

УДК 621.315

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД ФАКЕЛЬНОГО ВИДА КАК СРЕДСТВО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛЫ

МЕХТИЗАДЕ Р.Н.

Институт физики НАН Азербайджана

Современное экономическое развитие общества невозможно без разработок и внедрения новых технологий. Новые технологии - это совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции.

Задача технологии как науки - исследование и выявление физических, химических, механических и иных закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных и экономичных производственных процессов.

Среди разнообразных видов технологического воздействия на материалы особый интерес представляет электротехнология, т.е. прямое использование энергии электрического тока, электрического или магнитного поля, подводимой непосредственно к технологическому объекту и преобразуемой в его рабочей зоне в другие виды энергии (тепловую, механическую, химическую и т.д.), что и обеспечивает реализацию заданного технологического процесса.

По методам воздействия на обрабатываемый объект электротехнологические процессы делятся на процессы непрямого воздействия (механическое преобразование электроэнергии, электротермические установки непрямого нагрева, ультразвуковые установки, лазерные установки, установки УФ и ИК облучения и т.д.) и процессы прямого воздействия (электротермические установки прямого нагрева, электросварочные установки, электростатические установки, электроимпульсные технологии и технологии, основанные на использовании плазмы газового разряда).

Наиболее эффективными по достигаемым результатам представляются процессы непосредственного воздействия электрической энергии, сосредоточенной в электрическом поле, на обрабатываемый материал без промежуточных трансформаций энергии, а значит и без дополнительных потерь.

Наряду с традиционными применениями электричества в промышленной технологии, начинает приобретать все большую роль использование сильных электрических полей и разрядов [1]. Это обстоятельство связано с наличием целого ряда преимуществ этих технологий перед традиционными методами воздействия на обрабатываемый материал. Дело в том, что практически все вещества, как электропроводящие, так и диэлектрические, могут быть тем или иным способом заряжены и подвергнуты силовому воздействию электрического поля или разряда. Отсюда следует свойство универсальности методов электротехнологии.

Методы силового воздействия электрических полей и разрядов на материалы во многих случаях включают в себя ту или иную степень активации материала или его поверхности. Механические, химические и температурные методы активации не всегда обеспечивают необходимое состояние поверхности, особенно в случае комбинированных структур, содержащих в поверхностном слое органические и неорганические компоненты, резко отличающиеся по механическим, химическим, электрическим свойствам и температурной стойкости. К таким материалам относятся, например, углепластики, стеклопластики, различные композиционные материалы [2].

В применении к материалам, имеющим жесткие ограничения по химическим и температурным воздействиям, большими возможностями обладает активация воздействием низкотемпературных неравновесных электрических разрядов [3], таких, как коронный, барьерный, факельный и тлеющий, в различных газах, в основном, в воздухе.

Неравновесные электрические разряды характеризуются высокой степенью энергетической отдачи, малыми потерями энергии на нагрев газа и объекта обработки. Сильный отрыв электронной температуры от температуры ионов в разряде ($T_e \gg T_i$, где T_e – температура электронов; T_i – температура ионов) обеспечивает необходимую генерацию химически активных продуктов за счет энергии электрического поля непосредственно вблизи активируемой поверхности.

Для оптимизации системы «электрический разряд в воздухе – активируемый материал» необходимо разработка таких режимов неравновесных электрических разрядов, которые обеспечили бы наилучшее использование свойств разряда в применении его для активации конкретного материала.

В данной работе изложены результаты исследования одного из наименее изученных видов неравновесных электрических разрядов - факельного разряда, а также его активационного воздействия на поверхность диэлектрических материалов.

Факельный разряд является резко неравновесным видом электрического разряда [4]; он существует в электроотрицательных газах в неоднородном поле в том случае, когда электрод с малым радиусом кривизны (острие различной конфигурации), имеющий диэлектрическое покрытие, является анодом. Катодом может служить, например, плоскость (рис.1). Расстояния анод – катод в типичных факельных промежутках составляют 2- 20 см., уровень напряжения от 15 до 200 кВ; физических ограничений на увеличение длины промежутка при соответствующем возрастании напряжения нет, однако исследований при напряжениях выше 220 кВ в литературе не известно.

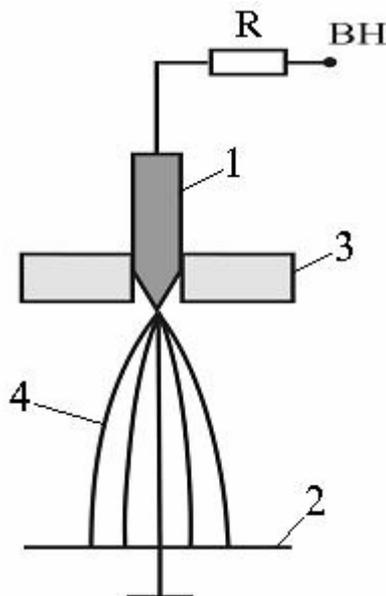


Рис.1. Электродная система для осуществления факельного разряда.

1 – анод; 2 – катод; 3 – диэлектрическая насадка;

4 – силовые линии электрического поля; R – ограничивающее сопротивление;

Физически факельный разряд представляет собой последовательность положительных стримеров; длительность каждого стримера составляет по разным измерениям от 10^{-9} с. до 10^{-7} с. Интервал следования зависит от приложенного напряжения и составляет от 10^{-3} с. до 10^{-5} с., т.е. стримеры следуют с частотой 10^3 - 10^5

импульсов в сек. Средний ток факельного разряда есть следствие усреднения тока стримеров по времени. Амплитудное значение тока отдельного стримера составляет 5 - 10мА.

На рис.2 представлены типичные вольтамперные характеристики факельного разряда на постоянном напряжении, снятые при значениях межэлектродного расстояния $L=3,5$ см. и $L=7,5$ см. и значении ограничивающего сопротивления 10 Мом.

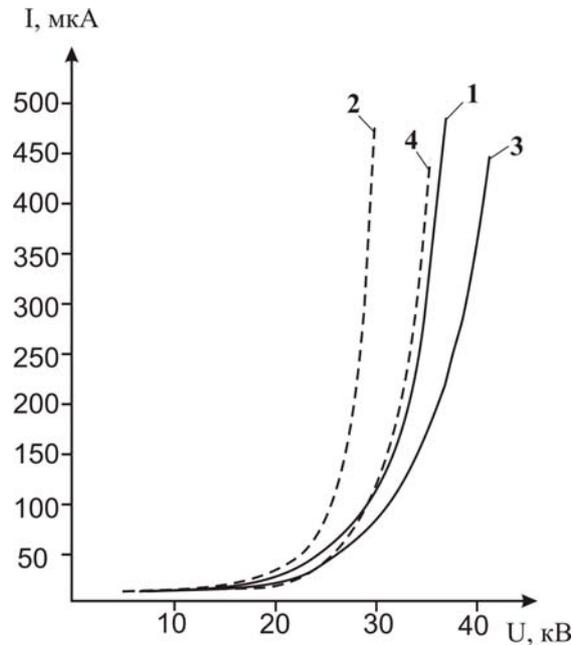


Рис.2. Вольтамперные характеристики факельного разряда в воздухе на постоянном напряжении. 1,2 - $L=3,5$ см.; 3,4 - $L=7,5$ см

Сплошные кривые дают зависимость тока от приложенного напряжения U_0 ; штриховые – зависимость тока от напряжения U_e на газовом промежутке, при этом

$$U_e = U_0 - IR$$

т.е. за исключением падения напряжения на резисторе. Отметим, что величина U_e получена расчетным путем, ее прямое измерение затруднительно, т.к. емкость электростатического киловольтметра составляет около 7 пФ, что больше емкости газового промежутка (0,1–1 пФ), и подключение киловольтметра «напрямую» изменяет режим стримеров факельного разряда.

Из рисунка 2 наглядно виден сдвиг напряжения зажигания с ростом межэлектродного расстояния и тот факт, что при возрастании тока разряда напряжение на газовом промежутке обнаруживает тенденцию к постоянству, т.е. имеет место эффект стабилизации напряжения (или «варисторный эффект»).

Рассмотрим некоторые особенности стримеров как составляющих факельного разряда. После пересечения стримером разрядного промежутка в газе остается слабоионизованный канал, диффузионный распад которого происходит за время

$$\tau_0 \approx \frac{r^2}{2D} = \frac{r^2 \cdot l}{2kT_i \cdot b}$$

где r - характерный поперечный размер канала стримера (для воздуха $r = 5 \cdot 10^{-6}$ м.),
 $D = \frac{k \cdot T_i \cdot b}{e}$ - коэффициент диффузии, k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона,
 $T_i \approx T_n$ - температура ионов и нейтралов, b – подвижность ионов. При разумных значениях $T \approx 450$ К и $b \approx 1 - 2 \cdot 10^{-4}$ м²/В·с для времен распада получаются значения (10^{-6} – 10^{-5})с. Физически это означает, что если за это время в канал стримера не поступит дополнительная энергия, то он распадается. Если же обеспечить условия подтока энергии, за время больше чем τ_0 , то диссипация этой энергии в канале стримера приведет к его переходу в искру; переход сопровождается повышением температуры и появлением в спектре излучения сплошного фона. Таким образом, для существования факельного разряда в виде последовательности стримеров необходимо ограничить приток энергии. В реальных условиях это достигается включением в цепь последовательно с факельным промежутком резистора, сопротивление которого выбирается из условия $\tau = R \cdot C > \tau_0$; здесь C – емкость газоразрядного промежутка, обычно равная 10^{-12} ф – 10^{-13} ф. Тогда

$$R > \frac{\tau}{C} \approx \frac{10^{-5} \text{ с}}{10^{-12} \text{ ф}} = 10^7 \text{ Ом}$$

Обычно значение R составляет $5 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$ Ом; его величина зависит от конкретных параметров промежутка. При увеличении напряжения U_0 на факелообразующем устройстве, напряжение на газовом промежутке остается почти постоянным, близким к напряжению зажигания U_3 . Разность $U_0 - U_3 = \Delta U_R$ составляет падение напряжения на резисторе, при этом $\Delta U_R = I_{cp} \cdot R$, где I_{cp} – средний ток факельного разряда. При подъеме напряжения каждый из стримеров (амплитуда и время существования) практически не изменяются, а увеличение среднего тока происходит за счет увеличения частоты следования стримеров. При частотах следования $\approx 5 \cdot 10^5$ интервал времени между двумя последовательными стримерами уменьшается до 10^{-6} с., т.е. становится сравнимым со значениями времени распада. При этом в промежутке создаются условия для перехода стримера в искру, в силу того, что последующий стример формируется до того, как распадается канал предыдущего стримера. Таким образом, стабильный факельный разряд существует в некотором интервале приложенных напряжений от U_3 до U искры. Для типичных факельных промежутков в зависимости от конфигурации поля значения U_3 составляют от 15 кВ до 25 кВ, при этом разность ΔU может изменяться от ≈ 1 кВ, при малых R , до 10-12 кВ при больших R .

Другой существенной особенностью является то, что стабильный факельный разряд существует только в электроотрицательных газах. В воздухе электроотрицательным компонентом является кислород и гидроксил; вместе с тем, общеизвестным является тот факт, что основным ионизационным процессом в лавинах в воздухе является ионизация молекул азота; световое излучение лавин в воздухе также представлено полосами молекулярного азота. Роль кислорода или молекул воды при этом связана с процессом прилипания электронов с образованием отрицательных ионов [5], что и обуславливает более высокие пробивные напряженности в воздухе, чем в азоте, при прочих разных условиях (конфигурация поля, давление, температура). Экспериментально установлено, что при непостоянном напряжении, при котором в воздухе существует стабильный факельный разряд в виде регулярной последовательности стримеров, в промежутке, заполненном азотом, стримеры существуют в виде нерегулярной последовательности. Интервал времени между двумя стримерами в азоте составляют величины от 10^{-3} с. до единиц секунд. Физически это означает, что механизм воспроизводства электронов, обеспечивающий стабильное

следование стримеров в воздухе, непосредственно связан с отрицательными ионами, а точнее, с распадом их в сильном электрическом поле [6]. При давлениях, близких к атмосферному, наиболее вероятны процессы фотоотрыва и отрыв электрона при столкновении с возбужденной молекулой. При этом следует учесть, что энергии связи электрона в отрицательных ионах составляют соответственно 0,44 эВ, 1,46 эВ, 1,82 эВ, что значительно ниже и потенциалов ионизации и энергий возбуждения молекул азота. Тот факт, что концентрация ионов невелика по сравнению с концентрацией нейтралов, компенсируется большим сечением процесса освобождения электрона при распаде отрицательных ионов. Таким образом, обязательным условием существования стабильного факельного разряда является присутствие в зоне сильного поля, т.е. в зоне зарождения стримера, отрицательных ионов.

Резкая неравновесность, значительная энергетическая эффективность, а также простота практического осуществления обуславливают возможность использования факельного разряда для технологического воздействия на различные материалы, как диэлектрические, так и проводящие, с целью модифицирования их свойств.

В технологии производства композиционных материалов-стеклопластиков в качестве наполнителя используются стеклянные волокна, на поверхность которых при изготовлении наносится парафиновый или политерпеновый замасливающий агент, препятствующий их хрупкому излому при технологических перемотках. Замасливающий агент ухудшает адгезионные свойства и смачиваемость стекловолокон эпоксидным связующим, что приводит к снижению пробивной прочности и повышению влагопоглощения готовых изделий.

Для увеличения адгезии поверхности стекловолокон с нанесенным замасливающим агентом целесообразно проводить ее активацию [7] перед тем, как волокна приводятся в соприкосновение с эпоксидным связующим.

В представленной работе исследовалось активационное воздействие факельного разряда на поверхность плоских стеклянных пластин, покрытых слоем политерпенового замасливателя, которые служили моделями реальных стекловолокон. Политерпеновый замасливающий агент наносился равномерным слоем на поверхность стеклянных пластин размером 6х6 см и толщиной 1,5 см и высушивался в течение суток в комнатных условиях. После сушки толщина слоя составляла 30-40 мкм.

Активация поверхности стекла факельным разрядом проводилась на экспериментальной установке, включающей одну или несколько факелообразующих электродных систем с тем, чтобы обеспечивался полный охват образцов зоной разряда. Разряд устойчиво существует на переменном напряжении промышленной частоты в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении, что приводит к простоте технологического использования установок факельного разряда. Одиночная ячейка разряда показана на рис.1. Расстояние от анода до поверхности стекла составляло 3,5 и 7 см. При этом величина pd произведения давления газа на межэлектродное расстояние при обработке в атмосфере воздуха значительно превышала (pd) кр. для воздуха ($(pd)_{кр.возд}=36-46$ мм рт.ст.мм). Обработка в таких условиях должна быть наиболее эффективной [8].

Ток разряда составлял 70-80 мкА при напряжении 30 кВ, длительность обработки варьировалась в пределах от 0 до 300 секунд. Оценка изменений адгезионных свойств поверхности стекла с политерпеновым замасливателем проводилась по методу измерений краевого угла смачивания, основанного на связи между работой адгезии при контакте твердого и жидкого тела с равновесным краевым углом смачивания и является наиболее быстрым и неразрушающим. Кроме того, существует корреляционная связь между адгезионными свойствами различных веществ и работой адгезии пробной жидкости. Уменьшение или увеличение краевого угла смачивания соответствует увеличению или уменьшению работы адгезии поверхности. В качестве пробной жидкости часто используется дистиллированная вода, однако в

наших экспериментах была выбрана эпоксидная смола, поскольку в технологии производства стеклопластиков необходимо добиваться увеличения адгезионной связи между стекловолокнами с нанесенным на их поверхность замасливателем и эпоксидным связующим.

Как показали эксперименты, воздействие электрического разряда уже при малых временах (до 60 сек) приводило к значительному снижению краевого угла смачивания. В таблице представлены результаты измерения краевого угла ($\phi_{кр}$) смачивания поверхности образцов стеклянных пластин с политерпеновым замасливателем при различных временах ($t_{обр}$) электроразрядной обработки.

Таблица

№№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{обр},$ с	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\phi_{кр},$ град	34	31	28	26	25	25	24	24	24	24

Из таблицы видно, что при изменении времени воздействия разряда от 0 (отсутствие воздействия на поверхность) до 60 секунд краевой угол ϕ уменьшается от 34° до 24° , и при дальнейшем увеличении времени обработки зависимость $\phi(t)$ выходит на насыщение (по этой причине результаты измерений при временах от 90 до 300 секунд в таблице не приведены).

Следует отметить, что непосредственные измерения краевого угла смачивания чистых стекол также дают значения 23° - 28° . Это означает, что после воздействия электрического разряда адгезия смолы к стеклу достигает такой же величины, как и при отсутствии слоя замасливателя на его поверхности. Осмотр под микроскопом образцов после электроразрядного воздействия показал наличие в слое замасливателя микропор и микротрещин, достигающих поверхности стекла. Размер микропор достигал 200 мкм, их количество 12-15 ед/мм².

Таким образом, увеличение работы адгезии поверхности стекла с нанесенным на его поверхность сплошным слоем замасливателя при электроразрядном воздействии, по всей видимости, связано с образованием в объеме замасливателя сквозных пор вплоть до поверхности стекла. Кроме того, активация поверхности самого замасливателя также может приводить к увеличению работы адгезии поверхности стекла с замасливателем [9].

Из приведенных результатов видно, что факельный разряд представляет собой эффективное средство целенаправленного воздействия на поверхность диэлектрических материалов, особенно стекловолоконных, с целью повышения ее адгезионных свойств непосредственно в технологическом процессе изготовления композиционных стеклопластиковых изделий.

-
1. Литвинов В. Е. Тр. МЭИ: Применение высоких напряжений в промышленности и энергетике, вып. 224. М.: 1975.
 2. Г.Д.Андреевская. Высокопрочные ориентированные стеклопластика. М.»Наука», 1965, 370 с.
 3. Горин Ю.В., Дмитриев Е.В., Джуварлы Ч.М, Кулахметов Ф.Х., Курбанов Э.Д., Мехтизаде Р.Н. Способ электроразрядной обработки материалов и устройство для его осуществления. Патент №5009479/21, 1992
 - 4 Горин Ю.В., Мехтизаде Р.Н., Курбанов Э.Д.,Кулахметов Ф.Х.,Герасимов А.К. Модификация поверхности композиционных материалов в факельном разряде.

- Электронная обработка материалов, 1991, №3, с. 48-52
5. *Смирнов Б. М.* Отрицательные ионы. - М, Атомиздат, 1978.
 6. *Джуварлы Ч.М, Горин Ю.В., Мехтизаде Р.Н.* Коронный разряд в электроотрицательных газах. Баку, Элм, 1988.-144 с.
 7. *В.Н.Попков, М.И.Глазов.* Кинетика зарядки и динамика волокон в электрическом поле М., Наука, 1976 г., 126 с.
 8. *Джуварлы Ч.М, Г.Б.Вечхайзер, П.В.Леонов.* Электрический разряд в газовых включениях высоковольтной изоляции. Баку, Элм, 1983.-193 с.
 9. *Горин Ю.В., Кулахметов Ф.Х.* О взаимодействии низкотемпературных электрических разрядов со стеклами. Электронная обработка материалов. 1992, №2, с. 27-29.

MATERİALLARA TEXNOLOJİ TƏSİR VASİTƏSİ KİMİ MƏŞƏL ŞƏKİLLİ ELEKTRİK BOŞALMALARININ TƏTBİQİ

MEHDİZADƏ R.N.

Şüşəplastik əşyaların sənaye istehsalında istifadə edilən şüşə liflərin modelini əks etdirən yağ örtüyü olan müstəvi şüşə lövhələrin səthlərinin aktivləşdirilməsində məşəl elektrik boşalmalarının təsirləri tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, məşəl elektrik boşalmalarının təsirləri yağ örtüyü olan şüşə səthinin əlaqələndiriciyə qarşı adgeziya işini nəzərə çarpacaq dərəcədə yüksəldir.

THE ELECTRIC FLARE DISCHARGE AS MEANS OF TECHNOLOGICAL MATERIALS ACTION

MEHDIZADEH R.N.

In the submitted work the activate action of the flare discharge on a surface of the flat glass plates covered with a lubricant layer which take the place of models of the real glass fibers used as fillers at industrial manufacturing of fiberglass products is investigated. It is shown, that action of the flare discharge considerably increases adhesion of glass samples surface with the lubricant layer to binding.