

Феноменологический механизм воздействия кавитации на прошивку стекла

А. А. Зарипов, Х. Б. Ашуров

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий,
Дурман йули, 33, г. Ташкент, 100125, Республика Узбекистан, e-mail: shoshiybek@gmail.com*

Выявлен механизм электроимпульсной обработки непроводящих материалов в водных электролитических средах. Показано, что основным действующим фактором разрушения диэлектрического материала является кавитационный удар, локализованный в прикатодном пространстве. Предложенный и обоснованный кавитационный механизм разрушения диэлектриков наиболее близок к реально осуществляемому на практике режиму обработки.

Ключевые слова: электроимпульсная обработка, кавитационный механизм, прошивка стекол.

УДК 627.9.047

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в последнее время возникла тенденция применения в качестве конструктивных материалов керамики и стекла, обработка которых в некоторых случаях почти невозможна традиционными методами. Альтернативные методы отдельных существуют, но для их развития необходимо понимание сути процесса, которое невозможно без выявления основного механизма воздействия.

О РОЛИ КАВИТАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА

Интересными с точки зрения объяснения механизма воздействия электрического разряда на диэлектрик являются результаты исследования [1, 2] зависимости скорости обработки от емкости релаксационного генератора, полученные в растворах поваренной соли и в электролитах на основе NaOH. Скорость обработки возрастает с уменьшением величины емкости и достигает максимального значения для емкостей 0,1 и 0,02 мкФ соответственно, при которых характерные частоты находятся в области ультразвуковых частот, что подтверждается нашими осциллографическими наблюдениями. Из многочисленных технологий (ГОСТ 10391-63) следует, что стекло хорошо обрабатывается ультразвуковыми методами, где в качестве рабочего тела используют абразивы.

На основе этих сведений о механизмах воздействия при импульсной электрической обработке стекла можно сделать вывод [1, 2, 12], что при такой обработке наряду с плазмохимическим воздействием, обусловленным высокой температурой, имеет место и кавитационное воздействие, возникающее в результате генерации ультразвуковых колебаний в прикатодной области.

Результаты измерений зависимости скорости обработки стекол от концентрации рабочего реа-

гента в электролите, представленные в работе [1], косвенно подтверждают этот вывод. Как указывалось, с ростом концентрации соли в электролите уменьшается коэффициент поверхностного натяжения, из-за чего проводимость увеличивается, а сопротивление разрядного промежутка уменьшается. Это приводит к уменьшению постоянной времени разряда-RC и соответственно к сдвигу характерных разрядных частот в область высоких частот. В связи с этим в области низких концентраций как в водных растворах поваренной соли, так и в растворах исследованных щелочей скорость обработки возрастает с увеличением концентрации упомянутых соли и щелочей в растворах в соответствии с характером изменения коэффициента поверхностного натяжения.

Теоретическое обоснование механизма явления, лежащих в основе обработки непроводящих материалов, можно представить в виде, предполагающем пошаговое доказательство его справедливости и работоспособности:

- доказательство нестационарности процессов, протекающих в прикатодной области вследствие теплового взрыва;
- определение характера пульсаций электрических импульсов в обрабатываемом канале;
- определение параметров микрозарядов, возникающих между катодом и стенкой обрабатываемого канала при электрическом пробое;
- оценка разрушительного воздействия на обрабатываемый материал кавитационного схлопывания пузырьков пара, граничащих с его поверхностью.

Задача о динамике кавитационного пузырька сводится к уравнению [4]:

$$Rd^2R/dt^2 + 3/2(dR/dt)^2 + [P_\infty - P(R)]/\rho_0 = 0, \quad (1)$$

где $R = R(t)$ – текущий радиус кавитационной полости; t – время; P_∞ – давление в жидкости на

бесконечности; $P(R)$ – давление на границе раздела.

При условии, что давление на бесконечности постоянно ($P_\infty = P_0$ – гидростатическое давление), а $P(R) = P_0$, из уравнения (1) можно получить выражение для скорости схлопывания полости пузырька $U = dR/dt$:

$$U^2 = 2P_0(R_{\max}^3/R^3 - 1)/(3\rho_0). \quad (2)$$

Интегрирование этого уравнения дает характеристическое время полного схлопывания полости:

$$T = 0,915R_{\max}(\rho_0/P_0). \quad (3)$$

В явлении кавитации необходимо учитывать газовый состав пузырька. В реальности кавитационный пузырек содержит пар водорода. Учет влияния содержимого кавитационного пузырька и парциального давления каждого компонента парогазовой смеси P_n , поверхностного натяжения жидкости и ультразвукового поля на динамику развития схлопывания пузырька приводит к уравнению Нолтинга–Непейраса [3].

Существует ряд работ, посвященных исключительно рассмотрению процесса смыкания пузырьков возле твердой стенки. В [4] численное решение осуществлено методом верхней релаксации Янга. Масштабом скорости в этой задаче является величина $(\Delta P/\rho)^{1/2}$. К примеру, для $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\Delta P = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$ скорость кумулятивной струи составит $(10^5/10^3)^{1/2} = 10 \text{ м/с}$.

Из-за сильной нелинейности задачи безразмерная скорость кавитационной струи в конце процесса достигает, по данным [3], величины 119 м/с для сферической полости. Важным выводом этой работы является усиление скорости струи при отклонении первоначальной формы пузыря от сферичности. Из таблицы [5] видно, как резко меняются параметры кумулятивной струи с изменением соотношения полуосей начального эллипсоида.

Влияние несферичности на усиление скорости струи

χ	Диаметр струи d (безразмерный)	Скорость V (безразмерная)
1	0,26	11,9
1,05	0,1	15,8
1,1	0,05	23
115	0,025	41
1,175	0,01	64

Последняя цифра в таблице соответствует скорости 640 м/с!

Приведенный выше расчет показывает, что последняя стадия схлопывания требует учета сжимаемости жидкости. Это было сделано Кирквудом и Бете. Уравнение имеет вид

$$R(1-U/c)d^2R/dt^2 + 3/2[1-U/3c](dR/dt)^2 + (1+U/c)H-U/c(1-U/c)RdH/dR = 0. \quad (4)$$

Очевидно, что учет сжимаемости жидкости даст некоторое уменьшение скорости кумулятивной струи при схлопывании кавитационной полости.

В реальных условиях, особенно при воздействии ультразвука, обязательно возникает кавитационный кластер–скопление кавитационных пузырьков, и концентрация пузырьков имеет порядок $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ [6]. Происходит согласованное захлопывание кавитационного кластера в направлении от его внешней границы к центру, как это показано в работе [7]. В результате происходит значительное увеличение давления. Для условий, имеющих место в канале, образованном в материале электроэрозионной обработкой, целесообразно рассмотреть кластеры, расположенные вертикально. Выводы работ [7–11], безусловно, можно после некоторой модификации применить и к нашему случаю. Явление кавитации приводит к возникновению высоких локальных давлений и температур. Если считать процесс захлопывания адиабатическим, то максимальные значения давления и температуры внутри пузырька удовлетворяют уравнениям:

$$P_{\max} = P_0(R_{\max}/R_{\min})^{3\gamma}, \quad (5)$$

$$T_{\max} = T_0(R_{\max}/R_{\min})^{3(\gamma-1)}. \quad (6)$$

P_0 и T_0 – первоначальные давление и температура. Для комнатной температуры, принимая P_0 равным давлению насыщенных паров воды $P_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ Па}$, $\gamma = 4/3$, $R_{\max}/R_{\min} = 10-10^2$, находим: $P_{\max} = 10^7-10^{11} \text{ МПа}$, $T = 10^3-10^4 \text{ К}$. Столь высокие давления и температуры вполне могут активизировать химические процессы, которые могут протекать на твердой поверхности с участием ионов К, Na в случае, если электролит содержит или соли NaCl, KCl, или соответствующие щелочи NaOH, KOH, а также ионы водорода.

В работе [7] приводится состав веществ, обнаруживаемых в канале подводных искровых разрядов электрогидравлических установок. Так, для $P = 10^8 \text{ Па}$, $T = 8000 \text{ К}$ мольная доля H^+ составляет $0,3508 \cdot 10^{-4}$. Это количество водорода показывает, что разрушение поверхности материала за счет восстановления окислов алюминия и кремния, из которых в основном состоит обрабатываемая керамика, при таких условиях относительно мало, и одним из основных механизмов разрушения материала является кавитационный удар.

Генерация кавитационного схлопывания осуществляется согласно [8] за счет:

- микрозаряда между катодом и пленкой электролита;
- колебаний ультразвуковой частоты.

Ультразвук, как известно, широко применяется при обработке непроводящих материалов.

Несомненно, что в качестве одного из источников ультразвука при электроэрозионной обработке необходимо рассматривать прерывание электрической дуги при вращении катода [2]. Как следует из проведенных экспериментов, максимальная скорость обработки наблюдается именно в области ультразвуковых частот. Согласно [2], с увеличением радиуса электрода инструмента оптимальная частота оборотов должна снижаться, что, собственно, и наблюдается и в проведенных нами экспериментах. Это косвенно подтверждает возможность кавитационно-эрозионного механизма разрушения обрабатываемого диэлектрика.

Таким образом, нами показано, что ни химическое разложение, ни электродуговая, ни электротермическая трактовки не являются исчерпывающими при объяснении механизма эрозии диэлектриков в реальном процессе электроимпульсной обработки. Однако это не означает, что упомянутые представления и связанные с ними выводы и обоснования режимов должны быть подвергнуты кардинальному пересмотру.

Наиболее правильным является синтез всех упомянутых подходов, поскольку процесс электрической эрозии диэлектриков обуславливается действием как объемного источника тепла, так и плазменных факелов. Таким образом, в основе модели механизма эрозии в общем случае в качестве главного условия должна быть правильная оценка удельного вклада каждого из вышеупомянутых физических факторов и учтено их влияние друг на друга.

В завершение обратим внимание на то обстоятельство, что в изложенной здесь модели механизма рассматривались условия, близкие к реализуемым на практике. Таким образом, полученные результаты могут представлять ценность при электроимпульсной обработке диэлектриков на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее правильным является синтез нескольких подходов, поскольку процесс электрической эрозии диэлектриков обуславливается действием как объемного источника тепла, так и плазменных факелов. На основе расчетов и анализов приведенных работ предположено, что один из основных действующих факторов в рамках механизма разрушения диэлектрического материала – это кавитационный удар, возникающий при схлопывании пузырька (происходит за счет микроразряда между катодом и пленкой электролита) и сопровождающийся генерацией ультразвуковых волн, локализованных в прикатодном пространстве. Выявлено,

что кавитационный механизм наиболее близок к реально осуществляемому на практике режиму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдукаримов Э.Т., Миркаримов А.М., Зарипов А.А. Электроэрозионная обработка непроводящих материалов. *ЭОМ*. 2007, **43**(2), 4–11.
2. Зарипов А.А., Ашуров Х.Б. Электроэрозионная обработка диэлектриков. *ЭОМ*. 2011, **47**(3), 5–9.
3. Neppiras E.A. Acoustic Cavitation. *Phys. Rep.* 1980, **61**(3), 159–251.
4. Plesset M.S., Chapman R.B. Collapse of an Initially Spherical Vapour Cavity in the Neighborhood of a Solid Boundary. *J Fluid Mech.* 1971, **47**(Part 2), 283–290.
5. Воинов О.В., Воинов В.В. О схеме захлопывания кавитационного пузырька около стенки и образования кумулятивной струйки. *ДАН СССР*. 1976, **227**(1), 63–66.
6. Сиротюк М.Г. *Мощные ультразвуковые поля*. Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. С. 167–220.
7. Hansson I., Morch K.A. The Dynamics of Cavity Clusters in Ultrasonic (Vibratory) Cavitation Erosion. *J Appl Phys.* 1980, **51**(9), 4651–4658.
8. Рыбка О.М., Иванов В.В., Хомкин А.Л. *Электро-разрядные процессы: теория, эксперимент, практика*. Киев: Наукова думка, 1984. С. 12–18.
9. Айвени Р.Д., Хэммит Ф.Г. Численный анализ явления схлопывания кавитационного пузырька в вязкой сжимаемой жидкости. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1965, **88**(4), 140–150.
10. Акуличев В.А. *Мощные ультразвуковые поля*. Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. С. 129–166.
11. Hickling R., Brunton J.H., Ellis A.T., Gadd G.E., Benjamin T.B., Silverleaf A., Hammit F.G., Shal'Nev K.K., Tuffrey A., Heymann F.J., Popple R.G., Broom T. Practical Aspects of Cavitation: Discussion. *Philos T Roy Soc A*. 1966, **260**(1110), 276–294.
12. Абдукаримов Э.Т., Миркаримов А.М., Зарипов А.А. Исследование электрического разряда в водном растворе электролита. *Uzbek Journal of Physics*. 2003, **5**(1), 52–57.

Поступила 05.03.13

После доработки 07.10.13

Summary

This paper considers the identification of a mechanism of electropulse machining of nonconductors in an electrolyte medium. It is shown that the main operating factor of failure of dielectric materials is a cavitation blow localized in the near-cathode space. A cavitation mechanism of the failure dielectrics, proposed and described in the given work, is the closest to mode of processing realized in practice.

Keywords: electropulse machining, mechanism of cavitation, glass drilling.