

УДК 621.357

## К ВОПРОСУ О МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Н. В. Плотников<sup>1</sup>, А. М. Смыслов<sup>2</sup>, Д. Р. Таминдаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>plotnicov.kolan@mail.ru, <sup>2</sup>smyslovam@yandex.ru, <sup>3</sup>tamd Amir@yandex.ru

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>3</sup>ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» (УАСТ)

**Аннотация.** Приводится физико-химическая модель образования и развития паровой пленки в процессе электролитно-плазменного полирования, объясняется механизм и суть процесса сглаживания микрошероховатости металлической поверхности. Схематично рассмотрены этапы, протекающие во время обработки, – от возникновения парового пузырька до его всхлопывания и удаления микровыступов с поверхности детали.

**Ключевые слова:** финишная обработка; паровая оболочка; анодный нагрев; полирование; электролитно-плазменное полирование; шероховатость.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс электролитно-плазменного полирования (ЭПП) берет свое начало в XIX в. и связан с развитием экспериментальных работ по исследованию процессов свечения и нагрева, происходящих как на, так и вблизи поверхности электрода малой площади в электрохимической ячейки (при высоких плотностях тока) [1]. В настоящее время этот перспективный метод обработки поверхностей деталей на финишных операциях их технологического процесса обработки до конца не изучен и находится на стадии исследований и разработки.

В работе [1] рассмотрены явления катодного и анодного нагрева токопроводящих материалов в водных растворах электролитов, процессы локального вскипания электролитов в окрестности электрода с малой поверхностью, формирование сплошной и устойчивой парогазовой оболочки, ее электрическая проводимость, теплофизические и электрохимические аспекты анодного варианта нагрева.

Авторы [2–4] работ изучают явления катодного нагрева металлических деталей для удаления с их поверхностей различных видов загрязнений и смазочных веществ для дальнейшего упрочнения поверхности деталей и нанесения разного рода металлических покрытий (Zn, Ni, Zn-Ni, Ni-Cu и т. д.).

В [5, 6] обобщены исследования, проведенные авторами за последние годы в области электролитно-плазменной обработки металлов и сплавов. Приведены основные особенности данной технологии и представлены новые науч-

ные и практические результаты по исследованию электролитно-плазменной обработки различных материалов.

Вместе с тем информация, изложенная в вышеуказанных статьях, не дает четкого представления о механизме удаления микрошероховатости с металлической поверхности детали в процессе ЭПП, а также не позволяет сделать вывод о том, что же является основным «рабочим инструментом», за счет чего проявляется эффект сглаживания металлической поверхности.

В данной статье, основываясь на исследованиях и экспериментах [1–6], приводится вариант химико-физической модели возникновения и развития паровой оболочки во времени, которая в свою очередь объясняет эффект сглаживания микрошероховатости в процессе полирования, т.е. позволяет выявить «рабочий инструмент» процесса ЭПП.

### ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ

Сущность метода ЭПП заключается в том, что к погруженному в водный раствор электролита обрабатываемому металлическому изделию прикладывается положительное, по отношению к электролиту, электрическое напряжение.

Прохождение тока через электрохимическую ячейку описывается вольтамперной характеристикой, показанной на рис. 1 [1].

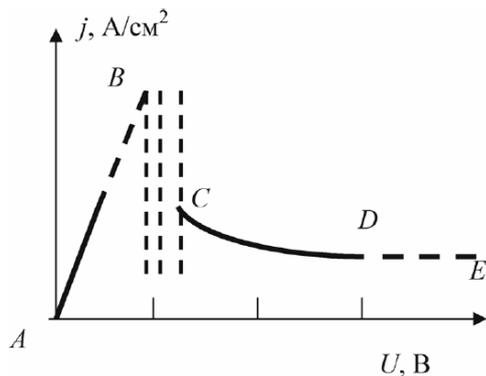


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика процесса ЭПП на аноде

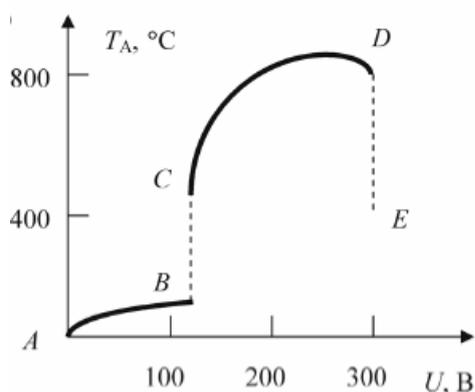


Рис. 2. Вольт-температурная характеристика нагрева анода в процессе ЭПП

При небольших напряжениях прохождение тока в объеме раствора описывается законом Ома, а процессы на электродах — законами Фарадея (участок *AB*) без каких-либо оптических или акустических эффектов. Увеличение напряжения приводит к разогреву электролита преимущественно в прианодной зоне, поскольку в ней сосредоточено почти все сопротивление электролитической ячейки. На участке *BC* имеет место режим прерываний тока. Прохождение тока через ячейку приобретает импульсный характер из-за того, что слой пара, окружающий анод, периодически конденсируется и снова образуется. Причиной разрушения оболочки является электрический пробой пара, вызывающий ее взрывное расширение и последующую конденсацию. Искровые разряды создают прерывистое свечение, возникновение и исчезновение оболочки сопровождаются шумом и треском. В точке *C* парогазовая оболочка становится устойчивой, через нее проходит постоянный ток с небольшими пульсациями. Температура анода резко возрастает. Участок *CD* представляет собой режим высокотемпературного нагрева. Вольт-амперная характеристика имеет падаю-

щий характер, поскольку толщина оболочки с ростом напряжения увеличивается, а ее электросопротивление возрастает.

Вольт-температурная характеристика имеет максимум при напряжениях 260–280 В (рис. 2). При меньших напряжениях возрастание температуры анода объясняется увеличением мощности, выделяемой в парогазовой оболочке. В точке *D* температура анода резко снижается, сила тока при этом практически не изменяется. На участке *DE* в оболочке возникают электрические разряды с разбрызгиванием электролита, который охлаждает анод [1].

### ХИМИКО-ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРОВОЙ ОБОЛОЧКИ

Модель паровой оболочки необходима для идентификации явлений, происходящих во время ЭПП, которая в свою очередь позволит выявить необходимые параметры обработки, с помощью которых возможно будет управлять процессом.

Как известно, существует два типа кипения жидкости [7]: пузырьковое и пленочное. Для того чтобы в процессе ЭПП происходило снижение шероховатости путем съема микровыступов с поверхности детали, на аноде должен поддерживаться пленочный тип кипения электролита. На участке *CD* (рис. 1) под действием высоких напряжений толщина паровой пленки увеличивается, что способствует росту ее электросопротивления, вызывая сильный нагрев анода. Выделение в прианодной зоне энергии, достаточной для вскипания электролита в некотором объеме, приводит к возникновению и выделению на поверхности анода пузырьков газа, которая в свою очередь инициирует вскипание электролита и пузырьковое кипение перерастает в пленочное. Поверхность раствора на границе с паровой оболочкой заполнена ионами и молекулами растворенного вещества, некоторое количество молекул воды входит в гидратные оболочки этих ионов. В процессе кипения гидратированные молекулы участвуют в обмене с молекулами паровой фазы, что способствует переносу отдельных ионов раствора в оболочку (рис. 3, *a*).

Под паровой пленкой в данном случае понимается смесь жидкого и парообразного электролита, ионов и электронов растворенных веществ в электролите, анионов металлической детали, а также присутствие пузырьков с газом. Газ, содержащийся внутри пузырьков, скорее всего, состоит из смеси кислорода и водорода ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ). Параллельно идет процесс отрыва пузырьков от поверхности анода. возникнове-

ние проводимости в анодной паровой оболочке объясняется эмиссией анионов раствора в оболочку и их концентрацией вокруг пузырьков газа ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{O}^{2-}$ ). В парогазовой оболочке также присутствуют электроны, ионы электролита и анода ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  в случае использования стального анода). При значительных напряжениях поверхность пузырька приобретает заметный отрицательный заряд, обусловленный повышенной концентрацией анионов, вследствие чего внутренне содержимое пузырька ионизируется под действием высокой локальной напряженности поля между положительно заряженной поверхностью анода и отрицательно заряженной поверхностью пузырька, и внутри пузырька образовывается высокотемпературная плазма, которая оплавляет верхний слой поверхности анода. Предполагается, что происходит оплавление оксидной пленки, вследствие чего поверхность металла не подвергается воздействию высокотемпературной плазмы. Вследствие высокой температуры, пузырек газа мгновенно расширяется (рис. 3, б). На расширение пузырька также влияет электрическое поле, которое поляризует пространство внутри него и удлиняет его, придавая ему форму эллипсоида с большой полуосью, направленной по полю [8]. Расширяясь, пузырек с газом создает высокую ударную волну, энергия которой частично рассеивается в электролите, а остальная энергия отражается от границы «пар–электролит» и с большим давлением сжимает пузырек газа, вызывая его всхлопывание (рис. 3, в). Критерием всхлопывания пузырька будет условие, когда силы стремящиеся сжать пузырек (ударная волна, давление паров внутри паровой пленки), преодолели силы, расширяющие пузырек (сила поверхностного натяжения стремящаяся восстановить первоначальную сферическую форму пузырька; большое давление внутри пузырька, связанное с возникновением высокотемпературной плазмы, а также растягивающая сила под действием высокого электрического поля). Всхлопывание пузырька происходит после момента экранирования ударной волны от границы «пар–электролит» (рис. 3, г). При всхлопывании пузырька происходит процесс, схожий с явлением кавитацией. В образовавшуюся пустоту попадают ионы и анионы, присутствовавшие в паровой пленке, переносимые на поверхность анода под действием электрического поля и эффектом ударной волны, которая успела отразиться от границы раздела электролита и паровой фазы (рис. 3, д). Эмиссия ионов с поверхности анода должна происходить на вершинах микровозмущений, в которых достигается наи-

высшая величина электрического поля. Взаимодействие анионов с поверхностью анода приводит к образованию оксидной пленки (рис. 3, е). После всхлопывания пузырька с газом и бомбардировкой анода анионами, ранее окружающими его поверхность, в образуемую полость попадают капельки электролита, и происходит их контакт с поверхностью анода, что вносит свою частичную роль в формировании оксидной пленки. Причиной распыления электролита может оказаться бомбардировка его поверхности ионами железа. Время рабочего цикла одного «рабочего» пузырька и, соответственно, время его жизни составляет тысячные доли секунды ( $10^{-6}$ – $10^{-5}$ с) [1–6].

Пузырьки газа, присутствующие на поверхности анода, расположены как на микровыступах, так и на микровпадинах, а также в порах и трещинах оксидной пленки. В связи с этим процесс расплавления оксидной пленки происходит как и на микровпадинах, так и преимущественно на микровыступах. Скорость оплавления пленки на микровыступах значительно выше. Это связано с тем, что способность электрического тока концентрироваться на остриях (плотность тока на поверхности микровпадин будет значительно меньше, чем на микровыступах) вызывает значительную концентрацию анионов на поверхности пузырька, находящегося на микровыступе, по сравнению с концентрацией анионов на поверхности газового пузырька, находящегося в порах или микровпадинах. Поэтому ионизационные процессы внутри пузырька, находящегося на микровпадинах, почти не возникают.

Пузырьки, в которых процессы ионизации внутреннего газового объема и возникновение плазмы не происходит, назовем «инертными» пузырьками. «Инертный» пузырек, зародившись на стенке анода, растет до некоторого размера, при котором он отрывается. В период возникновения и роста на пузырек действуют главным образом силы, удерживающие его в центре парообразования. С возрастанием размера пузырька увеличивается подъемная сила, стремящаяся оторвать пузырек. В общем случае к силам, оказывающим влияние на пузырек, относят подъемные силы, силы поверхностного натяжения, инерционные силы и силы лобового сопротивления. Условием его отрыва является нарушение механического равновесия между подъемной силой, стремящейся оторвать пузырек от поверхности, и силой поверхностного натяжения, удерживающей его на твердой поверхности [7].

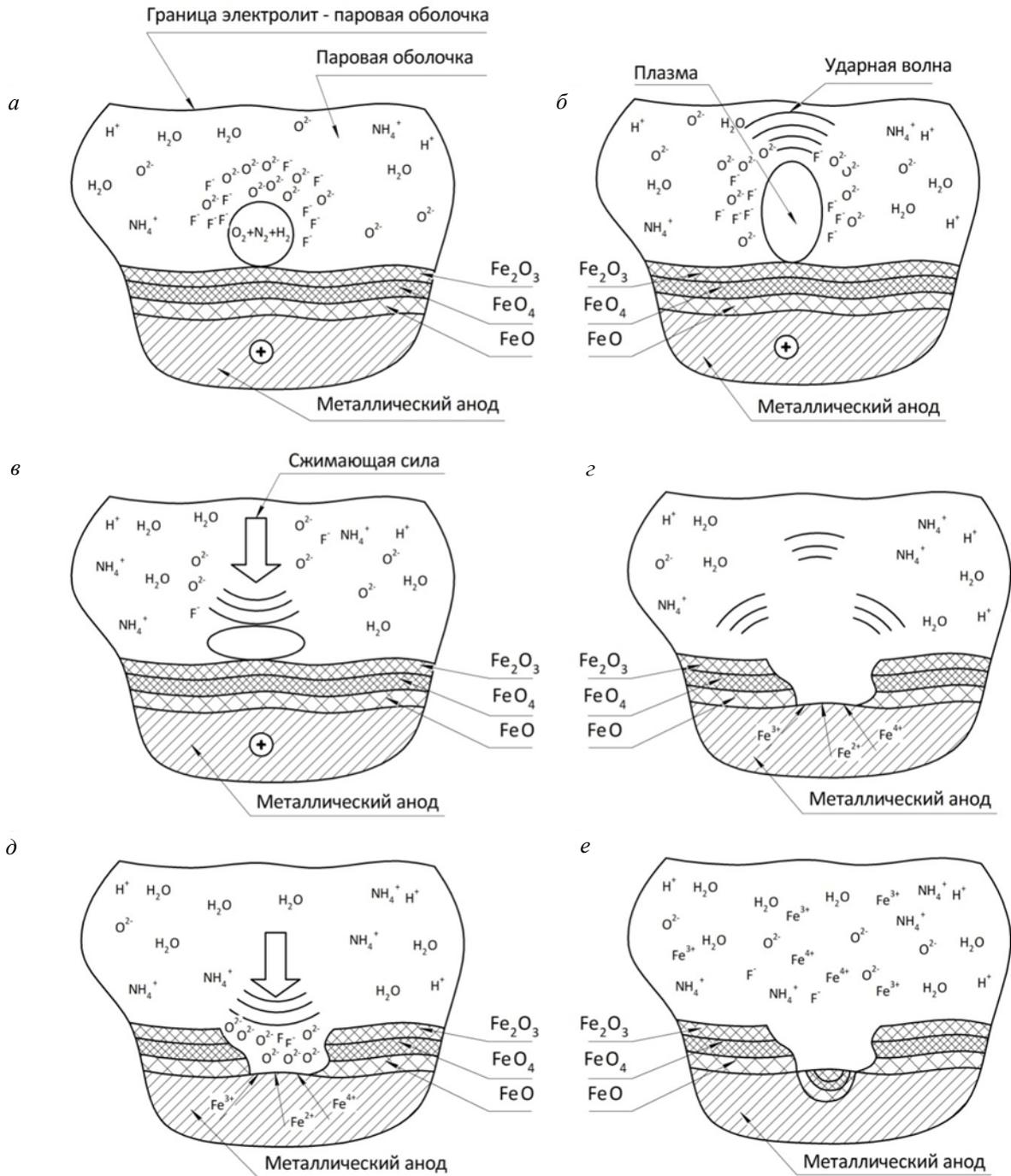


Рис. 3. Схема, раскрывающая суть метода электролитно-плазменного полирования

«Инертный» пузырек может в процессе отрыва от поверхности анода захватить с собой «рабочий» пузырек, что в свою очередь влияет на стабильность обработки детали. Какое количество «инертных» пузырьков содержится в процентном сочетании на единицу времени в паровой оболочке в процессе полирования от количества «рабочих», не известно.

Параллельно с процессом анодного растворения всегда образуется поверхностный оксид-

ный слой, характеристики которого зависят от состава электролита, температуры нагрева и способа охлаждения. На поверхности раздела «анод-пар» протекают процессы окисления и растворения оксидной пленки и эмиссия ионов металла с поверхности детали.

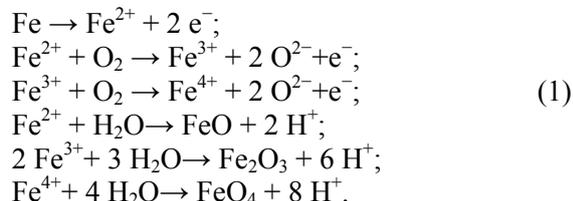
Процесс полирования протекает в том случае, когда скорость формирования оксидной пленки сопоставима со скоростью ее оплавления высокотемпературной плазмой. Наимень-

шая шероховатость поверхности детали и, соответственно, наибольший блеск достигается при минимальной толщине оксидной пленки, которая должна быть достаточной, чтобы предотвратить травящее действие расплываемого электролита внутри паровой пленки [9]. Для этого необходимо, чтобы скорости процессов электрохимического формирования пленки и ее плазменное удаление были высокими.

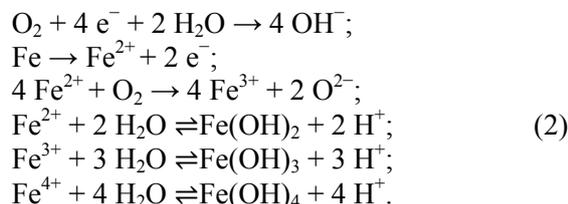
Присутствующие на поверхности металла дефекты: свободные узлы решетки, которые должны быть заняты атомами железа; узлы, принадлежащие атомам кислорода, занятые атомами железа, облегчают диффузионную подвижность атомов железа, которые могут перемещаться к поверхности, создавать новые оксиды и ускорять процесс окисления [1].

Состав оксидного слоя, образующегося в процессе полирования, неодинаков по толщине. Внешний слой обычно обогащен высшими оксидами, тогда как у поверхности находятся, преимущественно, низшие оксиды. Так, оксид железа состоит, если рассматривать его от внешнего слоя к внутреннему, из оксидов  $Fe_2O_3$ ,  $FeO_4$ , а у поверхности металла – из закиси  $FeO$  [10].

Окисление железа может идти по следующей реакции:



В растворе ионов железа найдено не было [1], поэтому необходимо учитывать возможность одновременного протекания нескольких электрохимических реакций:



## ВЫВОДЫ

Основываясь на научно-патентном обзоре литературы, сделана попытка сформулировать химико-физическую модель процессов, происходящих в момент полирования металлической детали в процессе ЭПП. Данная модель позволяет ответить на ряд вопросов, касающихся механизма уменьшения микрошероховатости металлической поверхности детали, а также вы-

явить «рабочий инструмент» процесса, за счет которого и происходит съем металла и уменьшения шероховатости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Суминов И. В.** Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов /под ред. И. В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. Т. I. 464 с.
2. **Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E. O., Ryabkov D.** Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview // *Surface & Coatings Technology*. 2007. Vol. 201. P. 8746–8760.
3. **Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowe S. J.** Plasma electrolysis for surface engineering // *Surface & Coatings Technology*. 1999. Vol. 122. P. 73–93.
4. **Meletis E. I., Nie X., Wang F. L., Jiang J. C.** Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel // *Surface & Coatings Technology*. 2002. Vol. 150. P. 246–256.
5. **Куликов И. С., Ващенко С. В., Василевский В. И.** Особенности электро-импульсного полирования металлов в электролитной плазме // *Вести АНБ. Сер. Физ.-техн. наук*. 1995. № 4. С. 93–98.
6. **Куликов И. С., Ващенко С. В., Каменев А. Я.** Электролитно-плазменная обработка материалов. Мн.: Белорусская наука, 2010. С. 231 с.
7. **Механизм** процесса теплообмена при пузырьковом кипении жидкости. [Электронный ресурс]. URL: [http://fast-const.ru/articles.php?article\\_id=115](http://fast-const.ru/articles.php?article_id=115) (дата обращения 27.03.2013).
8. **Воробьев Г. А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д., Меркулов В. И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). Томск: ТПУ, 2003. 244 с.
9. **Гриликес С. Я.** Обезжиривание, травление и полирование металлов /под ред. П. М. Вячеславова. Л.: Машиностроение, 1983. 101 с.
10. **Пяндрин Т. Н.** Электрохимическая обработка металлов /под ред. Л. Я. Попилова. Л.: Машгиз, 1961. 70 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Плотников Николай Владимирович**, асп. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж. по технол. машиностроения (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. электролитно-плазменных технологий.

**Смыслов Анатолий Михайлович**, проф. той же каф. Дипл. инж. по технол. машиностроения (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей ЛА (УГАТУ, 1983). Иссл. в обл. формирования свойств поверхности с исп. ионных, плазменных и электронных пучков.

**Таминдаров Дамир Рамилевич**, дипл. инж. по реновации средств и объектов материального производства в машиностроении (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. электролитно-плазменных технологий.

## METADATA

**Title:** To a question on model of electrolytic-plasma polishing.

**Authors:** N. V. Plotnikov, A. M. Smyslov, D. R. Tamindarov.

**Affiliation:**

<sup>1,2</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>3</sup> Uralaviaspetstehnologiya (YAST), Russia.

**Email:** plotnicov.kolan@mail.ru, smyslovam@yandex.ru, tamdamir@yandex.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 4 (57), pp. 90-95, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Provides physical - chemical model of the vapor film formation and development in the electrolyte-plasma polishing is considered. The mechanism and nature of the micro-roughness metal surface smoothing process is explained. The stages during the processing – from the emergence of a vapor bubble until it collapsing and removing microasperity from the component surface is considered schematically.

**Key words:** finishing; vapor envelope; anode heating; polishing; electrolytic-plasma polishing; surface roughness.

#### References (English transliteration):

1. I. V. Suminov, *Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys*, (in Russian), I. V. Suminova, ed. Moscow: Technosfera, 2011, vol. I.
2. P. Gupta, G. Tenhundfeld, E. O. Daigle, and D. Ryabkov, "Electrolytic plasma technology: Science and engineering — An overview," *Surface & Coatings Technology*, vol. 201, pp. 8746-8760, 2007.
3. A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, and S. J. Dowey, "Plasma electrolysis for surface engineering," *Surface & Coatings Technology*, vol. 122, pp. 73-93, 1999.
4. E. I. Meletis, X. Nie, F. L. Wang, and J. C. Jiang, "Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel," *Surface & Coatings Technology*, vol. 150, pp. 246-256, 2002.
5. I. S. Kulikov, C. V. Vashenko, and V. I. Vasilevsky, "Features electro-polishing of metals in pulsed plasma electrolyte," (in Russian), *Vesti ANB, ser. Physical and Technical Science*, vol. 4, pp. 93-98, 1995.
6. I. S. Kulikov, S. V. Vashenko, and A. Y. Kamenev. *Electrolytic plasma processing of materials*, (in Russian). Minsk: Belarusskaya Nauka, 2010.
7. *The mechanism of heat transfer in nucleate boiling of the liquid* [Online], (in Russian). Available: [http://fast-const.ru/articles.php?article\\_id=115](http://fast-const.ru/articles.php?article_id=115).
8. G. A. Vorobiev, J. P. Pokholkov, Y. U. Korolev, and V. I. Merkulov, *Physics of Dielectrics*, (in Russian). Tomsk: TPU, 2003.
9. S. J. Griliches, *Degreasing, etching and polishing metal*, (in Russian), P. L. Vyacheslavova, ed. Moscow: Mashinostroenie, 1983.
10. T. N. Pyandrina, *Electrochemical Metal*, (in Russian), L. J. Popilova, ed. Leningrad: Mashgiz, 1961.

#### About authors:

**PLOTNIKOV, Nikolay Vladimirovich**, Postgrad. student, dept. of mechanical engineering. Dipl. engineer mechanical engineering (USATU, 2012). Research in the field of electrolytic-plasma technologies.

**SMYSLOV, Anatoly Mikhailovich**, Prof., dept. of mechanical engineering. Dipl. mechanical engineer (AIM, 1973). Dr. of tech. sci. in the manufacture of aircraft engines (USATU, 1983). Research in the field of formation of surface properties using ion, plasma and electron beams in accordance with the terms of service parts.

**TAMINDAROV, Damir Ramilevich**, Dipl. engineer for renovation of facilities and sites of production in machine building (USATU, 2005). Research in the field of electrolytic-plasma technologies.