

Электролитно-плазменная финишная обработка металлов и сплавов

С. В. Попова[†], С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский

[†]popova-viam@mail.ru

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», ГНЦ РФ,
ул. Радио 17, 450001, Москва, Россия

В статье обсуждается один из прогрессивных на сегодняшний день способов обработки поверхности с целью повышения класса шероховатости и выравнивания текстуры поверхности — электролитно-плазменное полирование. Рассматриваются механизмы зарождения разряда в электролите и их стабильность. Установлены параметры, оказывающие определяющее влияние на эффективность процесса электролитно-плазменной обработки стали ЭИ961 и титанового сплава BT20.

Ключевые слова: плазма, электролит, разряд, шероховатость, пленочное кипение

Electrolytic-plasma finishing treatment of metals and alloys surfces

S. V. Popova, S. A. Muboyadzhyan, S. A. Budinovskiy

Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials»
State research center of the Russian Federation, Radio St. 17, Moscow, Russia

The article is described the one of the most progressive method of surface-treatment — electrolytic-plasma method. The aim of this to decrease surface roughness class. It is described the mechanism forming discharge in electrolytic and its stability. It is established the parameters of process, that influence on effective process of steel and titan alloy.

Keywords: plasma, electrolyte, discharge, roughness, film boiling

1. Введение

Проблемы разработки высокоэффективных технологий финишной обработки поверхности относятся к приоритетным направлениям развития материалов и технологий в Российской Федерации [1]. Интерес в этой области вызван тем, что важнейшие эксплуатационные свойства деталей (долговечность, прочность, коррозионная стойкость и др.) зависят среди прочего от отдельных характеристик качества поверхности. Известно, что полирование поверхности изделия улучшает его механические свойства, уменьшает коэффициент трения между контактирующими поверхностями, увеличивает способность металлов к пластической деформации [2—5].

Существуют различные технологии повышения класса шероховатости поверхности: механическое полирование, химическое и электрохимическое полирование. Методы химического и электрохимического поли-

рования, используемые в гальванотехнике, позволяют в ряде случаев заменить механическое полирование, отличающееся большой трудоемкостью. На предприятиях авиационной промышленности финишная обработка поверхности готовых изделий преимущественно производится механическим полированием. Недостатком механической финишной обработки поверхности является невозможность обработки изделий сложного профиля, трудоемкость, изменение напряженно-деформированного состояния и структурно-фазового состояния поверхностного слоя, что, в ряде случаев, требует дополнительных операций по восстановлению состояния поверхности [6,7]. В отличие от механических способов обработки, химическое и электрохимическое полирование позволяют не только изменить шероховатость поверхности, но и удалить дефектный поверхностный слой металла, не прибегая к силовому воздействию [8]. Однако практически все растворы для химического и электрохимического полирования металлов, в качестве актива-

торов содержат сильные кислоты (плавиковая кислота, серная кислота, ортофосфорная кислота и др.), которые предотвращают пассивацию поверхности и смещают электродный потенциал в область отрицательных значений, а в качестве окислителей используются азотная кислота, перекись водорода или хромовый ангидрид. Такие растворы очень агрессивны, токсичны и представляют серьезную опасность для экологии и требуют специальной утилизации.

В последнее время получил развитие метод электролитно-плазменной обработки поверхности металлических изделий, в том числе с целью финишной обработки поверхности [9—13]. Основным отличием электролитно-плазменного полирования поверхности от электрохимического полирования является использование высокого напряжения (200—400 В). Полирование при этом идет за счет энергии электрических разрядов, мигрирующих по обрабатываемой поверхности, погруженной в электролит, которые оказывают специфическое термическое, плазмохимическое и гидродинамическое воздействие на металлическую основу. Важными достоинствами этого вида обработки являются: использование нетоксичных и дешевых электролитов и их соединений, возможность равномерной обработки сложнопрофильных деталей, высокий КПД процесса [9,10]. Несмотря на практическое применение этого метода финишной обработки металлической поверхности, протекающие при этом физические процессы, например, процессы массопереноса, формирование разрядного столба еще недостаточно изучены, что является причиной того, что этот процесс до сих пор не получил широкого применения в промышленности.

Развитие представлений об электрическом разряде в жидкости прошло сложный путь и всегда отставало от физики разряда, инициируемого в газовой фазе и вакууме. Еще в начале XX столетия определились два принципиально различных подхода к явлению электрического разряда в жидкостях [14]. Согласно одному из них электрический разряд в жидкостях является разрядом в газовых пузырьках, которые либо присутствуют в жидкости и на электродах, либо образуются при воздействии напряжения (электролиз, вскипание, дегазация с поверхности электродов и др.). Сторонники другого подхода рассматривают электрический разряд в жидкостях как следствие лавинообразного размножения свободных носителей электрических разрядов в самой жидкости и используют модель, которая по существу является модификацией модели газового разряда применительно к жидкой фазе [14,15].

В настоящее время существует теория, что разряд в жидкостях может развиваться как разряд в газовых пузырьках (в некоторых источниках этот разряд называется диафрагменным), либо как разряд, который зарождается в жидкости (в ряде источников такой разряд называется тлеющим). При втором механизме зарождения разряда состав плазмы обогащен активными частицами (частицами с неспаренным электроном), поэтому такой разряд является стабильным. Напротив, разряд, инициируемый в газовых пузырьках, нестабилен, плазмообразующий газ имеет обедненный по количеству активных частиц состав.

Интерес представляют исследования, направленные на выяснение механизма зарождения стабильного разряда в электролитах и возможности по определенным макропараметрам системы контролировать получение стабильного разряда. Важно также установить, как влияет состав электролита на химические процессы на поверхности обрабатываемого изделия.

2. Методы и подходы

Процесс электролитно-плазменного полирования проводился с использованием инверторного источника смещения ELB-50/400 с ключом дугогашения — генератором паузы, который срабатывает при резком увеличении скорости нарастания тока в цепи. Это позволяет предотвратить переход разряда из слаботоочного режима в сильноточный, который проявляется в повышении концентрации заряженных частиц в плазме и, как следствие, резком уменьшении сопротивления плазменного слоя.

При электролитно-плазменной обработке изделие погружается в электролит. При пропускании электрического тока через электролит возле электрода (катода или анода), которым служит обрабатываемое изделие, образуется плазма, которая отделяет электрод (обрабатываемое изделие) от электролита. Напряженность электрического поля в самом электролите невысокая, но в слое плазмы напряженность может достигать 10^5 — 10^6 В/см [16,17].

В работе проводилось измерение температуры. При электролитно-плазменной обработке изделие погружается в электролит. При пропускании электрического тока через электролит возле электрода (катода или анода), которым служит обрабатываемое изделие, образуется плазма, которая отделяет электрод (обрабатываемое изделие) от электролита. Напряженность электрического поля в самом электролите невысокая, но в слое плазмы напряженность может достигать 10^5 — 10^6 В/см [16,17].

3. Результаты исследований

Измерение температуры обрабатываемой поверхности при различных условиях ее обработки в плазме электролита показало следующие результаты.

Если в ждущем режиме обрабатываемое изделие сначала погрузить в раствор соли, а затем постепенно поднимать напряжение, температура поверхности «активного» электрода (обрабатываемого изделия) в момент инициирования разряда не будет превышать 100—200 °С и зависит от состава и структуры обрабатываемой поверхности и температуры электролита. Установлено, что чем меньше начальная температура электролита, тем интенсивнее процесс травления по сравнению с процессом оксидирования. Это свидетельствует о том, что в составе плазмы преобладают компоненты растворенного вещества над оксид-образующими компонентами растворителя. Перед инициированием разряда в области «активного» электрода об-

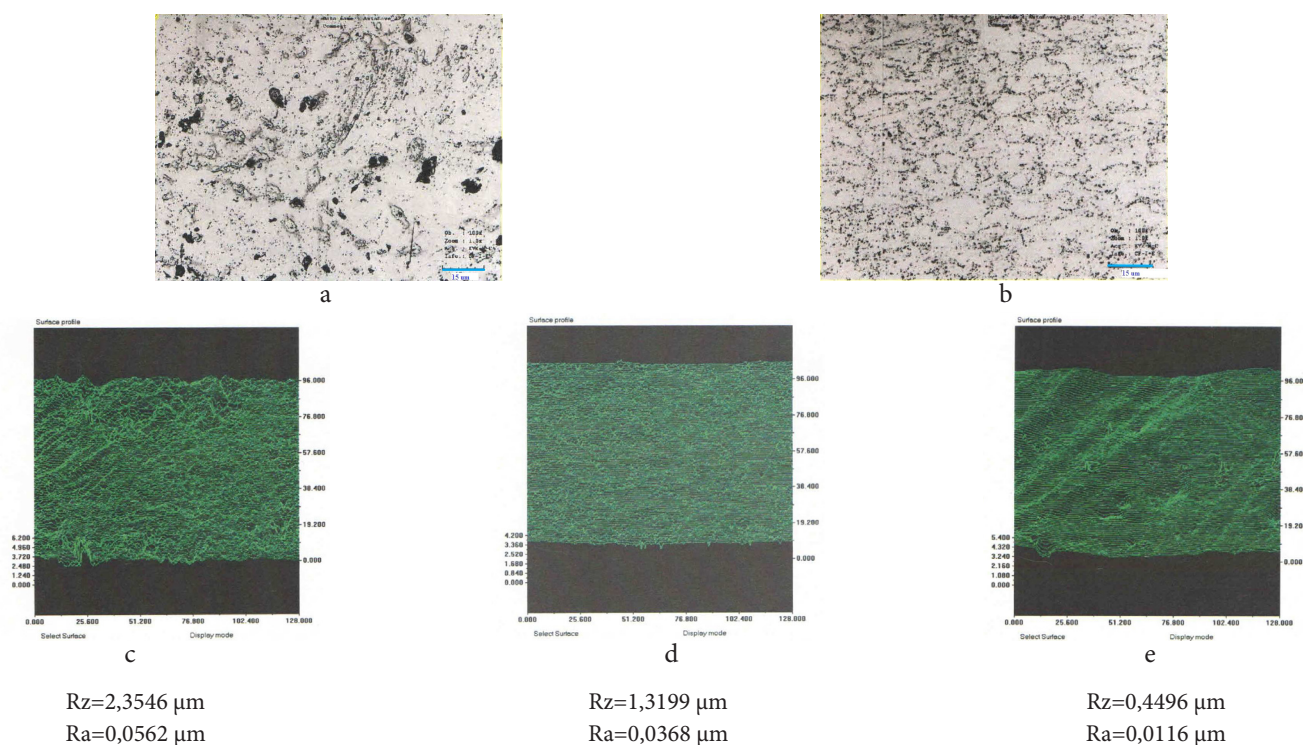


Рис. 1. Результаты обработки поверхности образцов из стали ЭИ961: а, б) фотографии поверхности образца соответственно до и после обработки (x100) (с, d, e) изменение профиля поверхности образца при 0, 5 и 10 минутах обработки

Fig. 1. Results of treatment of the surface samples of steel EI961: and (b) photographs of the surface of the sample before and after treatment (x100) (c, d, e) changing the surface profile of the specimen at 0, 5 and 10 minute treatment

разуются газовые пузыри. Их образование может быть вызвано выделением газообразных продуктов электролиза, растворенного в электролите газа и кипением электролита в области активного электрода. Разряд при этом нестабильный, на осциллограмме наблюдаются пульсации тока высокой интенсивности.

При условии предварительной подачи высокого напряжения ($U \sim 250\text{--}300$ В) на обрабатываемое изделие перед его погружением в электролит, температура поверхности электрода разогревается за счет омических потерь до $250\text{--}350$ °С. При погружении разогретого изделия в электролит на его поверхности происходит пленочное кипение электролита, обусловленное эффектом Лейденфроста [18,19], и загорается разряд. Однако разряд постепенно теряет свою стабильность. При условии постепенного повышения потенциала на обрабатываемой детали, ее температура также постепенно растет, что объясняется низкой теплопроводностью паро-газового слоя при пленочном кипении. Установлено, что стабильный разряд формируется при температуре активного электрода $320\text{--}350$ °С в момент инициирования разряда. Этот результат согласуется с тем, что получен в работе [20]. На кинетику парообразования в приэлектродной области влияет не только температура «активного» электрода, но и вязкость электролита. Установлено, что вязкость электролита не должна превышать 1×10^{-6} м²/с.

В импульсном режиме при определенном значении скважности пакета импульсов и их длительности поверхность «активного» электрода за короткое время разогревается до температуры $400\text{--}450$ °С и формирует-

ся устойчивый разряд. Плавное изменение напряжения в пределах критических параметров позволяет осуществлять плавное изменение температуры поверхности обрабатываемого изделия.

Импульсное воздействие на обрабатываемую деталь («активный» электрод) осуществлялось в диапазоне частот пакета импульсов напряжения $20\text{--}40$ кГц, длительности пакета импульсов $15\text{--}45$ мкс, скважности пакета импульсов $75\text{--}85\%$. Показано, что при длительности пакета импульсов напряжения менее 15 мкс разряд не успевает сформироваться. При скважности импульсов более 85% поверхность «активного» электрода не успевает достаточно разогреться до момента инициирования разряда [14].

Исследование влияния ПАВ на процесс стабилизации разряда в электролите показало, что его количество не должно превышать $10^{-5}\text{--}10^{-4}$ об. %, поскольку избыток ПАВ может привести к пенообразованию (в случае использования ионогенного ПАВ) и дестабилизации разряда, а также к участию ПАВ в плазмохимических процессах на поверхности «активного» электрода, и, как следствие, уменьшению интенсивности обработки.

Полирование стали мартенситного класса ЭИ961 проводилось при напряжении $U=260\text{--}280$ В и плотности тока $j=0,4\text{--}0,47$ А/см². Установлено, что повышение напряжения приводит к эрозии «активного» электрода, вызванной повышением мощности разряда на активном электроде. Время обработки определяется первоначальным уровнем шероховатости. Для понижения уровня шероховатости Ra в ~ 5 раз время полирования составило 10 минут. На рис.1 представлены результаты обработ-

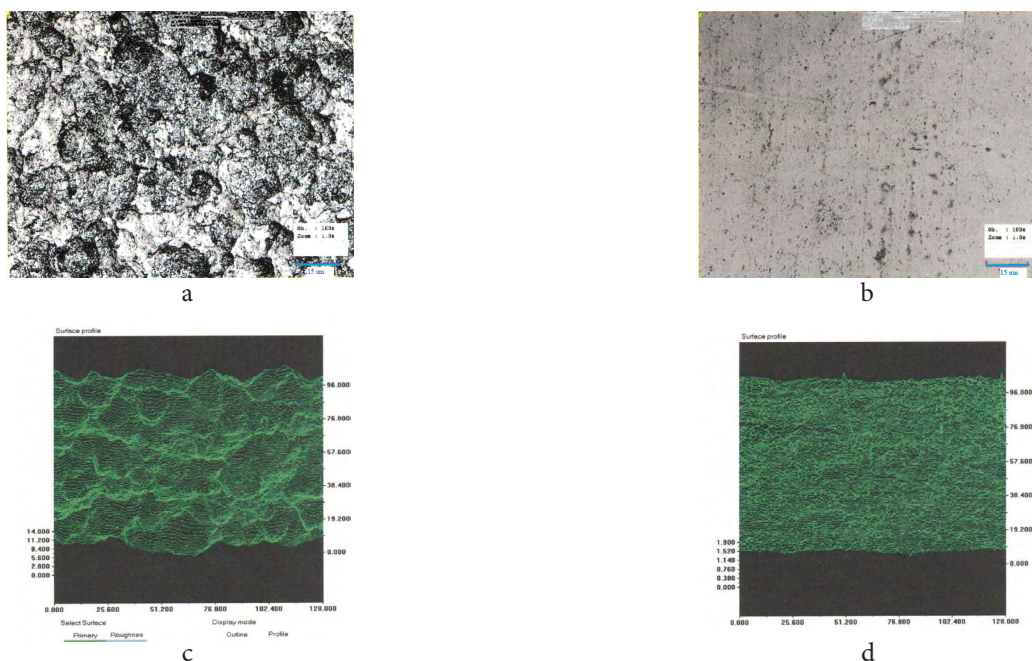


Рис. 2. Результаты обработки поверхности образцов из титанового сплава BT20: (a,b) фотографии поверхности образца соответственно до и после обработки (x100) (c,d) профиль поверхности образца соответственно до и после обработки.

Fig. 2. The results of two samples from the surface treatment of titanium alloy BT20: (a,b) photographs of the surface of the sample before and after treatment (x100) (c,d) the surface profile of the sample before and after treatment.

ки поверхности стали ЭИ961 в импульсном режиме.

На рис.2с-е видно как меняется профиль поверхности образцов с течением времени.

Установлено, что все неровности (как микро-, так и макронеровности) удаляются в процессе обработки равномерно. По истечении короткого времени (ориентировочно 3—5 минут) микронеровности исчезают, и поверхность приобретает зеркальный блеск.

Полирование титанового сплава BT20 проводилась при напряжении $U=260...280$ В и плотности тока $j=0,4...0,5$ А/см². Поскольку титан и его сплавы являются более химически активными материалами, чем сталь, то за 10 минут обработки уровень шероховатости R_a титанового сплава понижается на два порядка (до обработки 0,7825 мкм, после обработки — 0,0079 мкм). Внешний вид поверхности образцов из титанового сплава BT20 до и после полирования в импульсном режиме представлен на рис.2.

Плотность тока на обрабатываемом изделии определяется составом электролита. При высокой активности электролита плотность тока может составлять 1,0—1,5 А/см². При этом на поверхности «активного» электрода образуется осадок из продуктов взаимодействия компонентов раствора с обрабатываемой поверхностью. Понижение плотности тока при обработке приводит к образованию на поверхности обрабатываемого изделия окислов.

Высокая химическая активность титановых сплавов одновременно является их преимуществом и недостатком, поскольку обуславливает его эрозию при незначительном изменении параметров процесса (концентрации электролита, наличие незначительных примесей в растворе, напряжение, плотность тока).

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что разряд в электролитах действительно может развиваться по различным механизмам. Контроль за механизмом развития разряда в электролитах и получением установившегося процесса электролитно-плазменной обработки поверхности заключается в фиксировании значения разности температур между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом при повышении потенциала на изделии. Установлено, что стабильный разряд формируется при температуре «активного» электрода 320–350 °С в момент инициирования разряда.

Скорость повышения температуры поверхности обрабатываемого изделия при изменении на нем потенциала определяет гидродинамический режим кипения электролита в приэлектродной области. При достаточно интенсивном разогреве поверхности обрабатываемого изделия наблюдается эффект Лейденфроста — пленочное кипение жидкости. При этих условиях коэффициент теплопередачи от поверхности «активного» электрода к электролиту существенно снижается. При недостаточно интенсивном разогреве поверхности обрабатываемого изделия происходит пузырьковое кипение жидкости и формирование неустойчивого разряда.

При импульсной обработке поверхности обрабатываемой детали ее разогрев обусловлен эффектом кавитации и, как следствие, интенсивным образованием активных частиц в приэлектродной области. На стабильность процесса оказывает влияние длительность и скважность пакета импульсов напряжения. При длительности пакета импульсов менее 15 мкс разряд не успевает сформироваться. При скважности импульсов более 85%

количество образующихся активных частиц в приэлектродной области недостаточно для активации поверхности и формирования устойчивого разряда.

Благодарность. Авторы выражают благодарность Журавлевой П.Л. за помощь в исследовании текстуры поверхности образцов с помощью лазерного микроскопа.

Acknowledgements. The authors thank P.L. Zhuravlevo for help in the study of surface texture samples with a laser microscope.

Литература/References

1. E.N. Kablov The aviation materials and technologies. **2**, 7—17 (2012). (in Russian) [Е.Н. Каблов. Авиационные материалы и технологии. **2**, 7—17 (2012).]
2. M.K. Smislova, D.R. Tamindarov, A.B. Samarkina. The aircraft manufacturing technologies. **7** (84), 25—28 (2011). (in Russian) [М.К. Смыслова, Д.Р. Таминдаров, А.Б. Самаркина. Технология производства летательных аппаратов. **7** (84), 25—28 (2011).]
3. N.B. Kirillov, S.D. Vasilkov, V.I. Novikov. Scientific-technical Bulletin of St. Pts. **22** (100), 130—135 (2010). (in Russian) [Н.Б. Кириллов, С.Д. Васильков, В.И. Новиков. Научно-технические ведомости СПб ГПУ. **22** (100), 130—135 (2010).]
4. V.F. Besyasychniy, B.M. Drapkin, M.A. Prokofiyev, M.V. Timofeev. Physics and chemistry of material treatment. **6**, 121—125 (2003). (in Russian) [В.Ф. Безъязычный, Б.М. Драпкин, М.А. Прокофьев, М.В. Тимофеев. Физика и химия обработки материалов. **6**, 121—125 (2003).]
5. L.V. Semenova, N.D. Rodina, N.I. Nefedov. The aviation materials and technologies. **2**, 37—40 (2013). (in Russian) [Л.В. Семенова, Н.Д. Родина, Н.И. Нефедов. Авиационные материалы и технологии. **2**, 37—40 (2013).]
6. O.I. Nevskiy, V.M. Burkov, E.P. Grishina. Electrochemical dimension treatment of metals and alloys. The problem of theory and practice. Ivanovo. Chemistry (2006) 282 p. (in Russian) [О.И. Невский, В.М. Бурков, Е.П. Гришина. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблема теории и практика. Иваново. Химия (2006) 282 с.]
7. E.N. Kablov. Russian Chemical Journal. **LIV** (1), 3—4 (2010). (in Russian) [Е.Н. Каблов. Российский химический журнал. **LIV** (1), 3—4 (2010).]
8. E.N. Kablov. Russian Academy of Science Bulletin. **82** (6), 520—530 (2012). (in Russian) [Е.Н. Каблов. Вестник Российской Академии Наук. **82** (6), 520—530 (2012).]
9. A.D. Pogrebnyak, O.P. Kulmentiyeva and other. The Letters of Technical Physics Journal. **29** (8), 8—15 (2003). (in Russian) [А.Д. Погребняк, О.П. Кульментьева и др. Письма в ЖТФ. **29** (8), 8—15 (2003).]
10. S.E. Kuzenkov. The Academy messengers of Black Earth. **1** (19), 57—63 (2010). (in Russian) [С.Е. Кузенков. Вести высших учебных заведений Черноземья. **1** (19), 57—63 (2010).]
11. D.I. Slovetskiy, S.D. Terent'ev, I.G. Plehanov. The Thermal Physics of High Temperature. **2**, 385—363 (1986). (in Russian) [Д.И. Словецкий, С.Д. Терентьев, И.Г. Плеханов. Теплофизика высоких температур. **2**, 385—363 (1986).]
12. V.N. Duradgy, I.V. Bryantsev. The Electron Treatment of Materials. **1**, 45—48 (1977). (in Russian) [В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев. Электронная обработка материалов. **1**, 45—48 (1977).]
13. S.A. Muboyadzhan, S.A. Budinovskiy. The aviation materials and technologies. **1**, 40—49 (2005). (in Russian) [С.А. Мубояджян, С.А. Будиновский. Авиационные материалы и технологии. **1**, 40—49 (2005).]
14. A.F. Valter, A.D. Inge. Journal of Technical Physics. **4** (9), 1669—1687 (1934). (in Russian) [А.Ф. Вальтер, А.Д. Инге. Журнал технической физики. **4** (9), 1669—1687 (1934).]
15. V.S. Komelkov. The Paper of Russian Academy. **47** (4), 269—272 (1945). (in Russian) [В.С. Комельков. Доклады АН СССР. **47** (4), 269—272 (1945).]
16. B.R. Lazarenko, V.N. Duradgy, I.V. Bryancev. Electron Materials Treatment. **2**, 50—55 (1980). (in Russian) [Б.Р. Лазаренко, В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев. Электронная обработка материалов. **2**, 50—55 (1980).]
17. K.A. Naugol'nih, N.A. Roy. Electric discharge in water (hydrodynamic description). M. Science. (1971) 77 p. (in Russian) [К.А. Наугольных, Н.А. Рой. Электрические разряды в воде (гидродинамическое описание). М. Наука. (1971) 77 с.]
18. A.P. Krukov, A.K. Yastrebov. Thermal Physics of High Temperature. **41** (5), 771—778 (2003). (in Russian) [А.П. Крюков, А.К. Ястребов. Теплофизика высоких температур. **41** (5), 771—778 (2003).]
19. V.Ya. Ushakov. Impulse electric liquid breakdown. Tomsk. TSU. (1975) 156 p. (in Russian) [В.А. Ушаков. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск. ТГУ. (1975) 156 с.]
20. S.D. Terentyev. In: The Nature and Intellectual resource of Siberia, ed. by S.D. Terentyev, V.G. Plehanov, G.V. Plehanov. Tyumen. TSU. (2000) 63—64 p. (in Russian) [С.Д. Терентьев. Сборник 6-й международной практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». Тюмень. ТГУ. (2000) 63—64 с.]