

## Abstract

The possibility of using nanosized copper particles as a filler for polyether ether ether ketone (PEEK) has been investigated. On the basis of a physical model of wear, the possibility of developing a tribotechnically effective composite with a filler of low wear resistance has been investigated; calculated concentration dependences of the relative intensity of linear wear of the composite in relation to the matrix for four sizes of dispersed filler from the nano- and micro-size range have been constructed. As a result, the ranges of effective filler concentrations when nano-copper is introduced into PEEK were determined. A molecular dynamics method was applied to investigate the reasons for the increase in the wear resistance of the nanocomposite upon introduction of dispersed copper particles. It was obtained that the energy of intermolecular bonds significantly increases in the presence of filler. As a result of modeling of sliding friction of molecular models, differences in the density of molecules in the area of contact with the counterbody before and after shear, as well as differences in the values of the energies of intermolecular interaction between the contacting surfaces depending on the shear time were revealed. Comparison of the data obtained as a result of modeling the molecular structures of the polymer matrix and composite with the constructed concentration dependences of the relative intensity of linear wear of the composite in relation to the matrix allows us to identify an additional reason for the increase in wear resistance of the composite and, in the future, to assess the change in wear resistance of the composite and to estimate the change in wear resistance by the value of the change in the energy of intermolecular bonds.

*Keywords:* sliding friction, wear resistance, tribotechnical efficiency, physical model of wear, matrix loading, polyetheretherketone, nanofiller, molecular dynamics, energy of intermolecular interaction.

УДК 378.16:621.9(075.8)

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-253

Н.Н. Горобей, А.С. Лукьяненко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия, n.gorobey@mail.ru

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАДИЕНТ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОБРАЗЦА ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОМ ПОЛИРОВАНИИ

### Аннотация

В данной работе детально описана физическая природа процессов при электролитно-плазменной полировке металлического анода с шероховатой поверхностью после механической полировки. Экспериментально установлено, что устойчивая парогазовая оболочка возникает при напряжениях  $U=300-400$  В. При этом температура анода – образца не повышается выше  $180^{\circ}\text{C}$ . Парогазовая оболочка необходима для возникновения канала искрового разряда между электролитом и анодом. Доля энергии одиночного разряда, расходуется на плавление вершины пирамидки поверхностного рельефа. В результате вершина пирамидки сглаживается за счет сил поверхностного натяжения. Рассматривая шероховатый поверхностный слой, как однородный поверхностный слой с тепловыми свойствами, отличными от свойств металлического образца, найден температурный градиент в поверхностном слое и определены условия эксперимента, при которых зона термического влияния

не проникает вглубь образца и не приводит к снижению прочностных его свойств.

*Ключевые слова:* Электролитно-плазменная полировка, поверхностный шероховатый слой, теплопроводность, искровой разряд, парогазовая оболочка.

### **Введение**

Одной из центральных научных проблем материаловедения является проблема влияния физико-химических свойств поверхности на функциональные характеристики деталей машин, инструментов и приборов. Поэтому уровень наших знаний о структуре, составе и физических свойствах поверхностей металлических деталей, а также о физических процессах, протекающих на поверхностях при различных видах обработки или полировки, обуславливает возможность успешного развития различных областей промышленности, в том числе и машиностроения.

В последнее время особое внимание уделяется электролитно-плазменному полированию (ЭПП) металлов [1-5]. Этот способ полирования обладает высокой производительностью ввиду короткого основного времени. Одним из преимуществ этого вида полирования является универсальность обработки сложно-профильных контуров. По сравнению с электролитно-химическим полированием ЭПП оказывается более экологическим, поскольку в качестве электролитов можно использовать растворы солей, а не агрессивные растворы кислот.

Для определения оптимальных параметров режима электролитно-плазменной обработки металлической поверхности необходимо выяснить физическую природу процессов, протекающих при этом. В данной работе описаны физические процессы, происходящие в шероховатом поверхностном слое металлического образца при ЭПП. Рассчитано температурное поле в поверхностном слое. Введено понятие зоны термического влияния. Исследована зависимость размеров этой области от параметров ЭПП.

### **Рельеф исходной поверхности**

После механической полировки деталей машин поверхность оказывается сильно шероховатой и представляет собой совокупность хаотически расположенных пирамидок. Среднее расстояние  $d$  между пирамидками варьируется от 200 до 1000 нм, а средняя высота  $h$  пирамидок от 50 до 200 нм.

В работах [6,7] методом сканирующей туннельной микроскопии СТМ исследовался поверхностный рельеф сплава  $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$  при внешнем растягивающем напряжении  $\sigma = 500 \text{ Н/мм}^2$ . Обнаружены даже при небольших нагрузках (порядка нескольких килограмм на миллиметр квадратный) крупномасштабные флуктуации поверхностного рельефа с вертикальными размерами от десятков до сотен нанометров. В [8] были сделаны снимки поверхности образцов из стали 12X18H10T для ЭПП на атомно-силовом сканирующем зондовом микроскопе Solver P47-PRO. Обнаружено, что высоты шероховатостей порядка (1300-1500) нм, т.е.  $Ra = (1,3-1,5) \text{ мкм}$ . Поперечные размеры обычно на порядок больше.

Наличие резких изгибов на вершинах и во впадинах приводит к резкому снижению прочностных свойств металлических деталей. Каждый такой изгиб является концентратором внутренних напряжений. В этом случае поверхность оказывается «слабым звеном» и провоцирует разрушение. Поэтому необходимо поверхность деталей подвергать финишной полировке для сглаживания вершин пирамидок.

## Методы и материалы

### *Постановка эксперимента.*

ЭПП образцов-заготовок проводилось в электрохимической ячейке [9,10]. ЭПП отличается от электролитно-химического полирования тем, что проводится при более высоких напряжениях  $U = 300 - 400 \text{ В}$  и больших плотностях тока [2,8]. Подбирается режим полирования таким, что температура внешней поверхности образца-заготовки не превышает  $180^\circ\text{C}$ . В электрохимической ячейке металлический образец играет роль анода. При данном режиме вокруг образца возникает плотная парогазовая оболочка, толщина которой составляет 0,025 см. Эта оболочка представляет собой диэлектрический слой, который при высоком напряжении пробивается разрядами с образованием плазменного канала между электролитом и вершиной пирамидки поверхностного рельефа. Это сопровождается резким повышением локальной температуры в зоне разряда [8]. В этой области происходит процесс плавления и испарения металла, а, следовательно, температура достигает температуры плавления. Однако ввиду малости расплавляемого объема и короткого времени разряда температура образца оставалась невысокой, т. е. порядка  $\geq 100^\circ\text{C}$ . В конечном счете, в результате разрядов происходит сглаживание вершин пирамидок за счет сил поверхностного натяжения расплавленного материала.

### *Образование парогазовой оболочки*

В работах [1-4] подробно описаны различные режимы протекания тока в системе электролит - металлический анод. При низких напряжениях в системе электролит-металл величина тока достаточно велика, так как при таком режиме ток беспрепятственно протекает через электролит, а затем через металл, который непосредственно контактирует с электролитом. Как электролит, так и металл являются хорошими проводниками. Однако граница раздела электролита и металлического анода имеет большее электрическое сопротивление из-за неоднородности, чем сопротивление электролита и металла. Это приводит к тому, что при повышении внешнего напряжения в зоне контакта выделяется больше тепловой энергии. Следовательно, происходит нагрев анода и кипение электролита, а при кипении из пузырьков образуется плотная парогазовая оболочка, обволакивающая металлический анод. При этом парогазовая оболочка оказывается достаточно устойчивой.

### *Искровой газовый разряд*

Из экспериментов известно, что время протекания газового разряда порядка  $10^{-7}\text{с}$ . Этот факт, а также прерывистая форма разрядов в виде молний и интенсивность свечения свидетельствуют о том, что мы имеем дело с искровыми разрядами [11]. По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся тонких полосок, мгновенно пронизывающих парогазовую оболочку, быстро гаснущих и постоянно сменяющих друг друга. Эти полоски называются искровыми каналами. После того, как оболочка «пробита» искровым каналом, ее сопротивление становится очень малым и через канал проходит кратковременный импульс тока большой силы. В это время на разрядный промежуток приходится незначительное напряжение. Если мощность внешнего источника не очень велика, то после такого импульса разряд прекращается. Напряжение между электродами начинает повышаться до прежнего значения, и пробой газа повторяется с образованием нового искрового канала.

Осциллографические исследования показали, что фактическое время

развития искрового разряда менее  $10^{-7}$ с. Этот факт свидетельствует в пользу стримерной теории искрового пробоя [12]. Суть ее заключается в следующем. Если вблизи катода зародилась электронная лавина, то на ее пути происходит ионизация и возбуждение молекул и атомов газа. Существенно, что световые кванты, испускаемые возбужденными атомами и молекулами, распространяясь к аноду со скоростью света, сами производят ионизацию газа и дают начало новым электронным лавинам. Таким путем появляются слабо светящиеся скопления ионизованного газа, называемые стримерами. В процессе своего развития отдельные электронные лавины догоняют друг друга и, сливаясь вместе, образуют хорошо проводящий мостик из стримеров. По этому мостику в последующий момент времени и устремляется мощный поток электронов, образующий канал искрового разряда. Поскольку проводящий мостик образуется в результате слияния практически одновременно возникающих стримеров, время его образования много меньше времени, которое требуется отдельной электронной лавине для прохождения от катода к аноду.

### Результаты и обсуждение

#### *Температурное поле в шероховатом поверхностном слое*

Представим шероховатый поверхностный слой образца как однородный слой, но со свойствами отличными от свойств самого металлического образца. Толщина этого слоя между парогазовой оболочкой и металлическим объемом образца порядка средней высоты шероховатости.

Распределение температуры  $T$  со временем  $t$  в образце можно найти из уравнения теплопроводности [13]. Решение этой задачи относится к решению краевой задачи для дифференциального уравнения эллиптического типа:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T \quad (1)$$

где  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $c$  - удельная теплоемкость материала Дж/кг·град,  $\rho$  - плотность вещества кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности Вт/м·град,

В нашем случае можно ограничиться рассмотрением одномерного уравнения (1) с осью  $Ox$ , направленной вглубь образца. Пусть  $x = 0$  на границе парогазовой оболочки с переходным слоем. Поэтому будем использовать решение одномерной задачи ( $\Delta = d^2/dx^2$ ) уравнения (1) с фиксированными температурами на верхней и нижней границах:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

В начальный момент времени  $t = 0$  температура слоя одинакова и равна комнатной температуре  $T_0$ . В начальный момент на верхней границе температура испытывает скачок. Температура на верхней границе все время поддерживается постоянной и равна температуре плавления  $T_{пл}$ . Требуется найти распределение температуры  $T(x, t)$  в слое во все последующие моменты времени. Решение уравнения (2) имеет следующий вид:

$$T = A \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}} \exp(-\xi^2) d\xi + B \quad (3)$$

$\alpha = \lambda/c\rho$  - коэффициент температуропроводности.

Остается найти постоянные интегрирования  $A$  и  $B$ . Полагая  $x = 0$ ,  $t \neq 0$ , получаем  $T = B$ . Таким образом, постоянная  $B$  дает температуру поверхности заготовки во все моменты времени  $t \neq 0$ . Но в данном эксперименте она постоянна и равна  $T_{\text{пл}}$ . Для определения постоянной  $A$  воспользуемся начальным условием:

$T = T_0$  при  $t = 0$ . Это дает  $T_0 = A \int_0^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi + T_{\text{пл}}$ . В интегральном исчислении

доказывается, что входящий сюда интеграл равен  $\sqrt{\pi}/2$ . Таким образом,  $T_0 = \frac{A}{2}\sqrt{\pi} + T_{\text{пл}}$ . Окончательное решение задачи имеет вид

$$T = 2 \frac{T_0 - T_{\text{пл}}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}} \exp(-\xi^2) d\xi + T_{\text{пл}} \quad (4)$$

Из (4) дифференцированием по  $x$  получаем значение температурного градиента

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_0 - T_{\text{пл}}}{\sqrt{\pi\alpha t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) \quad (5)$$

В частности, на поверхности, т.е. при  $x = 0$   $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_0 - T_{\text{пл}}}{\sqrt{\pi\alpha t}}$ .

При этом мы полагали, что коэффициент  $\alpha$  является постоянной величиной. Известно [14], что коэффициент теплопроводности твердого тела определяется по формуле

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho v \langle l \rangle c \quad (6)$$

где  $v$  - скорость передачи тепловой энергии в твердом теле,  $\langle l \rangle$  - средняя длина свободного пробега теплового колебания. С учетом (6) коэффициент температуропроводности равен

$$\alpha = \frac{1}{3} v \langle l \rangle c \quad (7)$$

Для оценки коэффициента  $\alpha$  в качестве  $\langle l \rangle$  возьмем межатомное расстояние  $a$ , скорость передачи тепловой энергии будем оценивать как  $v = \omega \cdot a$  ( $\omega$  - частота тепловых колебаний атомов). Тогда оценка дает  $\alpha \cong 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ , что почти на 3 порядка меньше обычного коэффициента  $\alpha$ , взятого для объемного материала. Это означает, что температура достаточно резко спадает в шероховатом поверхностном слое. Распределение температуры по толщине поверхностного слоя показано на рис.2.

Анализ температурных полей, показанных на рис. 1, свидетельствует о том,

что «проникновение» высокой температуры вглубь металлического образца сильно зависит от времени  $t$  импульса напряжения, которым достигается  $T_{\text{пл}}$  на верхней границе поверхностного слоя. Следовательно, с помощью этого параметра можно достичь таких условий, что высокая температура, возникающая при ЭПП, не будет «проникать» в объем металлического образца и не приведет к существенным структурным изменениям, которые могут существенно снизить эксплуатационные свойства металлических заготовок.

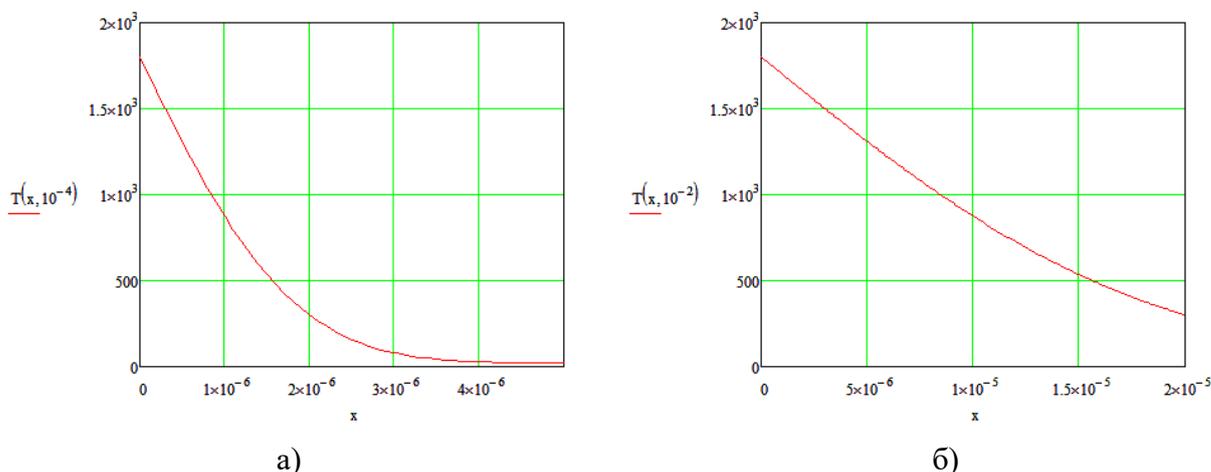


Рисунок 1. Температурные поля нержавеющей стали при импульсах а)  $10^{-4}$  и б)  $10^{-2}$  с

#### *Зона термического влияния*

Зона термического влияния – это область, в которой из-за высокой температуры в объеме происходят необратимые структурные перестройки кристаллической структуры. Эти перестройки, как правило, приводят к снижению прочностных характеристик материала. Наша задача – подобрать режимы обработки ЭПП так, чтобы размер зоны термического влияния не превосходил толщины переходного поверхностного слоя. В идеальном режиме необходимо сгладить ямку в шероховатом слое, но не углубляться в объем образца. Именно в яме находится самый высокий концентратор напряжений, который необходимо сгладить.

Определим размер зоны термического влияния как область, в которой температура падает в  $\ell$  раз. Зная  $\alpha$  нетрудно оценить зону  $h_{\text{ТВ}}$  термического влияния по формуле

$$h_{\text{ТВ}}^2 \cong 4\alpha t \quad (8)$$

Здесь  $t$  - длительность импульса подаваемого напряжения. Чем меньше импульс, тем меньше размер зоны термического влияния (рис.2). При  $t = 10^{-2}$  с зона термического влияния имеет размер  $h_{\text{ТВ}} \cong 20$  мкм. При  $t = 10^{-4}$  с -  $h_{\text{ТВ}} \cong 2$  мкм. В обоих случаях размер превышает размер переходного слоя. Поэтому оптимальным параметром времени является  $t = 10^{-5}$  с, так как в этом случае  $h_{\text{ТВ}} \cong 0,63$  мкм, что не превышает размер слоя.

При оптимальном подборе временного параметра подачи напряжения можно добиться того, что зона термического влияния не выходила за пределы шероховатого поверхностного слоя. Тем самым, мы можем обеспечить сохранение прочностных свойств образцов-заготовок после ЭПП.

#### **Заключение**

В данной работе детально рассмотрена физическая природа процессов при

ЭПП металлического анода с шероховатой поверхностью после механической полировки. Экспериментально установлено, что устойчивая парогазовая оболочка возникает при напряжениях  $U = 300-400 \text{ В}$ . При этом температура анода – образца не повышается выше  $180^\circ \text{ С}$ .

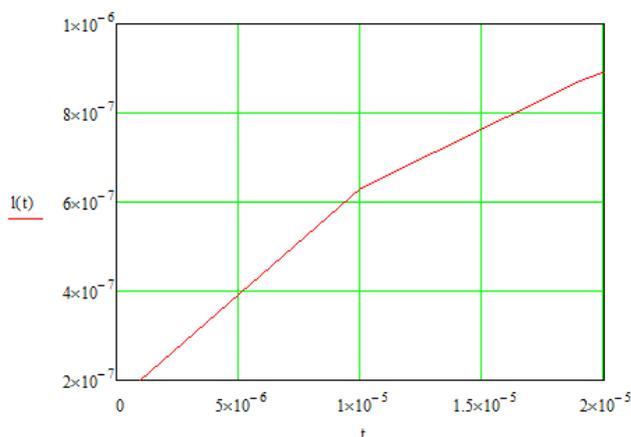


Рисунок 2. Зона термического влияния

Парогазовая оболочка необходима для возникновения канала искрового разряда между электролитом и анодом. Доля энергии одиночного разряда, расходуется на плавление вершины пирамидки поверхностного рельефа. В результате вершина пирамидки сглаживается за счет сил поверхностного натяжения.

Распределение температуры в пирамидках описывается зависимостью (4). Градиент уменьшения температуры определяется коэффициентом температуропроводности  $\alpha \cong 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ . Показано, что зона термического влияния зависит от времени  $t$  импульса напряжения, которым достигается  $T_{пл}$  на верхней границе поверхностного слоя. С помощью этого параметра  $t$  можно достигать оптимальных условий ЭПП, при которых высокая температура не «проникает» вглубь образца и не приводит к снижению прочностных его свойств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дураджи, В.Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В.Н. Дураджи, А.С. Парсаданян. – Кишинев: Изд. «Штиинца», 1988. -216 с.
2. Локтев, Д.Е. Исследование параметров электролитно-плазменного полирования низколегированной стали методом планирования полного факторного эксперимента / Д.Е. Локтев, Л.А. Ушомирская, В.И. Новиков // Металлообработка: научно-производственный журнал. - 2009. - №5(53). -С.15-18.
3. Новиков, В.И. Повышение эффективности изготовления сложно-профильных деталей из легированных сталей методом электролитно-плазменной полировки // дисс. канд.техн.наук. -2010. - СПб. -177 с.
4. Веселовский, А.П. Интенсификация технологических процессов изготовления деталей при использовании различных видов энергии / А.П. Веселовский, Л.А. Ушомирская // Металлообработка: научно-производственный журнал. - 2010. - №2. - С.46-49.
5. Новоселов, М.Н. Оценка возможностей полирования нержавеющей стали струйной электролитно-плазменной обработкой / Новоселов М.В., Шиллинг Н.Г., Рудовин А.А., Радкевич М.М., Попов А.И. // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2018. - Т.20. -№ 1. - С.94-100.
6. Корсуков, В.Е. Рост шероховатости на поверхности фольги аморфного сплава Fe<sub>70</sub>Cr<sub>15</sub>V<sub>15</sub> отклик на растягивающую нагрузку / В.Е. Корсуков, А.С., Лукьяненко, Б.А. Обидов, В.Н. Светлов, Е.В. Степин // Письма в ЖЭТФ. - 1993. - Т.57. - № 6. - С. 343-345.

7. Корсуков, В.Е. Трансформация нагруженной поверхности аморфного сплава Fe<sub>70</sub>Cr<sub>15</sub>V<sub>15</sub> / В.Е. Корсуков, А.С., Лукьяненко, Б.А.Обидов, В.Н.Светлов // Письма в ЖЭТФ. - 1992. - Т.55. - № 10. - С. 595-597.

8. Новиков, В.И. Исследование шероховатости поверхности сталей от параметров электролитно-плазменного полирования / В.И.Новиков, Л.А.Ушомирская // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. XXXVIII Неделя Науки СПбГПУ. - 2008. - Ч. IY. - С.107-108.

9. Горобей, Н.Н. Зона термического влияния при электролитно-плазменной полировке металлов / Н.Н.Горобей, Д.А.Зарубин // Материалы научной конференции с международным участием 14-19 ноября 2016. Неделя Науки ИММиТ. -2016. – Ч. 2. – С.160-161.

10. Горобей, Н.Н. Распределение температуры по глубине образца при электроэрозионном прошивании отверстий //Н.Н. Горобей, О.В. Греков, Д.К. Кабанов // Материалы научной конференции с международным участием 14-19 ноября 2017. Неделя Науки ИММиТ. – 2017. -Ч 2. – С.261-263.

11. Лозанский, Э.Д. Теория искры / Э.Д.Лозанский, О.Б.Фирсов / - Москва: Атомиздат, 1975. -271 с.

12. Омаров О.А. О плазменном механизме развития начальных стадий пробоя газов / О.А.Омаров, А.А. Рухадзе //Журнал технической физики. -2011. - Т.81. - №7. -С.43-48.

13. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н.Тихонов, А.А.Самарский / - Москва: «Наука», 2004. – 742 с.

14. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела /- Москва: «Наука», 1978. - 791 с.

N. Gorobey, A. Lukyanenko

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia, n.gorobey@mail.ru

## TEMPERATURE GRADIENT IN THE SURFACE LAYER OF THE SAMPLE DURING ELECTROLYTE-PLASMA POLISHING

### Abstract

This paper describes in detail the physical nature of the processes during electrolytic-plasma polishing of a metal anode with a rough surface after mechanical polishing. It has been experimentally established that a stable vapor-gas shell occurs at stresses  $U = 300 - 400 \text{ B}$ . In this case, the temperature of the anode - sample does not

increase above  $180^\circ \text{C}$ . The vapor-gas shell is necessary for the formation of a spark discharge channel between the electrolyte and the anode. A fraction of the energy of a single discharge is spent on melting the top of the pyramid of the surface relief. As a result, the top of the pyramid is smoothed due to surface tension forces. Considering the rough surface layer as a homogeneous surface layer with thermal properties different from the properties of the metal sample, the temperature gradient in the surface layer was found and the experimental conditions were determined under which the heat-affected zone does not penetrate deep into the sample and does not lead to a decrease in its strength properties.

**Keywords:** Electrolytic plasma polishing, surface rough layer, thermal conductivity, spark discharge, vapor-gas shell.