

# ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СЪЕМ МАТЕРИАЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Алексеев Ю.Г., Кособуцкий А.А., Королев А.Ю.,  
Нисс В.С., Кучерявый В.Д., Повжик А.А.

УП «Технопарк БНТУ «Метолит»  
220013, г. Минск, пр. Я. Коласа 24, [alekseev@icm.by](mailto:alekseev@icm.by)  
Белорусский национальный технический университет  
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

## 1. Физико-химические процессы, протекающие при электролитно-плазменной обработке

Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) является высокопроизводительным методом снижения шероховатости, очистки, подготовки под покрытия поверхностей изделий сложной формы [1]. Это экологически чистый и безвредный процесс, протекающий с использованием электролитов с низкой концентрацией солей.

ЭПО – процесс, состоящий из двух параллельных стадий обработки детали (анод) в электролите (катод): 1 – окисление всех компонент материала анода за счет взаимодействия с ионами  $O^-$  и гидроксильными группами  $OH^-$ ; 2 – избирательное сглаживание (удаление) окисленных микровыступов на поверхности анода за счет ионно-пучкового распыления (травления). На рис. 1 представлена вольтамперная характеристика (ВАХ), которая отражает три стадии анодного процесса в электролите:

1. Классический электролиз (0-A), сопровождающийся выделением на аноде пузырьков кислорода и электрохимическим растворением материала анода.

2. Переходная фаза (A-B), при которой под воздействием высокого напряжения в зоне контакта металлического анода и электролита происходит вскипание электролита и у поверхности анода образуется большое количество пузырей пара, чередующееся с возникновением «электролитных мостиков» и дискретных электрических разрядов.

Устойчивая фаза процесса (B-C), сопровождающаяся формированием парогазовой оболочки (ПГО) вокруг обрабатываемой поверхности, соответствующая режиму ЭПО. ПГО состоит из паров воды, газообразных продуктов

окисления компонентов обрабатываемых поверхностей и активированных  $OH^-$ ,  $H^+$  и  $O^-$  ионов.

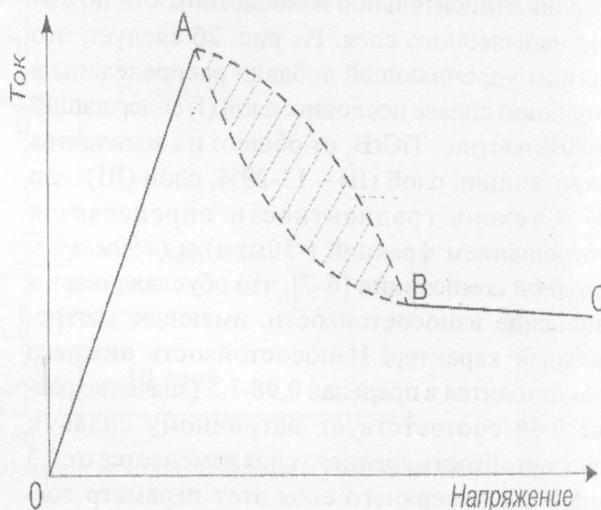


Рис. 1. Вольтамперная характеристика анодного процесса в электролите

Плотность тока в устойчивой фазе процесса составляет  $0,15 \dots 0,4 \text{ A/cm}^2$ . Возрастает электрическое сопротивление в цепи деталь-электролит. При этом сила тока резко уменьшается, и напряжение источника питания почти полностью прикладывается к образовавшейся ПГО. Таким образом, из-за высокой локальной напряженности электрического поля возникает частичная ионизация газа с протеканием электрического тока через ПГО в виде импульсных и диффузных электрических разрядов. Электрический ток, проходя через ПГО, влечет возникновение плазменных процессов, характерных для газового разряда.

На границе раздела раствор-газ наблюдается интенсивное образование гидроксила, который в реакции  $OH^- + OH^- \rightarrow H_2O + O$  образует в газовой среде свободные молекулы воды. Они, как диэлектрик с большой диэлектрической

постоянной, притягиваются к аноду в области максимальной напряжённости поля и поляризуются на нём. Высокая концентрация гидроксила приводит к покрытию анода тонким слоем поляризованных молекул воды, способствуя образованию вокруг анода слоя промежуточного раствора. Между электролитом и образовавшимся слоем происходят электрические микрозаряды.

Адсорбированный слой молекул воды образуется за счёт свободных молекул, находящихся в газовой среде с высокой напряжённостью электрического поля (между раствором и анодом) при безэлектродном разряде ионов  $\text{OH}^-$ . Качественный химический анализ собранных с анодов растворов (при различных составах электролитов) показал [2], что они представляют собой раствор с высокой концентрацией различных ионов, вызывающих интенсивные окислительные процессы на поверхности анода, происходящие в результате протекания электрохимических реакций между анодом и промежуточным слоем, что подтверждается наличием ионов анода в растворе. Электрические заряды между основным раствором и промежуточным слоем сосредоточены преимущественно на макро- и микровыступках поверхности анода. Электроразряды сопровождаются микровзрывами, которые отрывают образовавшийся оксидный слой и способствуют нивелированию поверхности. Незначительный нагрев анода, несмотря на интенсивные многочисленные электрические заряды, связан с активным испарением электролита в ПГО и, как следствие, сопровождается значительным поглощением тепла. Таким образом, в качестве основных механизмов полирования при ЭПО выступают электрические заряды, ионно-химическое и чисто ионное распыление образующихся окисных слоев.

На разработанной специально для эксперимента малогабаритной установке ЭПО (рис. 2), оснащённой необходимой контролирующей аппаратурой и смотровым окном в рабочей ванне, производились визуальные наблюдения, цифровая видеосъёмка и фотографирование пульсирующей ПГО на образцах в различных фазах процесса.

В качестве объектов исследований использованы образцы различной формы из стали 12Х18Н10Т (цилиндрической, плоской, сложной) в большом диапазоне размеров (площадью от 3 до 1000 мм<sup>2</sup> в поперечном сечении, длиной до 200 мм) и при их различном расположении в зоне обработки (вертикальном и горизонтальном).

Согласно проведенным исследованиям, а также из практического опыта обработки изделий сложной пространственной формы, кривизна поверхности степень её выпуклости или вогнутости, ориентация и глубина погружения оказывают значительное влияние на особенности формирования ПГО, её толщину и стабильность, а как следствие, на интенсивность протекания процесса ЭПО.

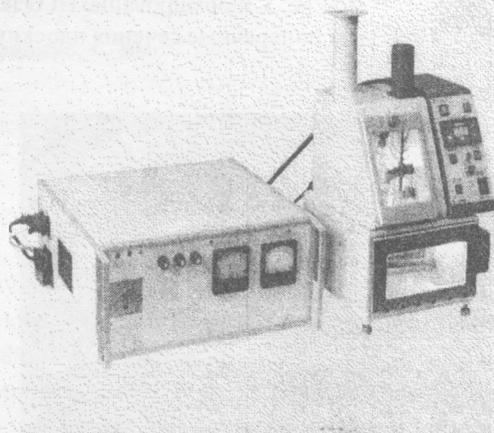


Рис. 2. Экспериментальная установка ЭПО

## **2. Исследование процессов формирования парогазовой оболочки при обработке изделий различной формы и размеров. Влияние формы и размеров обрабатываемых изделий на скорость съёма материала**

Обработке подвергали ленты различной толщины и трубки разного диаметра, установленные при обработке вертикально. По результатам исследований отмечено, что величина ПГО на образцах разной формы и размеров неодинакова (рисунки 3 и 4, где 1 — обрабатываемое изделие - анод, 2 — ПГО, 3 — электролит - катод).

Анализ видеонаблюдений ПГО и измерения в масштабе показали, что толщина ПГО лежит в пределах 0,01...1,2 мм. Эти данные хорошо согласуются с результатами, приведенными в работах [3, 4]. Показано, что при обработке выпуклых криволинейных поверхностей толщина ПГО меньше, чем над плоской поверхностью. В области кривизны возрастает напряженность электрического поля, и интенсифицируются физико-химические процессы. Обработка вогнутых поверхностей сопровождается увеличением толщины ПГО в области кривизны по сравнению с плоским участком.

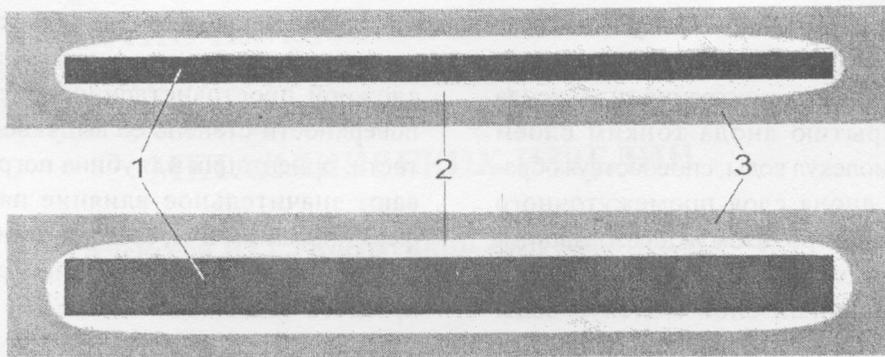


Рис. 3. Формирование ПГО на плоских образцах различной толщины. Показаны поперечные сечения плоских лент, вертикальное расположение при обработке

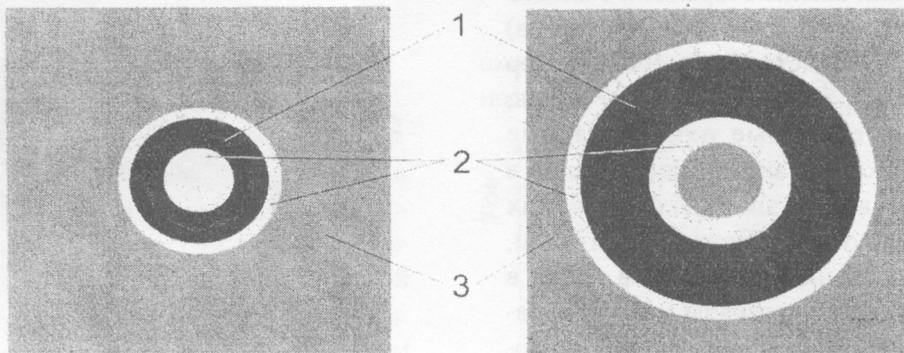


Рис. 4. Формирование ПГО на образцах цилиндрической формы. Показаны поперечные сечения прутков, вертикальное расположение при обработке

Толщину ПГО, прежде всего, определяет давление в парогазовой оболочке, которое согласно закону Лапласа над криволинейной поверхностью при ЭПО описывается уравнением:

$$P = P_0 + P_e + P_p + P_r,$$

где:  $P_0$  – внешнее давление;  $P_e$  – давление слоя электролита;  $P_p$  – дополнительное давление электролита на ПГО, вызванное силой пondeмоторного взаимодействия;  $P_r$  – дополнительное давление, обусловленное кривизной поверхности электролита на границе оболочка – электролит.

Так в работах [5, 6] приводятся расчетные значения эффективной толщины ПГО, в зависимости от радиуса кривизны обрабатываемого образца и приложенного к аноду напряжения. Показано, что при обработке выпуклых криволинейных поверхностей толщина ПГО меньше, чем над плоской поверхностью. В области кривизны возрастает напряженность электрического поля, и интенсифицируются физико-химические процессы, приводящие к увеличению съема металла в области кривизны по сравнению с плоским участком. Обработка вогнутых

поверхностей сопровождается увеличением толщины ПГО в области кривизны по сравнению с плоским участком, что приводит к снижению производительности процесса. Энергия электрического поля в электролите концентрируется на выпуклых поверхностях, где толщина ПГО минимальна, и чем меньше радиус кривизны поверхности и тоньше ПГО, тем больше интенсивность съема материала, так как плотность электрических разрядов в этих условиях значительно возрастает. Этим объясняется акцентированный съём с острых кромок и заусенцев. Для вогнутых поверхностей наблюдается обратная зависимость и полное отсутствие обработки в отверстиях и полостях малого диаметра.

Установлена экспериментальная зависимость между скоростью съема материала  $V$  и исходным наружным радиусом образца  $r_0$ . Для этого подвергали обработке прутки исходного диаметра 1,5 мм, расположенного горизонтально на глубине 245 мм, в течение 180 мин, при этом через каждые 20 минут процесс останавливали и проводили измерения диаметра. На рис. 5 показаны результаты эксперимента, а также результаты математической обработки – линия тренда.

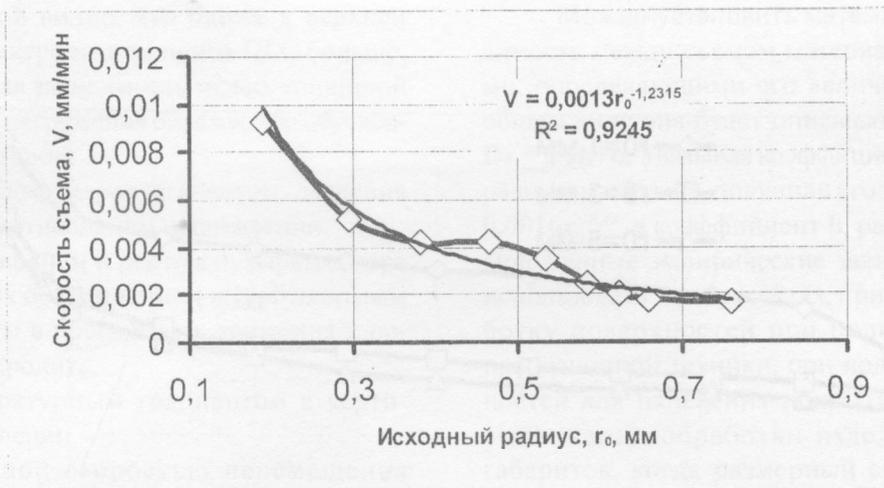


Рис. 5. Влияние исходного наружного радиуса на скорость съема материала

Экспериментальная зависимость между скоростью съема и исходным диаметром описывается формулой:

$$V = 0,0013r_0^{-1,2315},$$

при достоверности аппроксимации -  $R^2 = 0,9245$ .

Аналогичная зависимость получена при обработке вертикально расположенных образцов на глубине 40 мм с различным исходным радиусом (1,0 мм, 3,0 мм и 5,0 мм). На рис. 6 показана зависимость усреднённой скорости съема материала от исходного наружного радиуса образцов после обработки в течение 3 часов



Рис. 6. Зависимость усреднённой скорости съема материала от исходного радиуса образцов при вертикальном их расположении в электролите

С уменьшением исходного наружного радиуса скорость съема материала возрастает. Таким образом, если предположить, что скорость пропорциональна толщине ПГО, а в соответствии с зависимостью, полученной в работах [5, 6], эффективная толщина ПГО определяется радиусом обрабатываемой детали, то экспериментальные данные показывают хорошую сходимость с теоретическими расчётами. Толщина ПГО и ее форма, как было указано выше, существенно влияют на интенсивность протекающих на обрабатываемой поверхности физико-химических процессов и, как следствие, на производительность процесса и качество полируемой поверхности.

### 3. Исследование влияния ориентации и глубины погружения обрабатываемого изделия на съём материала и формирование парогазовой оболочки

Обработке подвергали образцы цилиндрической формы (диаметр 2, 6 и 10 мм, длина 110 мм) при их вертикальном расположении в зоне обработки. На рис. 7 представлены зависимости, отражающие распределение в вертикальном направлении размерного съема материала заготовок по мере удаления от поверхности электролита после обработки в течение трех часов.

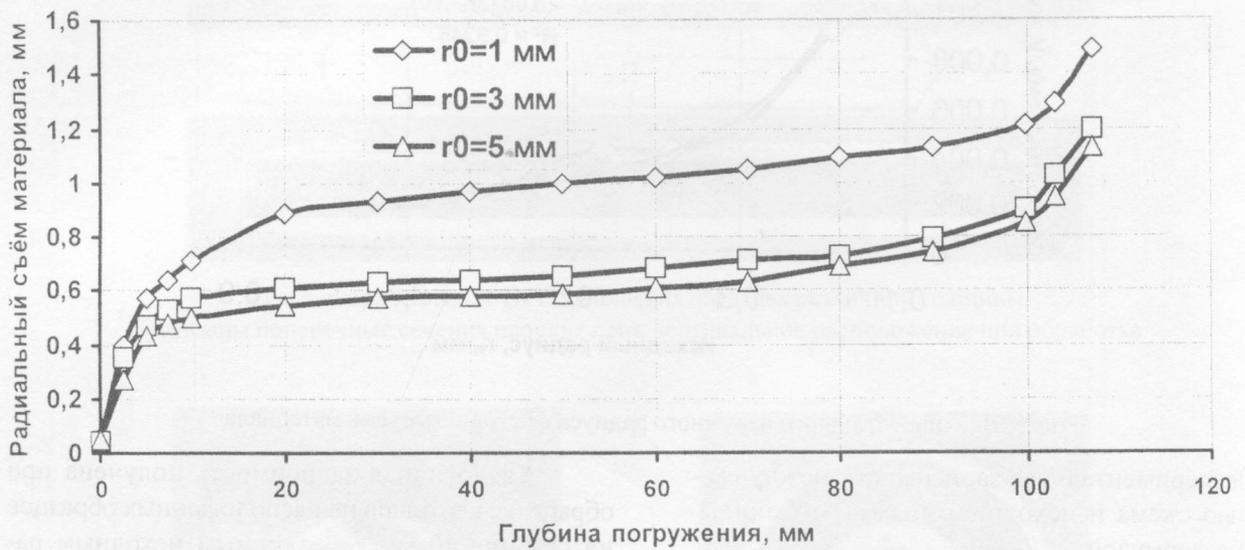


Рис. 7. Распределение размерного съема материала при вертикальной обработке цилиндрических заготовок

С увеличением расстояния от поверхности электролита повышается интенсивность съема материала. При этом представленные зависимости имеют три выраженные зоны:

I – Переходная зона от поверхности электролита до зоны устойчивой ПГО. Ее глубина зависит от диаметра заготовки.

II – Зона устойчивой ПГО вокруг вертикально расположенной цилиндрической поверхности.

III – Зона интенсивного съема в зоне сопряжения цилиндрической поверхности с плоской торцевой.

На рис. 8 графически представлены характерные зоны формирования ПГО при обработке цилиндрической вертикально расположенной заготовки.

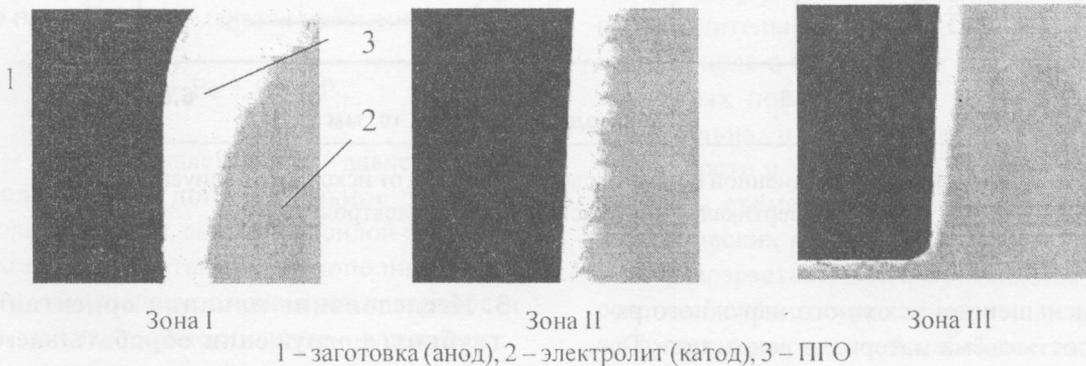


Рис. 8. Характерные зоны формирования ПГО при обработке цилиндрической вертикально расположенной заготовки

Переходная зона I характеризуется пониженным съемом, что связано со значительным увеличением толщины ПГО за счет накопленного объема поднимающихся вдоль цилиндрической поверхности пузырей пара и газа и резким снижением гидростатического давления при выходе пузырей на поверхность. При этом вертикальный размер переходной зоны ПГО изменяется в

зависимости от радиуса цилиндра. С уменьшением радиуса увеличивается длина (глубина) данной зоны.

В зоне II наблюдается прямо пропорциональная зависимость между съемом и глубиной погружения. Это можно объяснить характером изменения толщины ПГО на этом участке. На рис. 9 показана фотография процесса

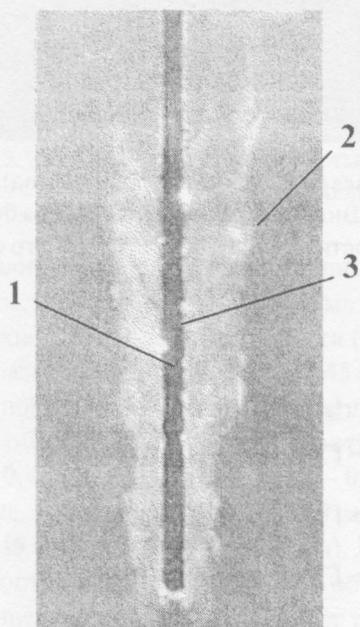
ЭПО, на которой видно, что ближе к верхней поверхности электролита толщина ПГО больше, имеется линейная зависимость между толщиной ПГО и глубиной погружения образца, что обусловлено рядом факторов:

1. Перепадом гидростатического давления электролита в вертикальном направлении.

2. Образованим и ростом пузырьков пара и газа, а также их объединением и турбулентным перемешиванием в процессе их движения к поверхности электролита.

3. Температурным градиентом в вертикальном направлении.

Переменной скоростью перемещения электролита вместе с поднимающимися пузырями пара и газа.



1 – заготовка (анод), 2 – электролит (катод), 3 – ПГО  
Рис. 9. Вид ПГО, формирующейся на вертикальной поверхности обрабатываемого образца

Можно установить математическую зависимость между съемом материала и параметрами, определяющими его величину в зоне II. В общем виде она будет описываться уравнением  $Dr = aCh + b$ . Увязывая коэффициент  $a$  с исходным радиусом образца, получили его значение, равное  $0,0016r_0^{-0,43}$ , а коэффициент  $b$ , равный  $0,412r_0^{-0,31}$ . Полученные эмпирические зависимости можно использовать при расчётах припусков на обработку поверхностей при полировке деталей прецизионной техники, при подготовке поверхностей для нанесения покрытий, а также при выполнении обработки изделий небольших габаритов, когда размерный съём становится соизмерим с номиналом габарита.

Формирование зоны интенсивного съема III связано с концентрацией напряженности электрического поля на линии сопряжения цилиндрической и плоской торцевой поверхностей заготовки. Тонкая ПГО, образующаяся в торцевой части заготовки, достаточно стабильна (пузырьки газа движутся в радиальном направлении, перемещая электролит вдоль плоской поверхности, что также способствует повышению интенсивности съема). Кроме того, в зоне III происходит одновременный съём материала с цилиндрической и торцевой поверхностей. При этом радиус сопряжения плоской торцевой поверхности и цилиндрической – минимален, что приводит к резкому увеличению съема.

На рис. 10 представлены поперечные сечения горизонтально обработанных образцов диаметром 6 мм через 1, 2 и 3 ч ЭПО. Максимальный съём и, соответственно, минимальная толщина ПГО наблюдаются в нижней зоне образца. Причиной этому, как и в случае с вертикальной обработкой, является достаточно высокая стабильность ПГО в этой зоне, а также перепад давления электролита.

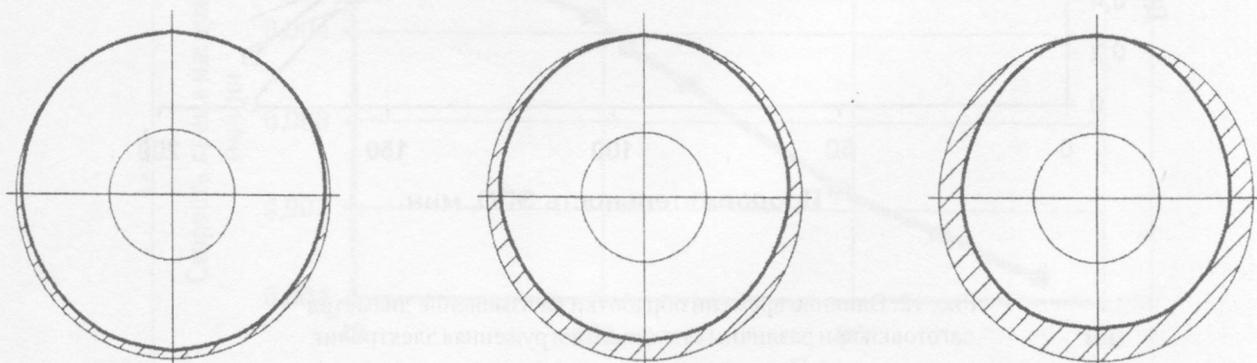


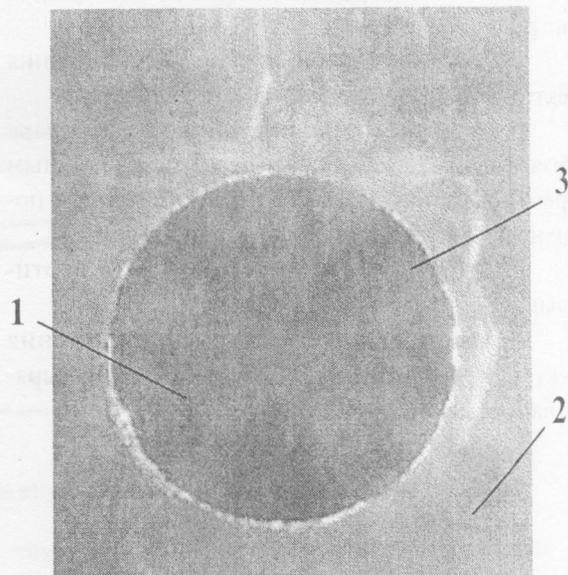
Рис. 10. Изменение профиля образца в процессе ЭПО  
(заштрихованная зона – удалённый в процессе ЭПО материал), а – 1 ч, б – 2 ч, в – 3 ч

Отрываясь от нижней поверхности, пузырьки пара и газа обтекают заготовку по образующей и устремляются вверх к поверхности электролита. Пузырьки, образующиеся на верхней части образца, суммируются с пузырьками, двигающимися вдоль криволинейной поверхности и, поднимаясь, образуют на верхней части вспененный слой большой толщины, блокирующий обработку. Это легко видеть из фотографии ПГО, представленной на рис. 11.

Для установления влияния глубины погружения на интенсивность съема исследовали зависимости съем-время на трех образцах при различной глубине их погружения (5, 145 и 245 мм). Для этого контролировали диаметр образцов при времени обработки от 20 до 180 мин через каждые 20 мин. В качестве исходного образца использовали прутки диаметром 1,5 мм. Обработку проводили в 4-% растворе сульфата аммония при температуре 80°C.

На рис. 12 представлены кривые, характеризующие интенсивность съема материала при различных значениях глубины погружения в электролит [7]

На рис. 13 представлены обработанные данные результатов данного эксперимента для установления зависимости скорости съема от глубины погружения.



1 – заготовка (анод), 2 – электролит (катод), 3 – ПГО  
Рис. 11. Вид ПГО, формирующейся на боковой поверхности круглого обрабатываемого образца

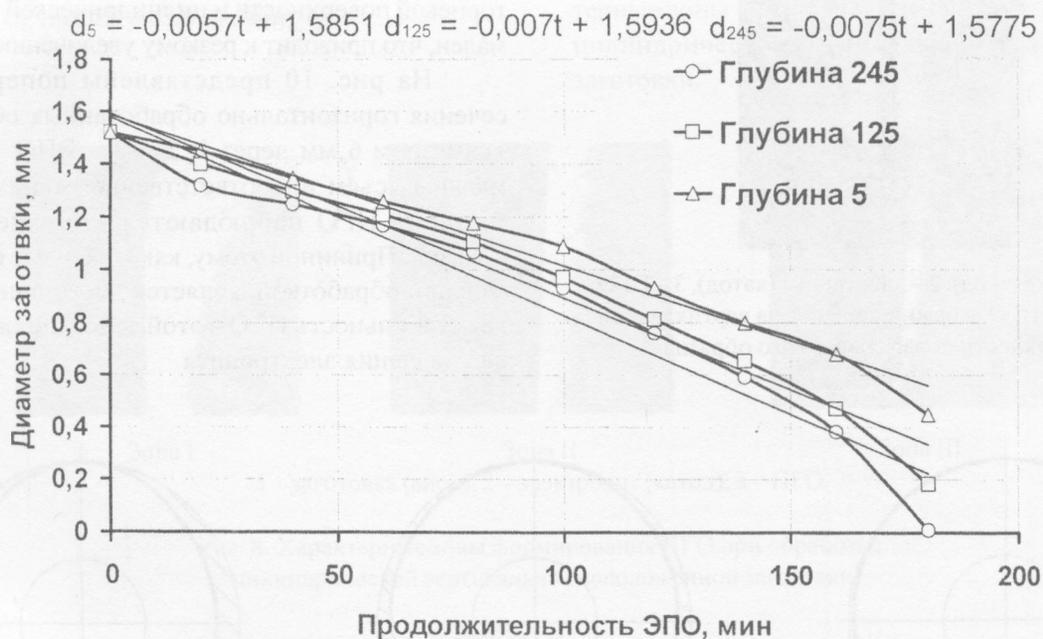


Рис. 12. Влияние времени обработки на изменение диаметра заготовки при различных глубинах погружения в электролит.

Прямые линии – линии тренда

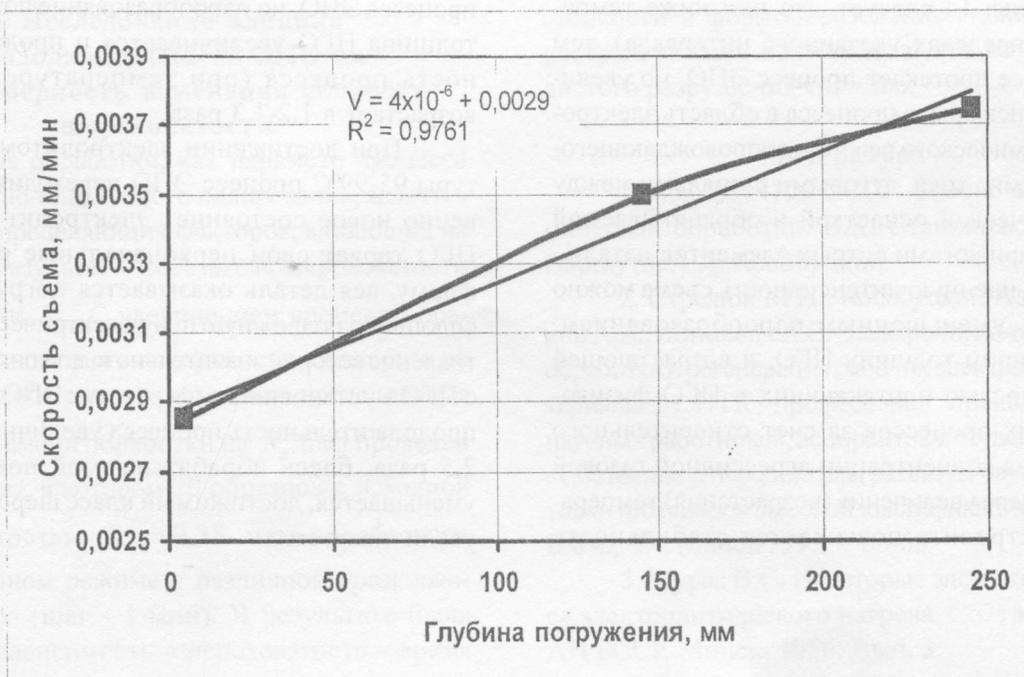


Рис. 13. Зависимость между скоростью съема и глубиной погружения в электролите при горизонтальном расположении обрабатываемых образцов

Анализ экспериментальных данных говорит о том, что интенсивность съема материала в приповерхностном слое электролита (глубина 5 мм) в 1,5 раза ниже, чем на глубине 245 мм. Таким образом, после обработки в течение трех часов диаметр образца в приповерхностном слое составил 0,45 мм (скорость съема – 0,35 мм/ч), на глубине 145 мм – 0,18 мм (0,44 мм/ч), а на глубине 245 мм – 0,01 мм (0,497 мм/ч). Линейный рост скорости съема, прежде всего, объясняется уменьшением толщины ПГО за счёт линейного роста по глубине давления электролита на неё.

#### 4. Исследование влияния температурных параметров на скорость съема материала и формирование ПГО

Исследование влияния температуры электролита на съём металла при ЭПО проводили в диапазоне температур электролита 42-99°C. Обработку осуществляли при концентрации электролита 4% и глубине погружения 150 мм. Длительность обработки составляла 10 мин.

На рис. 14 представлена зависимость величины съема от температуры электролита.

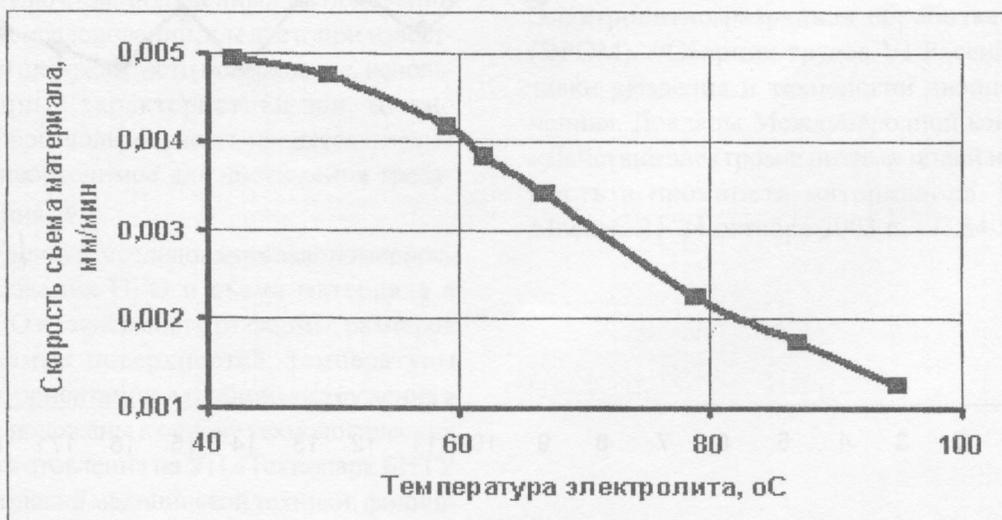


Рис. 14. Зависимость скорости съема материала от температуры электролита

Из рис. 14 следует, что чем ниже температура (в пределах указанного интервала), тем интенсивнее протекает процесс ЭПО, но увеличивается риск срыва процесса в область электрогидродинамического режима, сопровождающегося «бросками» тока, дугowymi разрядами между технологической оснасткой и обрабатываемой деталью, прижогами острых элементов детали.

Повышенную интенсивность съема можно объяснить уменьшенным парообразованием, формирующим толщину ПГО, и возрастающей интенсивностью протекающих в ПГО физико-химических процессов за счет относительного возрастания концентрации агрессивной газовой фазы. По мере увеличения (возрастания) температуры электролита повышается стабильность

процесса ЭПО, но парообразование повышается, толщина ПГО увеличивается и продолжительность процесса (при температуре 90-95°C) возрастает в 1,2-1,3 раза.

При достижении электролитом температуры 95-99°C процесс ЭПО переходит в качественно новое состояние. Электролит вскипает, ПГО теряет свои первоначальные размеры и форму, вся деталь оказывается погруженной в сплошную подвижную пену, электрическое сопротивление которой значительно выше по сравнению с ПГО в установившемся режиме ЭПО. При этом продолжительность процесса увеличивается в 2-2,5 раза, блеск обрабатываемой поверхности уменьшается, достижимый класс шероховатости увеличивается.

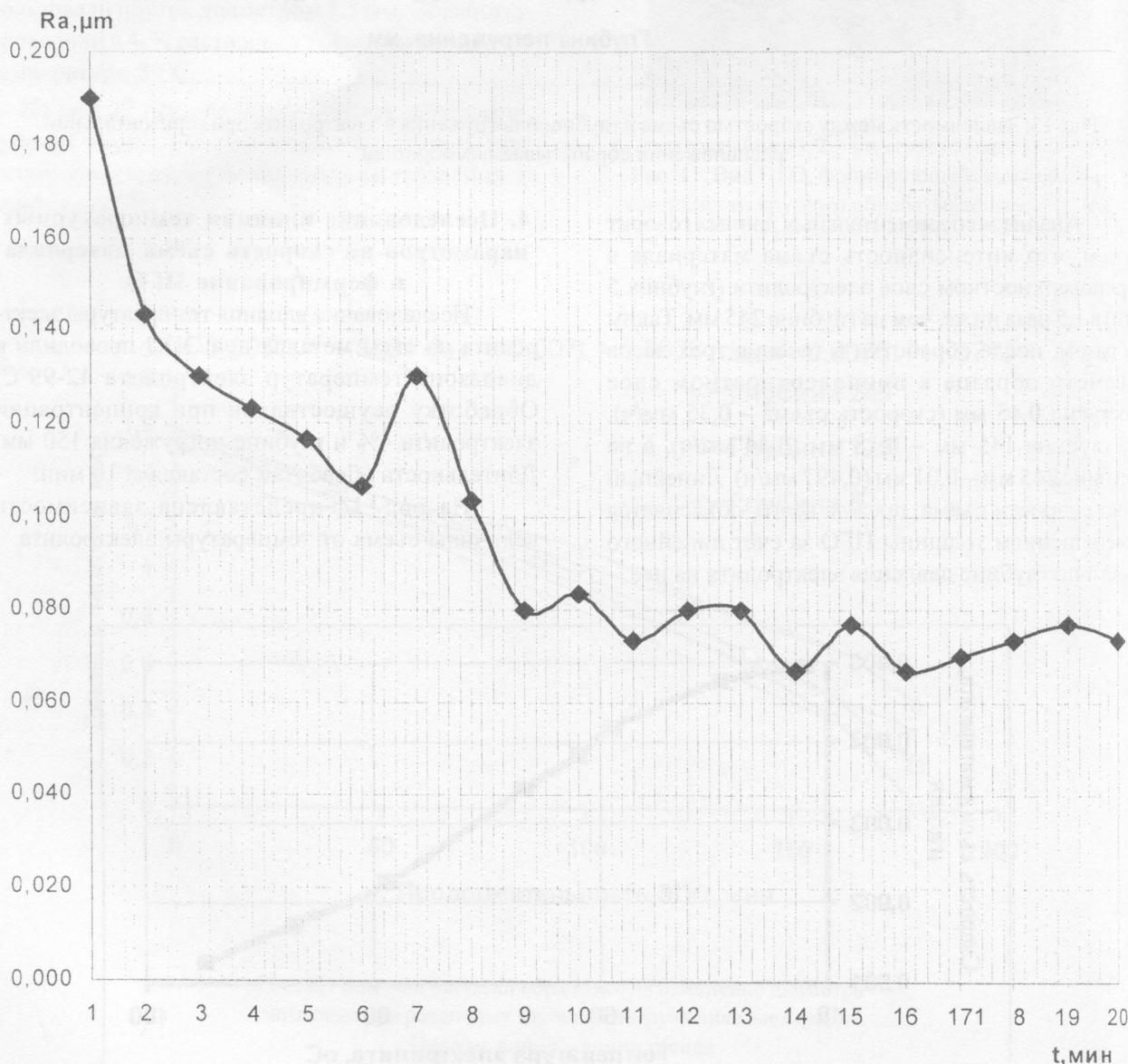


Рис. 15. Влияние продолжительности обработки на шероховатость поверхности

## 5. Исследование влияния продолжительности ЭПО на закономерность изменения скорости шероховатости

Время обработки, как параметр процесса электролитно-плазменного полирования, является одним из определяющих факторов, влияющих на конечный результат – показатель шероховатости поверхности  $R_a$ . С увеличением времени обработки шероховатость поверхности снижается до определенного предела. С целью исследования влияния времени обработки на  $R_a$  был проведен эксперимент, в котором 20 образцов с исходной шероховатостью  $R_a = 0,28$  мкм обрабатывались на одном режиме с различной продолжительностью (шаг - 1 мин). В результате была получена зависимость «шероховатость - время обработки», которая представлена на рисунке 15. Очевидно, что представленная зависимость имеет характерные зоны.

I-ая зона характеризуется относительно малой протяженностью ( $t_I = 3$  мин) и высокой интенсивностью процесса (средняя скорость снижения шероховатости  $\overline{v_{Ra}} = 0,02$  мкм/мин).

Для II-ой зоны характерна большая протяженность ( $t_{II} = 7$  мин) и средняя скорость снижения шероховатости  $\overline{v_{Ra}} = 0,007$  мкм/мин.

Для III-ей зоны характерна «боковая» тенденция и средняя скорость снижения шероховатости в рамках эксперимента  $\overline{v_{Ra}} = 0,001$  мкм/мин.

Из результатов, полученных на основании проведенных исследований, следует: при известной исходной шероховатости поверхности, используя полученные характеристики зон, можно установить производительность процесса и время обработки, необходимое для достижения требуемого значения  $R_a$ .

Проведенные исследования закономерностей формирования ПГО и съема материала в процессе ЭПО в зависимости от формы, размеров обрабатываемых поверхностей, температуры электролита, ориентации и глубины погружения в электролите положены в основу технологических процессов изготовления на УП «Технопарк БНТУ «Метолит» изделий медицинской техники: финишная обработка травматологических имплантантов и инструментов повышенной коррозионной

стойкости и формообразование гибких тонких ультразвуковых волноводов для внутрисосудистого разрушения тромбов.

## Литература

1. А.С. 1314729 СССР. Способ электрохимической обработки. В.К. Станишевский, А.Э. Паршуту, А.А. Кособуцкий.
2. Стрелюк М.И., Кособуцкий А.А., Савицкий А.А., Житкевич Л.С. Электролитно-плазменная обработка и регенерация рабочих электролитов. Материалы 51 НТК профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов БГПА «Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в БГПА». В 8 ч., Ч.4, Минск 1995, с. 65-66
3. Мурас В.С. Некоторые элементы процесса электролитического нагрева. Сб. трудов ФТИ АН БССР, Минск, 1956, Вып. 3.
4. Лазаренко Б.Р., Дурадзи В.Н., Факторович А.А., Брянцев И.В., Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе. Электролитная обработка материалов. 1974, №3.
5. Авсеевич О.И., Синькевич Ю.В., Головкина Е.Я., Романчук С.И. Электрогидродинамическая модель прианодной зоны при электроимпульсном полировании металлов. –М, 1988. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ, № 11 (205).
6. Авсеевич О.И., Синькевич Ю.В., Головкина Е.Я., Терехов С.Н., Романчук С.И. Расчет толщины парогазовой оболочки при электроимпульсном полировании/ Машиностроение. - Мн., 1990. – Вып. 15. – С. 60-63
7. Степаненко А.В., Доманевский Д.С., Алексеев Ю.Г., Кособуцкий А.А., Паршуту А.Э., Баранов Ю.В., Бурский В.А., Казаченко В.П. Электролитно-разрядная обработка металлов (ЭРОМ). //Сборник трудов VI Российской выставки «Изделия и технологии двойного назначения». Доклады Международной конференции «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов». Россия, г. Москва, 21-24 октября 2003 г., - С.84-86.