

Э.Т. Абдукаримов, А.Ш. Миркаримов, А.А. Зарипов

## ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Институт электроники АН РУ,  
ул. Ф. Ходжаева, 33, г. Ташкент, 700125, Республика Узбекистан*

### **Введение**

Анализ научно-технической информации по обработке нетрадиционных материалов показывает, что продолжается развитие как способов производства, так и типов получаемых материалов [1–3]. Развиваются и методы обработки таких материалов.

Наряду с усовершенствованием известных методов (абразивного, лазерного, ультразвукового и т. д.) наблюдается попытка расширения возможностей этих методов путем комбинирования их с химическими методами и использованием щелочных и кислотных электролитических сред. Например, в работах [4–5] показано, что скорость обработки композитных материалов возрастает, если ее проводить в рабочей среде КОН. При этом применялись различные по своей природе лазерный и электроэрозионный методы.

В связи с этим нами расширен круг жидкостей, которые служат рабочей средой, используемых при электроэрозионной обработке. Помимо водного раствора NaCl [6] выбраны щелочные растворы NaOH и КОН. В указанных растворах электролитов были исследованы электрические и временные характеристики импульсных разрядов вблизи электрода-инструмента.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) прохождения тока выявили общий характер зависимости, имеющий четыре переходных режима. Характеристики переходных режимов зависят как от электрических режимов, так и от типа электролита, его концентрации и не зависят от межэлектродного расстояния. Третья фаза характеризуется появлением плазменной оболочки в катодной области в результате перераспределения напряжения в цепи электролита и тем, что вся подводимая энергия электрического поля концентрируется в этой области. Для каждого электролита при неизменном материале катода существуют напряжения и соответствующие плотности токов, при которых появляется плазменная оболочка. Установлена корреляция между этими параметрами и измеренными значениями коэффициента поверхностного натяжения исследуемых электролитов.

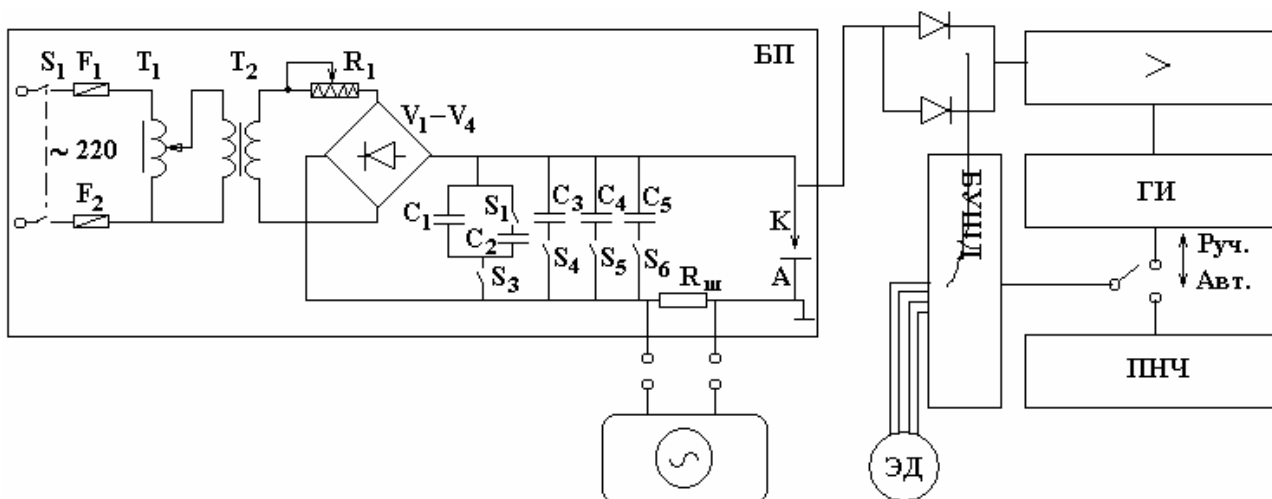
Из анализа распределения потенциала в электролитической цепи получены выражения, позволяющие проводить расчет падения напряжения и выбирать режимы, выгодные для обработки диэлектрических материалов (стекла и керамики).

### **1. Исследования электрических и частотных характеристик тока**

Для исследования процессов прохождения тока в электролитических средах и обработки диэлектрических материалов разработан экспериментальный стенд (рис. 1). Он состоит из гальванически развязанного от сети релаксационного генератора, системы тонкой подачи электрода-инструмента (ЭИ) на базе шагового двигателя, системы регулируемого вращения этого электрода с компенсатором давления, сосуда с держателем образца, в который был введен демпфирующий элемент (на рисунке не показан).

Система компенсатора с демпфером позволяет автоматически поддерживать такое давление ЭИ на обрабатываемую поверхность образца, которое не должно приводить его к разрушению. При этом элементы обеспечивают необходимый контакт ЭИ и обрабатываемого образца.

Катод закреплялся в держателе и с помощью подающего механизма мог погружаться на необходимую глубину в вертикальной плоскости относительно анода и образца, а также перемещаться в горизонтальной плоскости анода. В качестве анода были использованы прямоугольные пластины из графита, меди, свинца и нержавеющей стали.



**БП** – блок питания; **>** – усилитель; **ГИ** – генератор импульсов, **ПНЧ** – преобразователь напряжения-частоты; **БУШД** – блок управления шаговым двигателем; **ЭД** – шаговый двигатель

*Рис.1. Экспериментальный стенд для исследования электрических и частотных характеристик тока и обработки диэлектриков*

Для измерения частоты оборотов ЭИ разработан электронный тахометр, блок-схема которого представлена на рис. 2. Тахометр состоит из датчика, преобразующего вращательное движение в электрические импульсы, формирователя прямоугольных импульсов с нормированной длительностью, измерителя частоты импульсов и блока питания.



*Рис. 2. Блок-схема электронного тахометра*

Для измерений ВАХ релаксационный генератор позволяет регулировать выходное напряжение в пределах 0-400В при максимальном токе нагрузки 10 А. Сигнал разрядного тока определялся с помощью последовательно включенного в электродную цепь сопротивления  $R = 0,5$  Ом. Напряжение измерялось непосредственно на разрядном промежутке. Снятие ВАХ производилось на 2-координатном самописце при одновременном наблюдении форм тока и напряжения на 2-лучевом запоминающем осциллографе. При исследованиях фиксировались межэлектродное расстояние и площадь катода. В качестве электролита использовались водные растворы NaCl, NaOH и KOH различных концентраций. Катодом служили вольфрамовые стержни различных диаметров. Площадь катода ограничивалась керамической трубкой и могла варьироваться в широких пределах.

### 1.1. Исследования вольт-амперных характеристик

Для анализа условий прохождения электрического тока в водных растворах электролитов были выбраны вольт-амперные характеристики, которые при исследованиях в растворе NaCl [6] позволили наглядно судить об основных процессах протекания тока в растворе и определить параметры образования плазменной оболочки вблизи катода. Именно этот режим использовался нами в дальнейшем для прошивки отверстий в непроводящих материалах.

На рис. 3 и 4 представлена динамика развития тока в электролите при изменении напряжения на межэлектродном промежутке в водных растворах NaOH и KOH различной концентрации. Этот

характер поведения ВАХ подобен изменениям вольт-амперных характеристик для раствора электролита NaCl [6].

Необходимо отметить, что во всех исследованных растворах электролитов ВАХ не зависят от материала, из которого изготовлен анод (свинец, графит, нержавеющая сталь). Они совпадают в пределах погрешности измерений.

На вольт-амперных характеристиках, как и ранее, можно выделить четыре режима. Участок 1 представляет собой область, где зависимость между током и напряжением носит линейный характер. На этом участке протекает нормальный процесс электролиза. При увеличении тока нарастают электрохимические процессы в электролите и зависимость становится нелинейной. Заканчивается этот режим тем, что на поверхности катода образуется пузырьковая парогазовая оболочка.

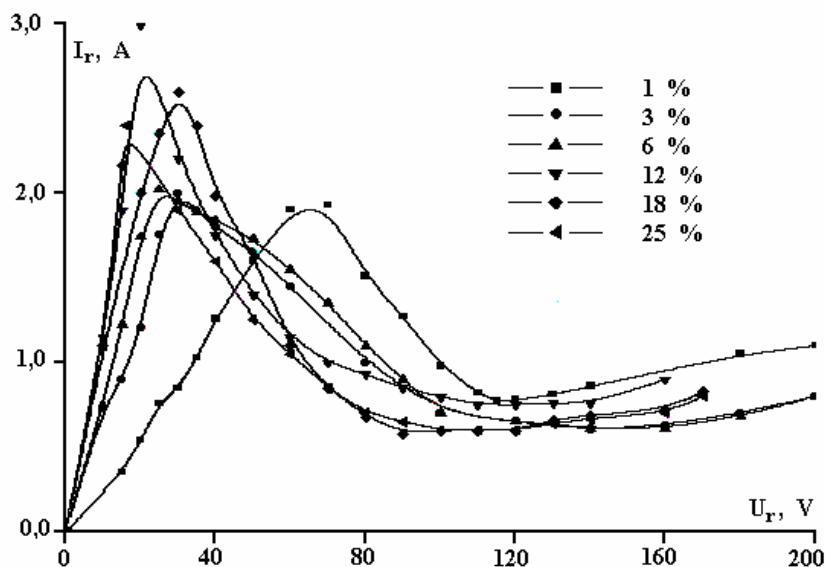


Рис. 3. Зависимость ВАХ при различных концентрациях электролита NaOH.  $h = 3$  мм,  $S_c = 2,38$  мм<sup>2</sup>,  $T = const$

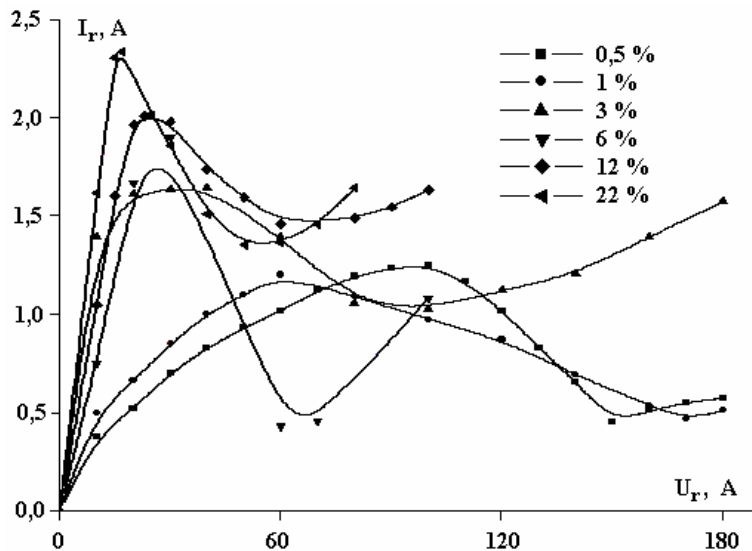


Рис. 4. Зависимость ВАХ при различных концентрациях электролита KOH.  $h = 2,5$  мм,  $S_c = 2,38$  мм<sup>2</sup>,  $T = const$

При дальнейшем повышении напряжения наступает вторая фаза процесса, интенсивное газообразование у поверхности катода сопровождается возникновением отдельных искровых разрядов и, как следствие, наблюдается спад интегрального тока на ВАХ. Последующее его повышение формирует постоянный парогазовый слой. Увеличивается число единичных разрядов, и у поверхности катода возникает плазменная оболочка. Как показали эксперименты, начало возникновения второй фазы характерно тем, что плотность тока, при которой возникают эти первоначальные разряды для данной концентрации электролита, не зависит от межэлектродного зазора и площади катода. Это говорит о том, что решающим фактором, определяющим условия протекания тока в электролите, являются процессы образования парогазового слоя вокруг катода. Именно его свойства влияют на параметры разряда и плазменной оболочки вблизи катода.

Плотность токов, при которых возникают первоначальные разряды вблизи катода, условно названы критическими. На рис. 5 показана зависимость критической плотности тока от концентрации электролита при различных погружениях катода в электролит.

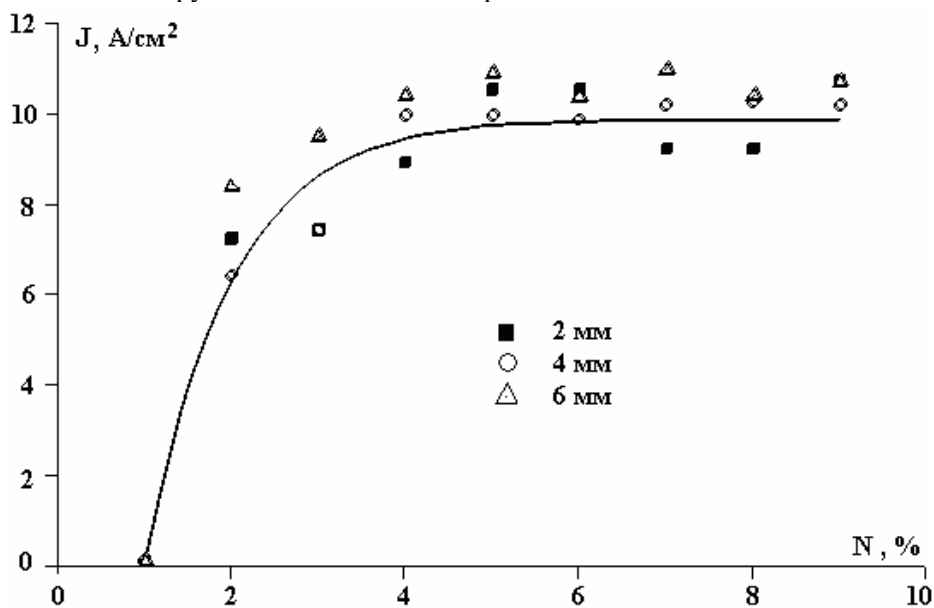


Рис. 5. Зависимость плотности тока от концентрации при различных глубинах погружения катода

Как следует из рисунка, в области концентрации 0,05–3% существует достаточно резкая зависимость критической плотности тока от концентрации электролита и при всех концентрациях не зависит от глубины погружения катода. В области концентраций 6–20% критическая плотность тока в пределах погрешности измерений практически не зависит от концентрации электролита. Характерно, что в электролитах при концентрации менее 2% минимальные напряжения, при которых возникают разряды, выше по сравнению с электролитами большей концентрации. По-видимому, это связано с тем, что при малых концентрациях электролита катионы водорода образуются не только вблизи катода, но и во всей толще электролита. Кроме того, как показано в работе [7], сопротивление слабых растворов электролитов (менее 2%) резко растет с уменьшением концентрации из-за увеличения коэффициента поверхностного натяжения. В связи с этим для обеспечения той же величины тока необходимы более высокие значения напряжений на межэлектродном промежутке. Образующаяся мощность определяет электрохимические процессы, в результате которых возникает пузырьковый слой вокруг катода. Увеличение напряжения при малых концентрациях и образование газа во всем объеме приводят к снижению тока и соответственно к уменьшению критической плотности тока, при которой возникает разряд.

В начале третьей фазы в результате интенсификации газовой выделений как из объема электролита, так и за счет парообразования из-за роста вкладываемой электрической мощности возникает устойчивая сплошная газовая оболочка и ток через слой проходит в виде высокочастотных разрядов. В узкой зоне катода образуется плазменный светящийся факел. При ограничении поверхности катода диэлектриком плазменный факел существует независимо от глубины погружения катода в электролит.

Напряжения и плотности токов, при которых возникает плазменный факел, как следует из ВАХ и зависимости критической плотности от концентрации для исследованных электролитов (рис. 6), сильно зависят от концентрации и состава электролита вследствие изменения коэффициента поверхностного натяжения электролитических жидкостей.

Измерения коэффициента поверхностного натяжения растворов методом отрыва кольца показывают, что он резко уменьшается при увеличении концентрации подобно росту критической плотности (рис. 7). Это говорит о том, что параметры сплошного газового слоя зависят от физико-химических свойств электролита, так как изменение его концентрации приводит к изменению не только коэффициента поверхностного натяжения раствора, но и плотности, вязкости, электропроводности, подвижности ионов и т.д.

Возникновение сплошного газового слоя и формирование непрерывного высокочастотного разряда являются началом третьей фазы. Температура катода в этот момент, как показали термометрические измерения, составляет порядка 2000°С. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к росту

тока и резкому возрастанию температуры вольфрамового катода, его плавлению и переходу ВАХ в четвертую фазу, в режим, подобный дуговому. В отличие от дугового он происходит при повышенных напряжениях на разрядном промежутке – от 60 В и выше, в зависимости от типа электролита и его концентрации.

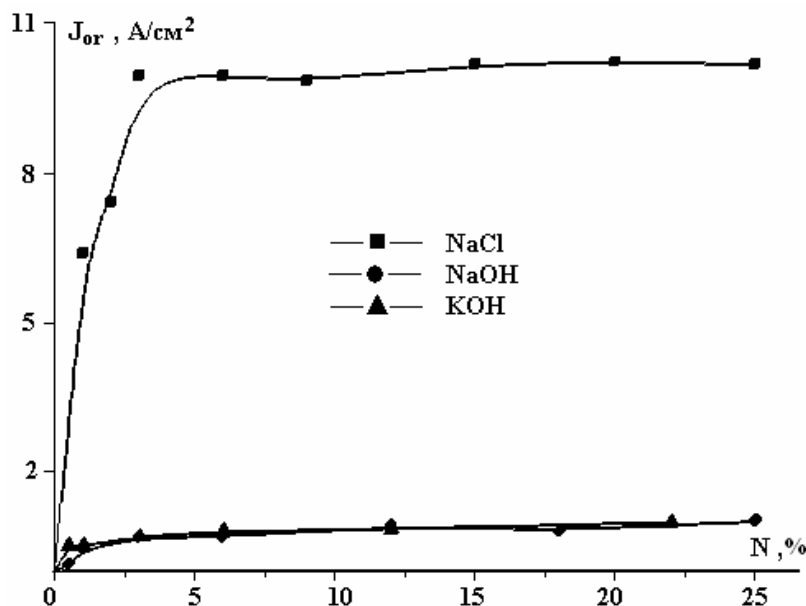


Рис. 6. Зависимость критической плотности тока от концентрации электролитов

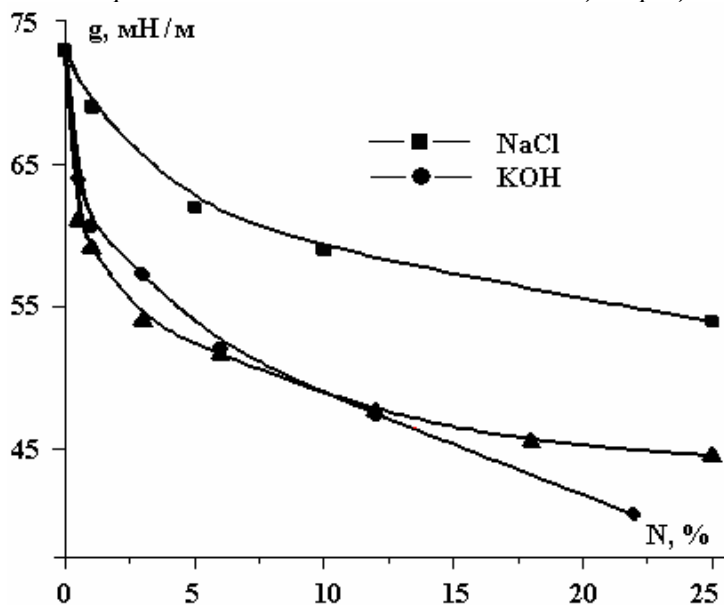


Рис. 7. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от концентрации электролитов

## 2. Исследования зависимости объемной скорости прошивки стекол от технологических параметров

Предварительно проведенные исследования показали возможность прошивки отверстий в образцах как из стекла, так и композитной керамики. Широкий выбор образцов из стекла как количественно, так и качественно (с разнообразными физико-механическими свойствами и размерами) в отличие от имеющейся композитной керамики давал возможность провести исследования с большим числом образцов измеряемых параметров. Ввиду этого основным объектом исследования воздействия плазменной оболочки на диэлектрические изделия были стеклянные пластины.

Процесс прошивки стеклянных и керамических пластин осуществлялся на экспериментальном стенде (см. рис. 1). Пластины устанавливались в держателе, который расположен в ванне с рабочей жидкостью (на рисунке не показано). В качестве ЭИ, вблизи которого образуется парогазовый слой, использовались вольфрамовые прутки различного диаметра. Автоматическое поддержание межэлектродного расстояния и механической нагрузки на обрабатываемые образцы производилось

компенсирующим устройством и демпфером. Все эксперименты проводились при прямой полярности электродов.

Было исследовано влияние вкладываемой электрической мощности на скорость обработки оптического стекла при постоянной скорости вращения ЭИ ( $n=2000$  об/мин) и емкости релаксационного генератора  $0,5$  мкФ. На рис. 8 показана зависимость скорости прошивки отверстий в стеклянной пластине толщиной  $4$  мм в  $6\%$  водном растворе NaCl при диаметре электрода-инструмента  $1,5$  мм от вкладываемой электрической мощности.

Верхние и нижние пределы ограничены максимально возможной величиной вкладываемой электрической мощности, при которой ЭИ не оплавляется, и минимальной величиной скорости обработки. Как следует из рисунка, эта зависимость носит линейный характер.

Проведены исследования зависимости скорости объемной прошивки стеклянных образцов от частоты оборотов ЭИ. Выяснено, что существует оптимальная частота оборотов ЭИ, при которой скорость обработки максимальна (рис. 9). В случае неизменной величины вкладываемой электрической мощности и концентрации электролита скорость обработки возрастает с уменьшением диаметра ЭИ, что можно объяснить различием потока энергии на единицу обрабатываемой поверхности. Рост скорости обработки с увеличением числа оборотов ЭИ определяется абразивным эффектом воздействия вольфрамового электрода и ростом интенсивности выноса продуктов эрозии из зоны обработки.

Уменьшение скорости обработки при дальнейшем возрастании частоты оборотов ЭИ связано с гидродинамическим эффектом разрушения парогазовой оболочки в результате вращения ЭИ. На это указывает тот факт, что уменьшение диаметра ЭИ смещает зависимость в область больших частот.

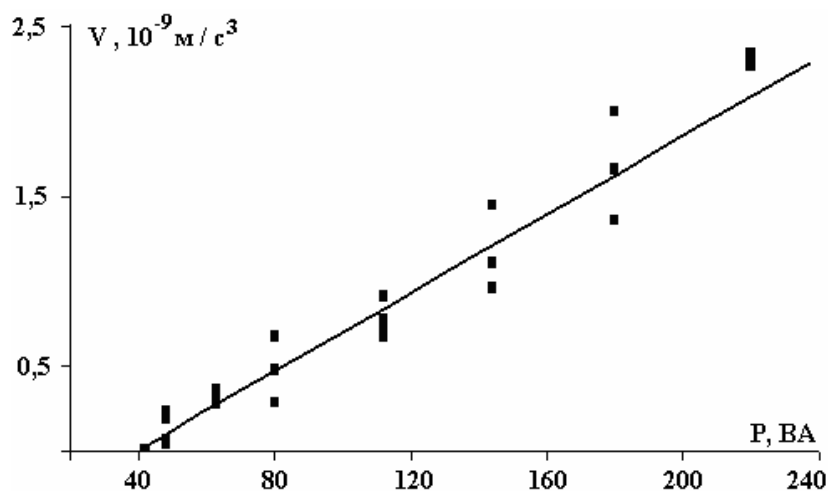


Рис. 8. Зависимость скорости съема от мощности на  $6\%$  электролите NaCl.  $V = const$ .  
 $C = 0,5$  мФ

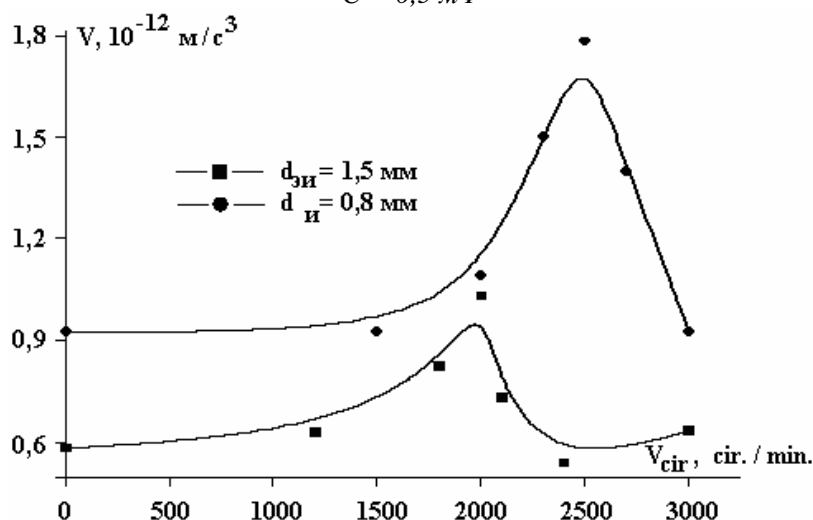


Рис. 9. Зависимость скорости съема от вращения ЭИ на  $6\%$  электролите NaCl.  $T = const$ .  
 $C = 0,05$  мФ.  $P = 40$  VA

Для объяснения механизма воздействия электрического разряда на диэлектрик могут быть использованы результаты исследования зависимости скорости обработки от емкости релаксационно-

го генератора, представленные на рис. 10. Скорость обработки возрастает с уменьшением величины емкости и достигает максимального значения для емкости 0,1 мкФ, при которой характерные частоты находятся в области ультразвуковых частот, что подтверждает осциллографические наблюдения. Известно, что стекло хорошо обрабатывается ультразвуковыми методами с использованием абразивов.

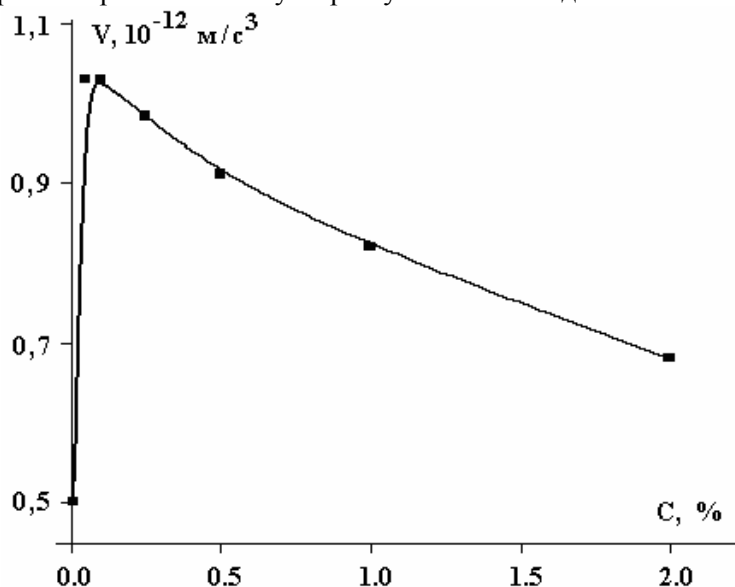


Рис. 10. Зависимость скорости съема от емкости конденсатора на 6% электролите NaCl.  $d_{ЭИ} = 1,5$  мм.  $T = const$ .  $P = 40$  VA

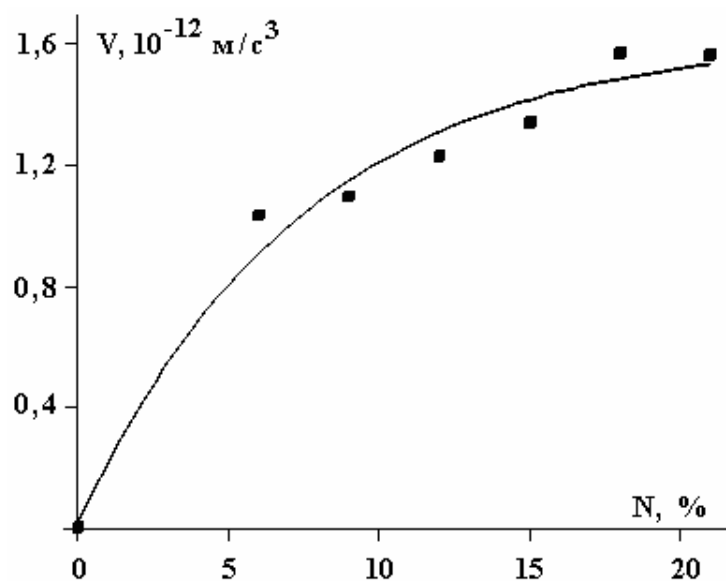


Рис. 11. Зависимость скорости съема от концентрации NaCl.  $T = const$ .  $C = 0,5$  мФ.  $P = 40$  VA

Таким образом, одним из факторов воздействия на процесс обработки наряду с плазмохимическим воздействием, стимулированным высокой температурой, является кавитация, возникающая в результате генерации ультразвуковых колебаний в области катода. Измерения зависимости скорости обработки стекол от концентрации электролита, представленные на рис. 11, косвенно подтверждают эти выводы. Как указывалось, с ростом концентрации электролита уменьшается коэффициент поверхностного натяжения, из-за чего проводимость увеличивается, в результате чего сопротивление разрядного промежутка в свою очередь уменьшается. Это приводит к уменьшению постоянной времени разряда RC-генератора и соответственно к сдвигу характерных разрядных частот в область высоких частот. В связи с этим в области низких концентраций, согласно характеру изменения коэффициента поверхностного натяжения, скорость обработки низка и возрастает с увеличением концентрации.

## Заклучение

Измерения вольт-амперных характеристик прохождения тока выявили общий характер зависимости, имеющий четыре переходных режима. Характеристики переходных режимов зависят как от электрических режимов, так и от типа электролита, его концентрации и не зависят от межэлектродного расстояния. Третья фаза характерна появлением плазменной оболочки в катодной области в результате перераспределения напряжения в цепи электролита, и вся подводимая энергия электрического поля концентрируется в этой области. Для каждого электролита при одинаковом материале катода существуют напряжения и соответствующие плотности токов, при которых появляется плазменная оболочка. Найдена корреляция между этими параметрами и измеренными значениями коэффициента поверхностного натяжения исследуемых электролитов.

Установлено, что в режиме образования плазменной оболочки вблизи катода в электролитной среде возможна обработка неэлектропроводящих материалов. Исследовано влияние на скорость обработки этих материалов таких технологических параметров, как вкладываемая электрическая мощность, концентрация электролита, частота оборотов электрода-инструмента и емкости релаксационного генератора. Показано, что зависимость скорости прошивки от частоты релаксационного генератора и частоты оборотов электрода-инструмента носит экстремальный характер.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Камада Х., Дайки Х., Маэхата Х.* Исследование процессов обработки керамических материалов // Хиташи дзосен гихо. 1986. 47. № 3/4. С. 92–98.
2. *Hanreich G., Mundleina M., Hauser H/, Nicols J. and other.* Ultra-thin pick-up coil for surface flux detection // *Sensors and Actuators*. 2001. А 91. С. 57–60.
3. *June–Ho, Young–Hag Koh, Hyoun–Ee Kim.* Densification and Mechanical Properties of titanium Diboride with Silicon Nitride as a Sintering Aid // *J.Am.Ceram.Soc.* 1999. 82.(11). 3037–42.
4. *Hideyki Horisava, Noritoshi Akimoto, Hioraki Ashizawa.* Эффекты лазерного воздействия на тугоплавкую керамику в химически активной среде // *Поверхность и технология покрытий*. 1999. 112. С. 389–393.
5. *Horisawa и др.* Обработка керамики в ортофосфорной кислоте // *Поверхность и технология покрытий*. 1999. 112. С. 369–374.
6. *Абдукаримов Э.Т., Миркаримов А.М., Зарипов А.А.* Исследование электрического разряда в водном растворе электролита // *Uzbek Journal of Physics*. 2003. Vol. 5. 1. С. 52–57.
7. *Попилов Л.Я.* Нагрев металлов в электролите // *Новое в электрофизической и электрохимической обработке металлов*. М., 1968. С. 124–147.

Поступила 24.11.06

## Summary

The authors worked out the new method of combined electric-erosion, electric-chemical processing of dielectrics in electrolytic medium. This article is dedicated to the study of the process of passing of electric current through the aqueous solution of electrolyte. With the help of the measurements of volt-ampere characteristics of current passing through the electrolytes under research the total electrolytes character of dependence, which has 4 transition regimes, and the, was determined. The characteristics of transition regimes depend on both electric regimes and the types of electrolytes and their concentration and don't depend on the distance between the electrodes. It's characteristic of the third phase that a plasma envelope appears which is accompanied by distraction of dielectric. It's shown that tension and corresponding current density, at which the plasma envelope occurs, exist for every type of electrolyte when the material of a cathode is not changed. It's determined the correlation between these parameters and the coefficient of surface-tension of studied electrolytes. The results of the study of the dependence of the speed of volumetrically broaching upon such technological parameters as a put in electric power, the frequency of revolutions of an electrode instrument, the frequency of a relaxation generator and the concentration of electrolyte. The problem of the mechanisms of the influence of electric discharge in electrolyte upon dielectric is discussed.