструкция крепится на стойке 8. Испытание происходило при электрическом разряде проводящей диафрагмы, расположенной на поверхности этого материала, т.е. осуществлялся непосредственный их контакт. Импульс электрической энергии, генерируемый индукционным накопителем, переводит материал проводящей диафрагмы в форму круга в состояние низкотемпературной плазмы, которая воздействует на испытываемый материал. Импульс тока проходил от кольцевого токоподвода 2 к аксиальному (центральному) токоподводу 1. В центре диафрагмы возникает максимум силы тока, а на периферии — минимум. Экспериментально было установлено, что для диафрагмы с диаметром 100 мм сила тока при  $I_{max} < 10.4$  кА изменяется как  $dI/dI = 6.9 \cdot 10^{-3}$  с/кА, а при максимальной силе тока  $I$  в импульсе возрастает с увеличением тока как  $dI/dI = 0.46$  с/кА. В результате получается градиент плотности тока, который в свою очередь, приводит к градиенту температуры на поверхности образца. Известно, что тепловой удар возникает, когда под действием градиента температуры разные части нагреваемого образца расширяются на разную величину. Таким образом, изменения силу тока, изменяя параметры теплового удара.

На рис. 2 представлена фотография устройства. Испытания были как разовыми, так и многократными от 1 до 10 раз. При отработке методики в качестве испытываемых образцов использовались диэлектрики: текстолит, ситалл, стекло, плексиглас и др. Опыты показали, что разовое

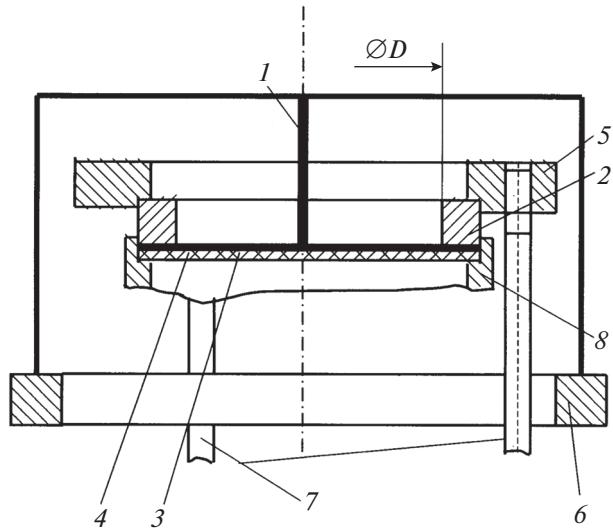
**Таблица 1.** Температура размягчения некоторых диэлектрических материалов

№ п/п	Материал	Температура размягчения, °C
1	Листовое оконное стекло	600
2	Оргстекло 2-55	133
3	Винипласт	180
4	Текстолит	140
5	Стеклотекстолит	250
6	Гетинакс	150
7	Полистирол	90
8	Ситалл СТМ, СТБ	930
9	Фторопласт-4	260

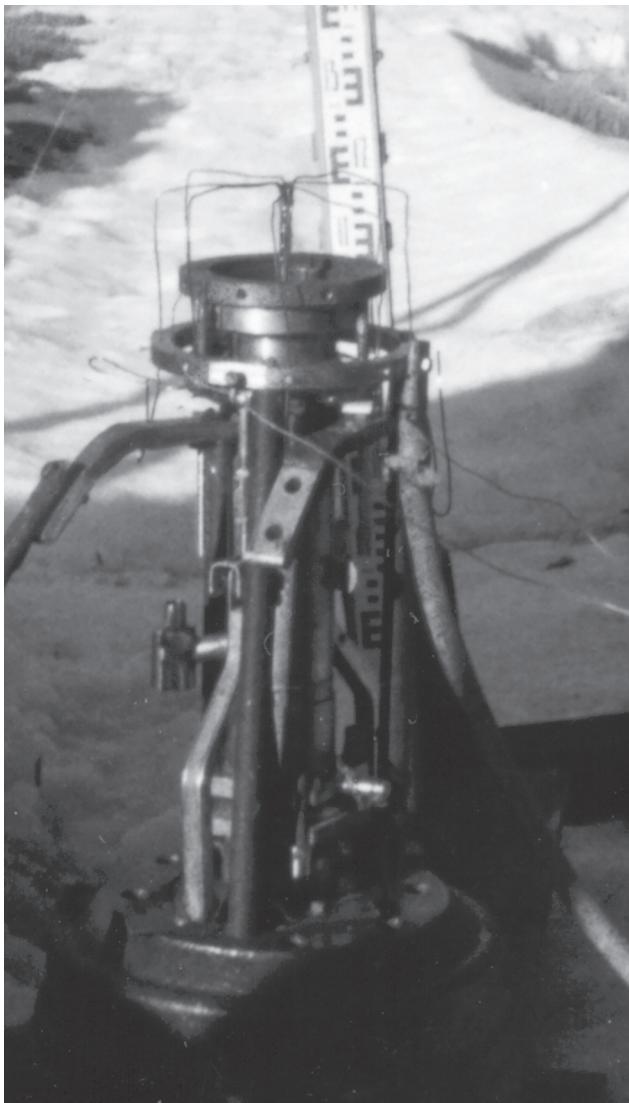
кратковременное (70–120 мс) поверхностное воздействие электроразрядной плазмы (яркостная температура доходила до 4500 К) приводит к частичному отслоению материала и оплавлению, в том числе даже на такой термоустойчивый материал, как ситалл. Площадь воздействия  $\approx 300$  см<sup>2</sup> и более. Толщина образца варьировалась от 3 до 10 мм. Возникающие тепловые градиенты на стадии нагрева и охлаждения также, в зависимости от условий эксперимента, приводят к оплавлению и частичному расслоению образца.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В качестве примера на рис. 3 представлены фотография результата воздействия плазменного образования (теплового удара) на ситалл. Для сведения в табл. 1 приведены данные по температуре



**Рис. 1.** Устройство для испытания диэлектрических материалов.



**Рис. 2.** Фотография устройства для испытания диэлектрических материалов.

размягчения некоторых диэлектрических материалов [8].

Следует отметить, что наибольший эффект воздействия достигался при испытаниях ситалла и стекла. Толщина ситалла составляет 1 см. Глубина оплавления доходит до 1 мм. Для ситалла температура размягчения составляет  $930^{\circ}\text{C}$ . В зависимости от условий эксперимента (подводимой энергии, максимальной силы тока в импульсе, времени воздействия), в некоторых опытах происходило разрушение образца, например, стекла и ситалла. Это наблюдалось после первого воздействия. Были проведены опыты также с фольгированным текстолитом и гетинаксом, где сама фольга, нанесенная на материал, являлась инициатором раз-



**Рис. 3.** Фотография результата воздействия теплового удара на ситалл.

ряда. Эти эксперименты также дали положительный эффект.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные опыты показали принципиальную возможность кратковременного (не более 0.1 с) как разового, так и многократного испытания диэлектрических материалов на термический (тепловой удар) при атмосферном давлении. Параметры импульса тока можно варьировать в следующих пределах: силу тока до 16 кА, длительность импульса тока от 70 до 100 мс. Подводимая энергия может доходить до 50 кДж. Полученные результаты по испытанию материалов на тепловой удар позволяют говорить о перспективности поверхностного кратковременного теплового воздействия (удара) на теплонагруженные диэлектрические материалы. В настоящее время проходит патентную экспертизу способ испытания стойкости диэлектрических материалов на тепловой удар. Следует отметить, что рассмотренное устройство также позволяет проводить испытания композитных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы. Л.: Химия, 1981.
2. ГОСТ IEC 60811-509-2015. Кабели электрические и волоконно-оптические. Методы испытаний неметаллических материалов. Часть 509. Механические испытания. Испытание изоляции и оболочек на стойкость к растрескиванию (испытание на тепловой удар). Москва: Стандартинформ, 2016.
3. Кунин В.Н., Конопасов Н.Г., Плешивцев В.С. // ПТЭ. 1988. Т. 31. № 3. С. 103.

4. Новиков А.А., Севастьянов В.В. Новые типы генераторов долгоживущих плазменных образований. Винница, 2006.
5. Furov L. // Proc. of the "Mechanical engineering technologies'04". V. 3. (Varna, 2004). P. 157.
6. Фурлов Л.В. // ПТЭ. 2004. Т. 47. № 5. С. 143.
7. Фурлов Л.В. Устройство кумуляции плазменных сгустков. Патент РФ № 2692689, кл. H05G 1/00. 2019.
8. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 307.

## Thermal effects on the surface of the long-lived plasma formation

L. V. Furov\*

Vladimir State University, Vladimir, 600000 Russia

\*e-mail: lfurov@vlsu.ru

The results of thermal tests of the surface of dielectric materials by electric discharge plasma are discussed. The experiments were conducted in a free atmosphere. The device, methodology and results of the effect of plasma formation on the surface of the sitall are presented.