

УДК 678:621.315.61

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА НА ПРОЦЕСС ДЕНДРИТООБРАЗОВАНИЯ В ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В. А. Волохин, О. С. Гефле, С. М. Лебедев

Научно-исследовательский институт высоких напряжений Томского политехнического университета, 634028 Томск
E-mail: polymer@hvd.tsk.ru

Представлены результаты исследования влияния остаточных механических напряжений, образующихся в твердых полимерах на стадии изготовления, на формирование и рост электрического дендрита. Показано, что время до зарождения дендрита и время до пробоя образцов из поликарбоната можно определить по результатам исследования параметров дендритообразования.

Ключевые слова: остаточные механические напряжения, течение расплава, дендрит, поляризационно-оптический метод, изохромы, частичные разряды, пробой.

Введение. Одной из основных причин разрушения высоковольтной полимерной изоляции в сильном электрическом поле является образование каналов неполного пробоя (дендритов) [1–4]. Как правило, такие каналы появляются в локальных областях с максимальной напряженностью электрического поля, например вблизи краев электродов и дефектов полимера или при наличии шероховатостей поверхности электродов. Процессы зарождения и роста дендритов зависят от различных факторов: величины измерительного напряжения, коэффициента неоднородности электрического поля, расстояния между электродами, исходного состояния образцов, остаточных механических напряжений и др. [5, 6]. Формирование и распределение остаточных механических напряжений в изоляционных изделиях обусловлено термоусадкой полимера, скоростью его охлаждения, наличием закладных металлических деталей, формой изделия и т. д. Кроме того, на эксплуатационные характеристики изоляционных изделий могут оказывать влияние не только технологические параметры, но и способы переработки полимера. Например, при изготовлении изделий методом литья под давлением распределение остаточных механических напряжений, влияющих на процесс дендритообразования, может существенно зависеть от направления течения расплава полимера [7, 8].

Целью данной работы является исследование влияния направления течения расплава на пространственно-временные характеристики дендритообразования поликарбоната в резко неоднородном электрическом поле.

Методика эксперимента. Образцы с электродной системой острие — плоскость изготавливались из поликарбоната методом литья под давлением в специально разработанных пресс-формах. При изготовлении образцов с различным направлением течения расплава (рис. 1) технологические параметры переработки поликарбоната (температура расплава, избыточное давление, скорость охлаждения) оставались постоянными, а направление течения расплава изменялось за счет различного расположения литников в пресс-формах. В качестве высоковольтных электродов использовались стальные иглы диаметром 1 мм

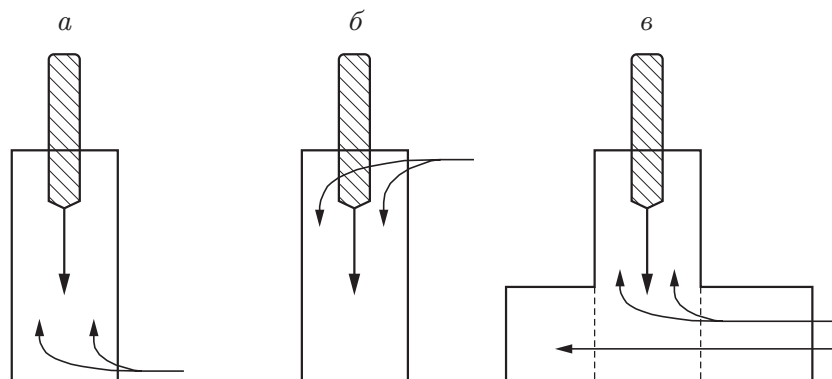


Рис. 1. Схемы изготовления образцов с различным направлением течения расплава:

a — от плоскости к острию (режим А); *б* — от острия к плоскости (режим Б); *в* — перпендикулярно направлению силовых линий электрического поля (режим В)

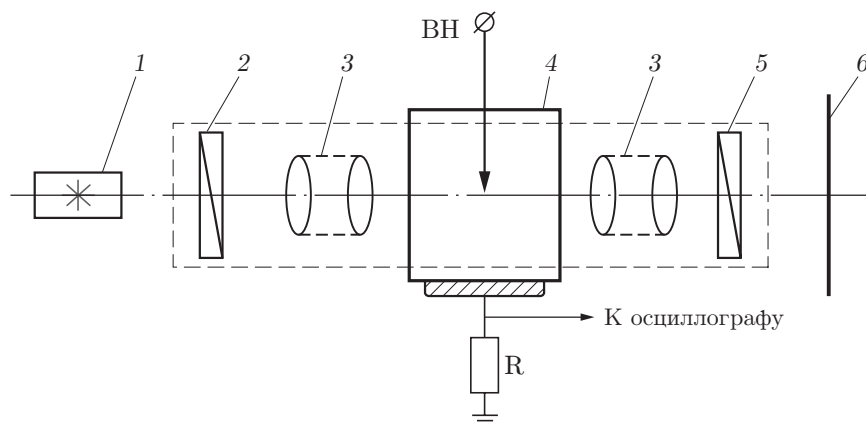


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — источник света; 2 — поляризатор; 3 — система линз; 4 — образец; 5 — анализатор; 6 — экран; ВН — источник внешнего напряжения

с радиусом закругления острия $r = (7,5 \pm 0,5)$ мкм. Для обеспечения контакта с плоским заземленным электродом на нижнюю поверхность образцов наклеивалась алюминиевая фольга толщиной 7 мкм. Расстояние между электродами составляло $d = (9,3 \pm 0,3)$ мм, а количество образцов в каждой партии — не менее 20 шт.

Одним из наиболее простых и информативных методов определения внутренних механических напряжений, возникающих в изделиях из оптически прозрачных полимерных диэлектриков после отверждения, является поляризационно-оптический метод [9]. Для регистрации интерференционных картин распределения остаточных механических напряжений в образцах с различным направлением течения расплава использовалась поляризационно-оптическая установка, схема которой приведена на рис. 2. В качестве источника белого света применялась галогенная лампа КГМ-24/150. Перед помещением образца в ячейку плоскости поляризации поляризаторов 2 и 5 располагались под углом 90° друг к другу, что позволяло получить интерференционную картину в черном поле. Затем в ячейку помещался исследуемый образец. Анизотропия оптических свойств полимерного диэлектрика, обусловленная наличием остаточных внутренних механических напряжений, приводила к существенному изменению интерференционной картины и появлению чередующихся цветных полос — изохром. Распределение интерференционных полос в образ-

цах регистрировалось с помощью цифровой видеокамеры. Пространственное разрешение оптической системы при максимальном увеличении составляло 25 мкм. Для регистрации и графической обработки интерференционных полос, возникающих при изготовлении образцов из поликарбоната вблизи острия, использовались микроскоп, цифровая фотокамера и компьютер. Число и ширина полос различной цветности (изохром) определялись с помощью программы “AutoCAD”. При определении размеров полос методом сравнения максимальная относительная погрешность не превышала 2 %.

Образцы из поликарбоната испытывались при переменном напряжении промышленной частоты 50 Гц при $U = 24,5$ кВ. Напряжение подавалось на образцы скачкообразно. Максимальная напряженность поля на острие рассчитывалась по формуле [10]

$$E = 2U/[r \ln(4d/r)]$$

(U — испытательное напряжение, В; r — радиус закругления острия, м; d — расстояние между электродами, м) и для всех образцов составляла $7,68 \cdot 10^8$ В/м.

При исследовании процесса разрушения в образцах из поликарбоната наряду с поляризационно-оптическим методом использовался метод регистрации частичных разрядов (ЧР) [11]. При этом применялась традиционная схема измерения импульсов тока, которые возникают за счет ионизационных процессов в микротрещинах и полых каналах дендрита, образующихся в диэлектрике под действием внутренних механических напряжений и сильного электрического поля. При возникновении ЧР во внешней цепи образца протекает ток, вызывающий падение напряжения на малоиндуктивном токовом шунте R , которое регистрируется с помощью осциллографа. Градуировка осциллографа выполнялась с помощью калибратора с фиксированными значениями заряда: 10, 100 и 1000 пКл. Для единичных импульсов ЧР погрешность измерения амплитуды сигнала, временных интервалов и величины заряда с помощью осциллографа “LeCroy” не превышала 1,83, 0,86 и 2 % соответственно.

После появления и регистрации первых импульсов ЧР напряжение отключалось и проводилось измерение длины первичных каналов пробоя (микротрещин) с помощью микроскопа с ценой деления измерительной сетки 5 мкм. Затем продолжалось испытание образцов при том же уровне напряжения вплоть до их пробоя.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Анализ интерференционных картин позволил установить, что чередование цвета изохром вблизи острия практически не зависит от направления течения расплава на стадии изготовления образцов. Как правило, вблизи острия за полосой светло-розового цвета следует полоса светло-зеленого цвета, затем вновь полоса светло-розового цвета и т. д. От направления течения расплава зависят количество полос вблизи острия M , суммарная ширина полос Δ и средний размер одной полосы $\Delta_{\text{ср}}$.

Наименьшие средние значения суммарной ширины изохром наблюдались при поперечном направлении течения расплава (режим В), а наибольшие — при направлении течения расплава от плоскости к острию (режим А) (табл. 1). Во всех исследованных с помощью микроскопа образцах в исходном состоянии микротрещин или микрополостей вблизи острия не обнаружено.

По истечении промежутка времени τ_0 после скачкообразного увеличения напряжения появлялись единичные импульсы ЧР, характерная форма которых показана на рис. 3. Для образцов с различным направлением течения расплава длительность фронта первичных импульсов ЧР с положительной или отрицательной полярностью составляла от 1,5 до 2,5 нс, а длительность импульсов — от 3 до 5 нс. При этом наименьшие значения амплитуды единичных импульсов ЧР U_0 и заряда q_0 , характеризующие начало процесса разрушения поликарбоната, наблюдались при поперечном направлении течения расплава (табл. 2).

Таблица 1

Количество и средние размеры интерференционных полос вблизи острия в образцах из поликарбоната с различным направлением течения расплава

Режим	M	Δ , мкм	$\Delta_{\text{ср}}$, мкм
А	15 ± 3	610 ± 53	$40,7 \pm 4,8$
Б	12 ± 2	428 ± 32	$35,7 \pm 3,4$
В	14 ± 3	292 ± 48	$20,9 \pm 1,1$

Таблица 2

Пространственно-временные параметры начальной стадии разрушения поликарбоната ($d = (9,3 \pm 0,3)$ мм, $r = (7,5 \pm 0,5)$ мкм, $U = 24,5$ кВ)

Режим	$\tau_0 \pm \Delta\tau_0$, с	$q_0 \pm \Delta q_0$, пКл	$l_0 \pm \Delta l_0$, мкм	
			Расчет	Эксперимент
А	$149,0 \pm 16,5$	$25,90 \pm 5,24$	$33,6 \pm 6,8$	$34,0 \pm 8,0$
Б	$189,0 \pm 16,6$	$18,50 \pm 4,08$	$24,0 \pm 5,3$	$25,0 \pm 7,0$
В	$233,0 \pm 23,2$	$14,72 \pm 3,70$	$19,1 \pm 4,8$	$19,7 \pm 5,3$

Примечание. Параметры τ_0 , q_0 и расчетное значение l_0 регистрировались методом ЧР, экспериментальное значение l_0 — оптическим методом.

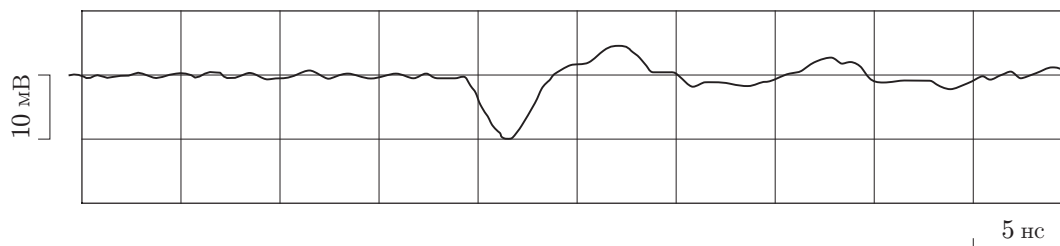


Рис. 3. Первичный импульс ЧР в образце из поликарбоната после образования трещины

Пространственного разрешения поляризационно-оптической установки, как правило, недостаточно для регистрации начальной стадии разрушения поликарбоната. Поэтому после появления первых импульсов ЧР напряжение отключалось и с помощью микроскопа определялись характер разрушения, а также линейные размеры первичных каналов (микротрещин). При сравнении результатов регистрации первичных каналов разрушения поликарбоната (микротрещин или дендритов) методом ЧР и оптическим методом установлено, что амплитуда единичных импульсов ЧР и величина заряда q_0 пропорциональны длине канала l_0 , которая может быть рассчитана по формуле

$$l_0 = q_0 / (\sqrt{2} U \varepsilon_0 n^2) \quad (1)$$

(q_0 — величина заряда единичного импульса ЧР, регистрируемого в момент времени $t = \tau_0$, Кл; U — измерительное напряжение, В; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная, Ф/м; $n = 1,585$ — показатель преломления для поликарбоната).

Результаты измерений длины первичных каналов с помощью микроскопа и результаты расчета величины l_0 по формуле (1) при $t = \tau_0$ приведены в табл. 2, из которой следует, что различие между расчетными и экспериментальными значениями l_0 не превышает 5 %.

Отметим, что величина l_0 в (1) прямо пропорциональна емкости разрушенного участка диэлектрика $C_0 = q_0 / (\sqrt{2} U)$ в момент времени $t = \tau_0$ и обратно пропорциональна квадрату показателя преломления для поликарбоната в диапазоне сверхвысоких (оптиче-

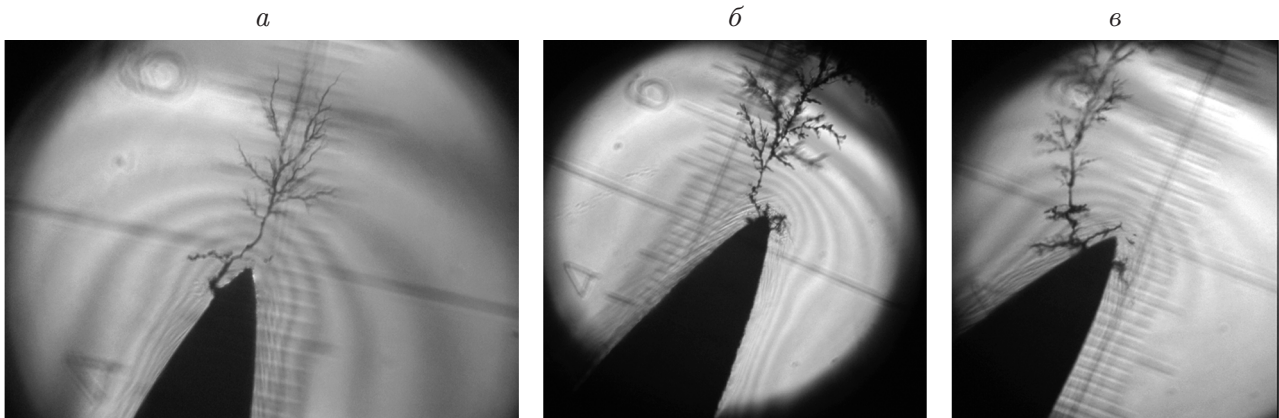


Рис. 4. Развитие дендрита в образцах из поликарбоната:
 a — $t = 750$ с; b — $t = 1100$ с; v — $t = 7500$ с

ских) частот. Таким образом, единичные импульсы ЧР, регистрируемые в начале процесса разрушения, содержат информацию о линейных размерах области разрушения, при этом средние значения ширины изохром $\Delta_{\text{ср}}$ (см. табл. 1) и длины первичных каналов l_0 (см. табл. 2) коррелируют между собой: чем меньше $\Delta_{\text{ср}}$, тем меньше l_0 .

В ходе испытаний образцов установлено, что на начальной стадии разрушения поликарбоната параметры каждого единичного импульса ЧР в момент времени $t = \tau_i$ характеризуют линейные размеры i -й микротрещины вплоть до зарождения дендрита. При $t = \tau_i$ и $q = q_i$ величина l_i с достаточной точностью может быть рассчитана по формуле (1) для каждого образца. Кроме того, в большинстве образцов вблизи острия формируется не одна, а несколько микротрещин, которые со временем соединяются, образуя вокруг иглы сеть микротрещин. В дальнейшем на одной из этих микротрещин зарождается дендрит (рис. 4), время формирования которого обозначим $\tau_{\text{д}}$.

Регистрация процесса разрушения поляризационно-оптическим методом происходит с запаздыванием по сравнению с регистрацией процесса разрушения методом ЧР, что обусловлено временными затратами, необходимыми для науглероживания стенок микротрещин или полых каналов дендрита за счет возникающих в них ЧР. В зависимости от интенсивности ЧР время запаздывания τ_3 может существенно изменяться, поэтому при $\tau_3 \approx \tau_0$ регистрация временных интервалов, характеризующих начало процесса разрушения, таким методом невозможна. В среднем для всех испытанных образцов $\tau_3 \geq 60$ с, поэтому в качестве времени начала процесса разрушения принималось время τ_0 (см. табл. 2), соответствующее времени регистрации первого импульса ЧР.

В интервале времени $(\tau_0, \tau_{\text{д}})$ развитие разрушения имело дискретный во времени и пространстве характер, причем образование микротрещин, как правило, происходило в пределах одной-трех интерференционных полос и их суммарная ширина (в пределах погрешности измерений) совпадала с линейными размерами микротрещин, определенными экспериментальным и расчетным путем.

В момент формирования дендрита для всех испытанных образцов зарегистрировано резкое увеличение амплитуды импульсов ЧР (в среднем в $5 \div 15$ раз) по сравнению с амплитудой первичного импульса ЧР (рис. 5). Установлено, что амплитуда импульсов ЧР пропорциональна длине каналов дендрита, до тех пор пока не начнется образование боковых ответвлений от главного канала дендрита (см. рис. 4).

В большинстве случаев образование микроканалов происходило на боковых поверхностях острия, поэтому продолжительность процесса формирования дендрита определялась

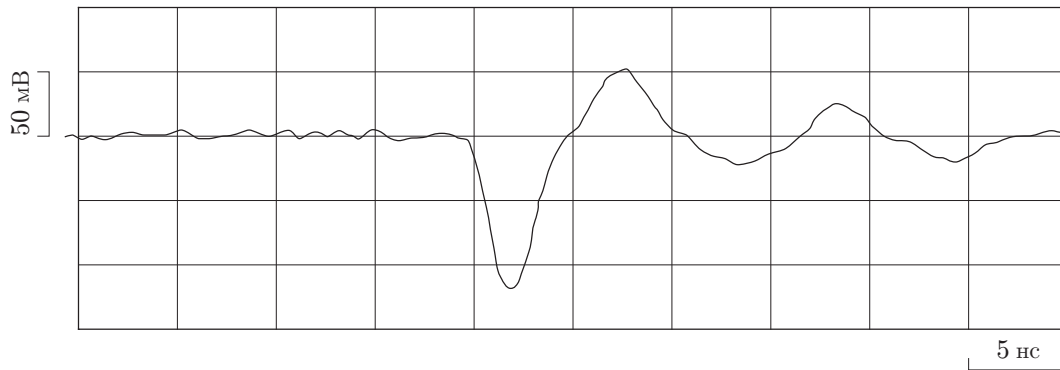


Рис. 5. Импульс ЧР в образце из поликарбоната после зарождения дендрита

Таблица 3

Пространственно-временные параметры разрушения поликарбоната
($d = (9,3 \pm 0,3)$ мм, $r = (7,5 \pm 0,5)$ мкм, $U = 24,5$ кВ)

Режим	$\tau_d \pm \Delta\tau_d$, с	$l_d \pm \Delta l_d$, мкм	$\tau_{пр} \pm \Delta\tau_{пр}$, с
А	9826 ± 1319	193 ± 76	$18\,520 \pm 1736$
Б	$13\,532 \pm 1958$	189 ± 48	$21\,456 \pm 2743$
В	$16\,725 \pm 3570$	165 ± 39	$26\,303 \pm 3608$

не максимальной напряженностью поля на острие, которая для всех испытанных образцов составляла $7,68 \cdot 10^8$ В/м, а интенсивностью ЧР. Образование первичных каналов преимущественно на боковых поверхностях острия свидетельствует о том, что время их формирования τ_0 при одной и той же максимальной напряженности поля на острие существенно зависит от величины остаточных механических напряжений. Таким образом, разрушение образцов из поликарбоната, изготовленных методом литья под давлением, начинается с образования микротрещин под действием не только пондеромоторных сил, возникающих при приложении внешнего электрического поля [12, 13], но и внутренних механических напряжений. Так как время появления первичных импульсов ЧР τ_0 существенно зависит от направления течения расплава на стадии изготовления образцов (см. табл. 2), то оно должно зависеть также от распределения внутренних механических напряжений вблизи острия и их пространственной ориентации. Это предположение подтверждается тем, что время формирования первичной трещины τ_0 и время развития разрушения в механически напряженной области зависят от ширины и количества интерференционных полос: чем меньше ширина полос и больше их количество, тем больше τ_0 и время формирования дендрита τ_d . Иными словами, границы раздела интерференционных полос являются своеобразными барьерами для растущих микротрещин, что приводит к изменению направления их развития и замедлению их роста (см. рис. 4).

В табл. 3 приведены экспериментальные значения пространственно-временных параметров разрушения образцов из поликарбоната с различным направлением течения расплава, определенные поляризационно-оптическим методом. Максимальные значения τ_d и времени до пробоя $\tau_{пр}$ наблюдаются для образцов из поликарбоната с поперечным направлением течения расплава (режим В), для которых характерны наименьшая ширина изохром (см. табл. 1) и образование микротрещин преимущественно в поперечном направлении.

Из результатов корреляционного анализа временных параметров процесса разрушения поликарбоната, полученных поляризационно-оптическим методом и методом регистрации

Таблица 4

Пространственно-временные параметры процесса разрушения поликарбоната по результатам регистрации ЧР

Режим	$q_d \pm \Delta q_d$, пКл	$l_d \pm \Delta l_d$, мкм	$\tau_d \pm \Delta \tau_d$, с	$\tau_{пр} \pm \Delta \tau_{пр}$, с
А	$162,5 \pm 53,5$	$210,8 \pm 69,4$	9805 ± 1086	$18\,481 \pm 2046$
Б	$141,4 \pm 35,7$	$183,5 \pm 46,3$	$12\,437 \pm 1093$	$23\,443 \pm 2059$
В	$130,0 \pm 29,8$	$168,7 \pm 38,7$	$15\,333 \pm 2178$	$28\,900 \pm 4106$

ЧР, следует, что в образцах с различным направлением течения расплава время формирования дендрита τ_d , а также время до их пробоя $\tau_{пр}$ можно оценить по формулам

$$\tau_d = \tau_0 \sqrt{|\varepsilon_\infty^*|} \exp |\varepsilon_\infty^*|, \quad \tau_{пр} = \tau_d \sqrt{|\varepsilon_\infty^*|}, \quad (2)$$

где $|\varepsilon_\infty^*| = \sqrt{2} n^2 = \sqrt{2} \varepsilon_\infty$ — модуль комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне сверхвысоких оптических частот при условии равенства ее действительной ε'_∞ и мнимой $\varepsilon''_\infty = \varepsilon'_\infty \operatorname{tg} \delta$ составляющих.

В табл. 4 приведены расчетные значения пространственно-временных параметров процесса разрушения поликарбоната, полученные по результатам измерения τ_0 (см. табл. 2) и q_d (q_d — средняя величина заряда импульсов ЧР при $t = \tau_d$). Расчет длины дендрита l_d проводился по формуле (1) при $q = q_d$.

Сравнение результатов эксперимента и расчетов, приведенных в табл. 3, 4, показывает, что различие средних значений параметров не превышает 10 %, при этом экспериментальные и расчетные данные наиболее близки при расчете τ_d и $\tau_{пр}$ с использованием значений, экспериментально определенных для каждого образца. Поскольку в (2) переменным параметром является τ_0 , очевидно, что время зарождения дендрита и время до пробоя образца зависят от начальных условий формирования первичной трещины. При поперечном направлении течения расплава (режим В) среднее значение τ_0 на 56 и 23 % больше, чем для режимов А и Б соответственно, что приводит к увеличению продолжительности стадии формирования дендрита и стадии, предшествующей пробоем образца.

Из (2) также следует, что время роста дендрита пропорционально комплексному показателю преломления, а время формирования каналов неполного пробоя — модулю комплексной диэлектрической проницаемости. Следует отметить, что пробой локального участка диэлектрика наступает в тот момент, когда действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости становятся равными: $\varepsilon' = \varepsilon''$. Аналогичное условие пробоя полимерных диэлектриков получено ранее как для однородного, так и для резко неоднородного внешнего электрического поля [14, 15].

Результаты исследований показали, что процессом разрушения можно управлять путем изменения направления течения расплава. На рис. 6 показаны типичные интерференционные картины в образцах с различным направлением течения расплава. Видно, что в случае режима В отраженные потоки расплава формируют интерференционную картину, существенно отличающуюся от соответствующих картин при продольном направлении течения расплава (режимы А и Б).

В образцах, изготовленных в режимах А и Б, обычно образуются дендриты, имеющие слаборазветвленную форму и в основном развивающиеся вдоль оси межэлектродного промежутка (рис. 7,а). В образцах с поперечным направлением течения расплава, как правило, образуются дендриты кустообразной формы, причем в большинстве случаев каналы дендрита в процессе роста ориентированы вдоль границ раздела соседних изохром (рис. 7,б). Искривление каналов и отклонение их траектории от направления силовых линий электрического поля приводит к увеличению времени развития разрушения и времени

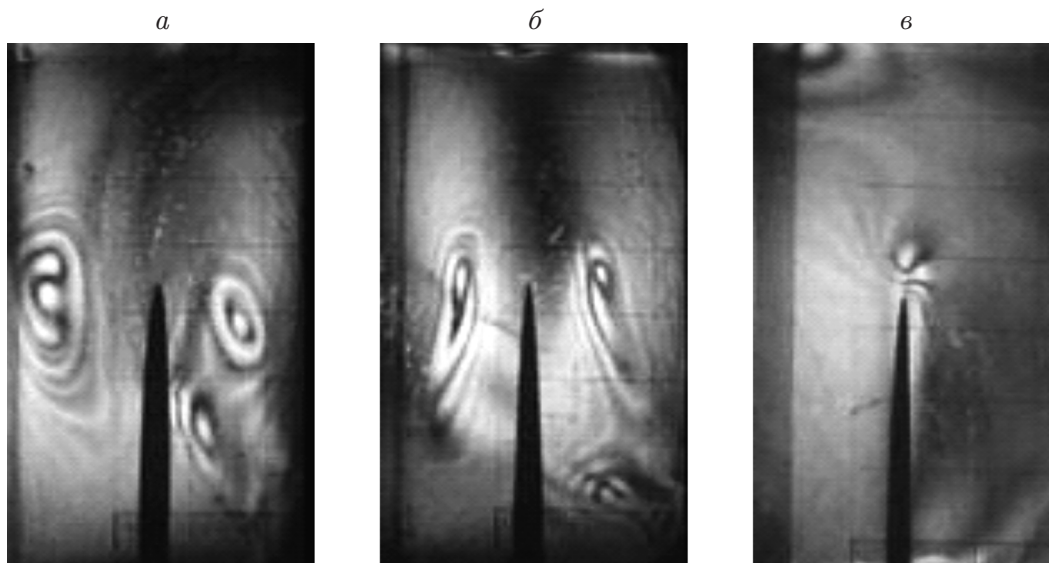


Рис. 6. Типичные интерференционные картины для образцов с различным направлением течения расплава:

а — режим А; *б* — режим Б; *в* — режим В

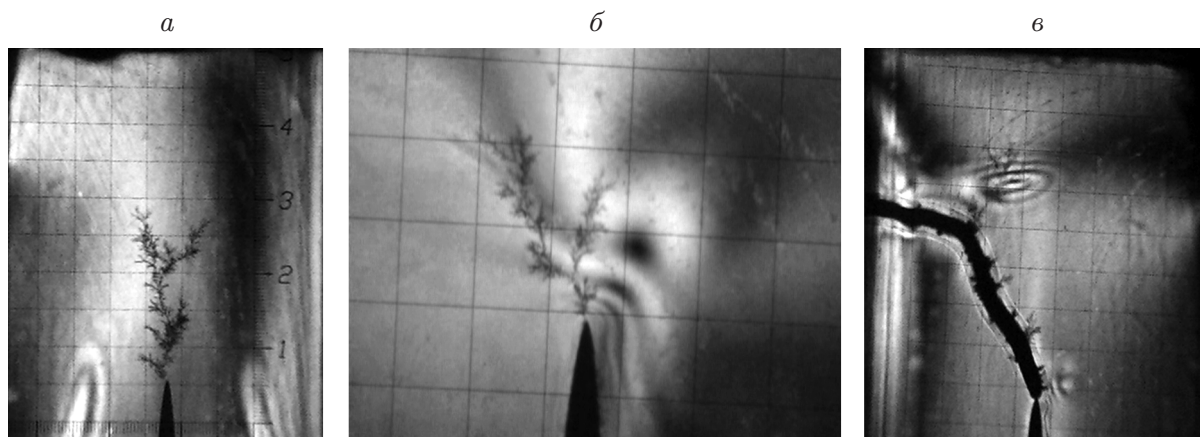


Рис. 7. Влияние направления течения расплава на форму и пространственную ориентацию каналов дендрита:

а — продольное направление течения расплава; *б* — поперечное направление течения расплава; *в* — искривление канала пробоя при наличии вихревого течения вблизи плоского электрода

до пробоя $\tau_{пр}$, а при наличии вихревых течений на пути формирования главного канала пробоя — к его выходу на боковую поверхность образца (рис. 7, *в*).

Заключение. Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие выводы.

В образцах из поликарбоната, изготовленных методом литья под давлением, процесс разрушения начинается с образования микротрещин преимущественно на боковых поверхностях острия и сопровождается появлением единичных импульсов ЧР с длительностью фронта и импульса не более 2,5 и 5 нс соответственно.

На начальной стадии разрушения величина заряда единичного импульса ЧР пропорциональна длине микротрещины или дендрита, что позволяет оценить линейные размеры области разрушения с относительной погрешностью, не превышающей 5 %.

Линейные размеры микротрещин коррелируют с шириной интерференционных полос, зависящей от направления течения расплава. При поперечном направлении средняя длина первичных микротрещин на 76 % меньше, чем при продольном направлении течения расплава от плоскости к острию.

Время формирования первичной трещины и время развития разрушения в механически напряженной области зависят от ширины и числа интерференционных полос, т. е. от особенностей пространственного распределения механических напряжений. При поперечном направлении течения расплава время формирования первичной трещины на 23–56 % больше, чем при продольном направлении течения расплава.

Границы раздела интерференционных полос являются своеобразными барьерами для растущих трещин или каналов неполного пробоя, что приводит к искривлению их траектории, увеличению времени формирования дендрита и времени до пробоя образцов.

Время зарождения дендрита и время пробоя изоляционного промежутка зависят от времени формирования первичной трещины, комплексного показателя преломления и модуля комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне оптических частот, что позволяет прогнозировать временные параметры процесса разрушения поликарбоната с относительной погрешностью, не превышающей 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Shibuya Y., Zoledziowski S., Calderwood J.** Void formation and electrical breakdown in epoxy resin // *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1977. V. 96. P. 198–206.
2. **Гефле О. С.** Разработка метода диагностики зарождения и развития разрушений в электрической изоляции по тепловым эффектам: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1984.
3. **Tanaka T., Greenwood A.** Effect of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene // *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1978. V. 97. P. 1749–1757.
4. **Shimizu N., Laurent C.** Electrical tree initiation // *IEEE Trans. Dielectrics Electric. Insul.* 1998. V. 5. P. 651–659.
5. **Гефле О. С.** Оценка интегрального перепада температуры на начальной стадии разрушения полимерных диэлектриков в сильном электрическом поле // *Электричество.* 1988. № 6. С. 84–88.
6. **Гефле О. С.** Барьерный эффект в диэлектриках / О. С. Гефле, С. М. Лебедев, Ю. П. Похолков. Томск: ТМЛ-пресс, 2007.
7. **Lebedev S. M., Gefle O. S., Volokhin V. A., Tarasov P. V.** Effect of a melt flow direction on the treeing process in polymeric dielectrics // *Proc. of the 15th Intern. symp. on high voltage engng, Ljubljana, 27–31 Aug. 2007.* Paper 476.
8. **Gefle O. S., Lebedev S. M., Volokhin V. A., Pokholkov Y. P.** Effect of the mechanical strain on the treeing phenomenon // *Proc. of the Intern. conf. on solid dielectrics, Winchester, 8–13 July 2007.* P. 142–145.
9. **Александров А. Я.** Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела / А. Я. Александров, М. Х. Ахметзянов. М.: Наука, 1973.
10. **Mason J. H.** Breakdown of solid dielectrics in divergent fields // *Proc. IEE.* 1955. V. C102. P. 254–263.
11. **Кучинский Г. С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979.
12. **Auckland D. W., McNicol A. A., Varlow B. R.** Development of strain in solid dielectric due to vibrational electrostatic forces // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1990. V. 23. P. 1608–1613.

13. **Varlow B. R., Auckland D. W.** The influence of mechanical factors on electrical treeing // IEEE Trans. Dielectrics Electric. Insul. 1998. V. 5. P. 761–766.
14. **Gefle O. S.** Critical parameters of imperfect dielectrics in strong electric field // Proc. of the 9th Intern. symp. on high voltage engng, Graz, 25 Aug. — 1 Sept. 1995. Paper 1069.
15. **Boggs S. A.** Theory of a defect-tolerant dielectric system // IEEE Trans. Electric. Insul. 1993. V. 28. P. 365–370.

Поступила в редакцию 5/XII 2007 г.
