

## МОДИФИКАЦИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ПАР ТРЕНИЯ МЕТОДОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

Елена Равильевна АХМЕТОВА родилась в городе Москве. Старший преподаватель МАИ. Основные научные интересы — в области технологии конструкционных материалов, материаловедения. Автор 17 научных работ. E-mail: e\_akhmetova@mail.ru

Elena R. AKHMETOVA was born in Moscow. She is a Senior Assistant of Professor at the MAI. Her main research interests are in science and technology of structural materials. She has published 17 technical papers. E-mail: e\_akhmetova@mail.ru

Рустем Гаялтинович ТАЗЕТДИНОВ родился в 1942 г. в селе Биденьга Большегтарханского района Татарской АССР. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области технологии конструкционных материалов, материаловедении. Автор более 180 научных работ. E-mail: rustem-tazetdinov@yandex.ru.

Rustem G. TAZETDINOV, D.Sci., was born in 1942, in the Tatar ASSR. He is a Professor at the MAI. His main research interests are in science and technology of structural materials. He has published over 180 technical papers. E-mail: rustem-tazetdinov@yandex.ru

*Проведен анализ металлических материалов для пар трения с позиции критериев биосовместимости; проанализировано воздействие периодического разряда в потоке жидкости (ПРПЖ) на материалы; исследовано влияние ПРПЖ на изменение трибомеханических характеристик титановых сплавов; обобщены полученные ранее результаты.*

*An analysis of metal materials is carried out for friction pairs basing on biological compatibility criteria. An influence of periodical discharges in liquid flow is analyzed for the materials as well as an effect of these discharges on tribomechanical characteristics of titanium alloys. Besides the previous results are generalized.*

**Ключевые слова:** титановые сплавы; модификация поверхности; периодический разряд в потоке жидкости; пары трения.

**Key words:** titanium alloys, surface modification, periodical discharge in liquid flow, friction pairs.

### Введение

Развитие машиностроения требует создания новых материалов, обладающих более высокими эксплуатационными характеристиками (прочностью, твердостью, коррозионной стойкостью). Добиться этого можно несколькими способами, например создавая на поверхности материала модифицированные слои и покрытия или тем или иным способом изменяя структуру материала.

Одним из наиболее востребованных направлений в данной области является создание материала, способного в течение длительного времени стабильно работать как в парах трения, так и в агрессивных средах, в том числе и в человеческом организме.

Условия эксплуатации в последнем предъявляют к материалу ряд специфических требований: работа в кислой среде, в электролите (известно, что процессы управления двигательной активностью, как и другие процессы нервной деятельности, — слаботочные электрические процессы), длительный

срок эксплуатации изделия, высокая степень биологической и механической совместимости изделия с тканями и системами организма.

Наиболее полно эти требования необходимо учитывать при создании эндопротезных материалов. Если длительность жизни человека условно принять равной 100 годам, а порог готовности для эндопротезирования суставов считать связанным с окончанием периода роста скелета, то жизнеспособность эндопротеза должна составлять примерно 80 лет. В настоящее время она в лучших случаях составляет около 25 лет [1]. При этом особую опасность представляют продукты износа эндопротезов. Они являются инициаторами воспалительных процессов, остеолитического и нестабильности эндопротезов.

Требования к материалам для эндопротезирования были сформулированы примерно 20 лет назад. Они соответствовали свойствам литейных сплавов на основе кобальта (ISO 5832-4) и стали 316L (ISO 5832-1).

Исследования последних лет, направленные на решение проблемы комплексного повышения эксплуатационных характеристик эндопротезов (повышение прочности, твердости, коррозионной и износостойкости), показали хорошие результаты в плане использования новых материалов (модифицированные сплавы ВТ 5-1, ВТ 6, комохром) и применения ионно-лучевых технологий для модификации поверхностей изделий (эндопротезы тазобедренного сустава, дентальные импланты, хирургический инструментарий). Но применяемые ионно-лучевые технологии требуют высокой степени вакуумирования, а комохром сам по себе достаточно дорог, к тому же мелкодисперсную структуру, обеспечивающую необходимые эксплуатационные характеристики изделия, можно получить только методом вакуумной плавки (используется во ВНИИНМ им. А.А.Бочвара), другие способы получения дают структуры с крупными карбидными включениями.

Оптимальным по прочностным и стоимостным характеристикам, а также по биосовместимости был признан титан. Однако установлено, что для обеспечения нормальной работоспособности искусственного сустава (являющегося, по сути, шарнирной парой трения), в котором используется титановый сплав, необходимо в головке сустава создать ультрадисперсную микроструктуру с размерами структурных составляющих в 5–10 раз меньшими, чем в полуфабрикатах, получаемых по стандартным технологиям. Подобного рода структуру можно получить, подвергая титановые сплавы термоциклированию с высокой степенью вакуумизации и длительным временем термоэкспозиции. Другим спо-

собом, дающим возможность получить требуемый результат, является обработка материала высоковольтным периодическим разрядом в потоке жидкости (ПРПЖ) [2]. Поскольку данный метод является безвакуумным, обеспечивает достаточно высокую скорость обработки изделий, можно говорить о его экономичности по сравнению с другими методами получения требуемых структуры и покрытий.

### Материалы и методы

Основным критерием выбора материала для изделий медицинского назначения является система БМСИ [1, 3].

Система БМСИ — это идеологическая концепция, позволяющая проектировать, производить и применять Биологически и Механически Совместимые Имплантаты, сочетающие биологическую совместимость имплантируемого материала с адекватностью его механического поведения с механическим поведением здорового элемента организма человека, для протезирования или укрепления которого предназначен имплантат. БМСИ представляет собой систему взаимосвязанных принципов:

- выбора материала;
- разработки конструкции;
- разработки технологии производства изделия;
- применения комплекса испытаний материалов и изделий;
- оптимизации технологии применения изделий в медицинской практике.

Перечень материалов, удовлетворяющих критерию биосовместимости, достаточно ограничен (рис. 1). При выполнении требований механичес-

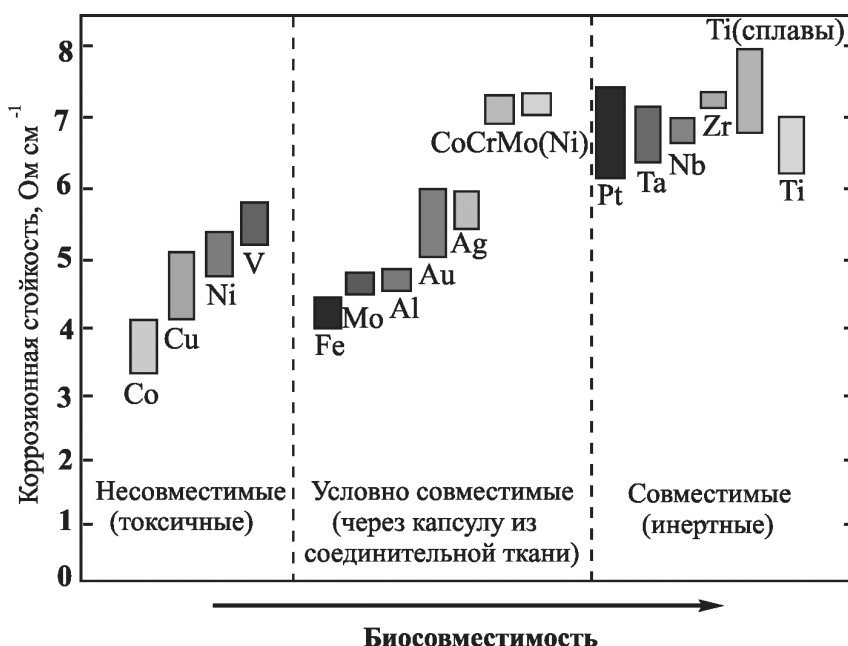


Рис. 1. Биологическая совместимость материалов

кой совместимости, ресурса работы изделий в условиях действия знакопеременных нагрузок, а также стоимости, в качестве основного материала для изготовления высоконагруженных деталей и узлов конструкций целесообразно использовать титан и его сплавы.

Поведение образцов из титана и его сплавов при механическом воздействии наиболее адекватно механическому поведению биологических тканей (рис. 2).

При этом комплекс механических свойств (модуль упругости  $E$ , усталостная прочность  $s_{-1}$  и удельная кратковременная прочность  $s_{B/r}$ ) титановых сплавов значительно превосходит комплекс механических свойств других конструкционных материалов, в том числе специальных сталей и кобальт-хромовых сплавов, широко применяемых в медицине (рис. 3).

Из существующих в настоящее время методов модификации поверхности титановых сплавов наиболее перспективными признаны термоводородная

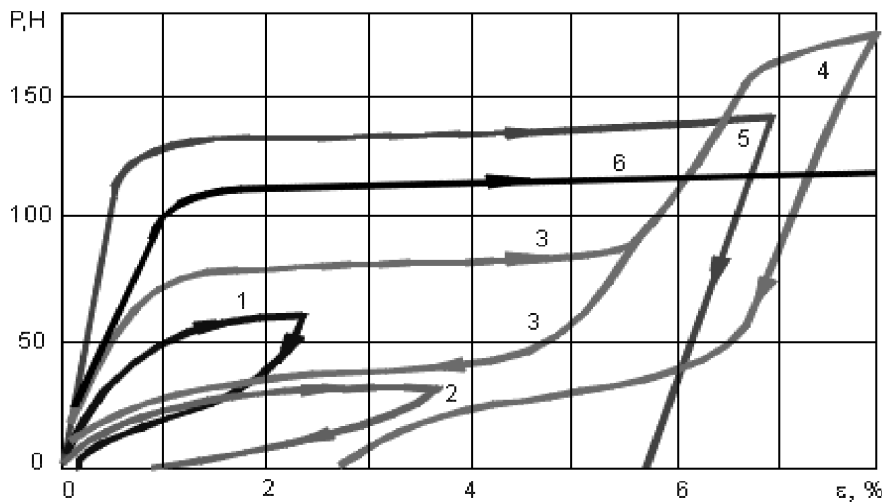


Рис. 2. Диаграмма растяжения образцов из различных материалов: 1 — кость; 2 — сухожилие; 3, 4 — никелид титана; 5 — нержавеющая сталь; 6 — титан

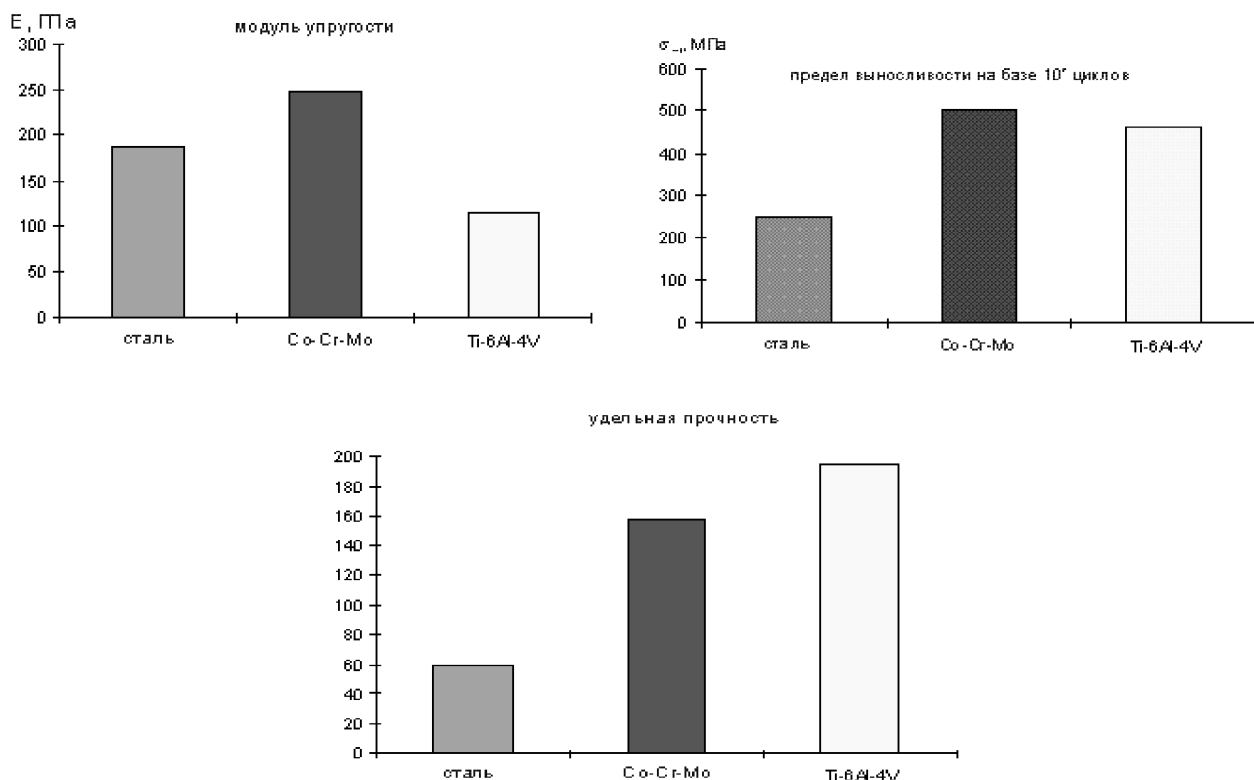


Рис. 3. Механические свойства материалов, применяемых для изготовления компонентов эндопротеза

обработка (ТВО), ионная имплантация, высоковакуумное литье с длительным термоциклированием. Основным их недостатком является необходимость высоковакуумной обработки, что требует соответствующего оборудования, усложняет технологический процесс, налагает ограничения на массо-габаритные характеристики изделия и повышает его себестоимость. Метод обработки высоковольтным периодическим разрядом в потоке жидкости (ПРПЖ), являясь безвакуумной обработкой, лишен этих недостатков.

Обработка в условиях ПРПЖ относится к электроэрозионным методам. Данный метод разработан группой ученых МИФИ [4], его применение исследовалось в ряде совместных работ МИФИ и МАИ. Он отличается от обычного способа электроэрозионной обработки (ЭЭО) тем, что, во-первых, реализуется в потоке диэлектрической жидкости, во-вторых, имеет более высокие напряжения, ток и меньшие длительности импульса разряда. Принципиальная схема и фотография установки ПРПЖ, разработанной в МИФИ, приведена на рис. 4.

Она состоит из трубчатого катода, через отверстие которого прокачивается дистиллированная вода, анода из обрабатываемого металла, стабилизированного высоковольтного источника питания. ПРПЖ является высокоэнергетическим импульсным источником. Напряжение разряда  $U$  может достигать 5–7 кВ, а сила тока разряда  $I$  от сотен до нескольких тысяч ампер. Очевидно, что для обеспечения таких высоких параметров разрядный про-

межуток должен быть во много раз больше, чем в обычной ЭЭО, — несколько миллиметров, диэлектрическая жидкость должна быть очень чистой, быстро очищаться от продуктов обработки, что и происходит при прокачке жидкости.

Процесс разряда с указанными параметрами обуславливает сильное его отличие от характера разряда при обычной ЭЭО. Только первый импульс протекает в обычных условиях в жидкой среде. При этом струя сжимается, теряет устойчивость и разрывается, прерывая разряд. При достаточном расходе жидкости образовавшаяся пароплазменная струя сохраняется. Последующие импульсы по мере накопления энергии конденсаторной батареи и замыкания жидкостью разрядного промежутка происходят уже автоматически не в потоке жидкой струи, а на ее поверхности, т.е. в пароплазменной среде, более «облегченной» для пробоя. При этом большая часть энергии разряда вкладывается не в основной плазменный столб, который только поддерживает процесс, а в местные светящиеся микроскопические сгустки, или плазмоиды, которые отделяются от столба, переносятся к аноду и проникают в него. Передавая заряд металлу в его поверхностных слоях, плазмоиды разрушаются, и в дальнейшем принесенные ими электроны уже движутся в металле под действием электрического поля по линиям тока электронов проводимости.

ПРПЖ оказывает на металл тепловое и механическое (деформационное) воздействие [5, 6]. Первое вызывает сильный разогрев поверхностных сло-

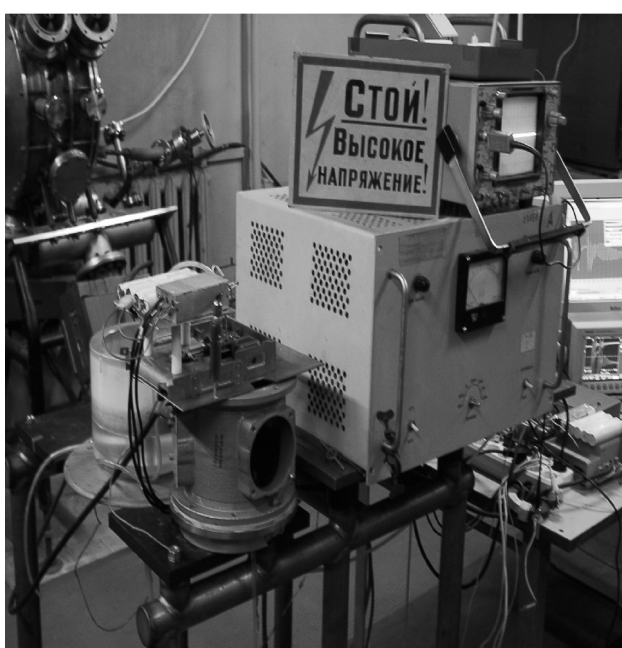
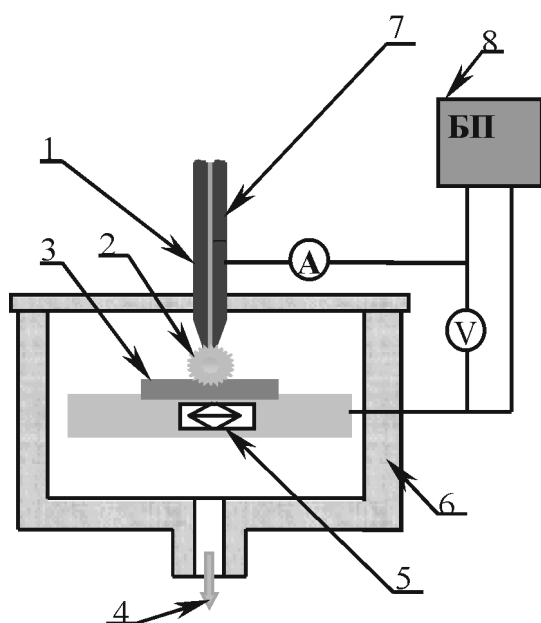


Рис. 4. Схема установки для обработки материалов воздействием ПРПЖ:

1 — наконечник; 2 — область разряда; 3 — образец; 4 — система стока жидкости; 5 — столик; 6 — диэлектрическая камера; 7 — диэлектрический трубопровод; 8 — блок питания

ев металла, его расплавление и частичное испарение, как и при обычной ЭЭО. При ПРПЖ возможен даже переход металла в плазменное состояние. Однако благодаря сильному сжатию столба разряда собственным магнитным полем размер пятна нагрева весьма мал (~10—20 мкм). Вследствие этого, а также ввиду малой длительности импульса размеры лунки в условиях ПРПЖ намного меньше, чем при ЭЭО. Мала также глубина интенсивного — до температур фазовых превращений — нагрева. Роль поверхностного источника нагрева, ввиду его сильной локализованности и кратковременности, по-видимому, не столь существенна, как при ЭЭО, зато омический (объемный) нагрев проходящим током в поверхностных слоях может быть значительным.

Неравномерный нагрев твердого металла под лункой должен вызывать в нем термомеханические напряжения. Быстрое остывание металла после окончания импульса может привести к термическому упрочнению, если таковое свойственно данному металлу (сплаву).

Механическое воздействие ПРПЖ на материал анода, если возникающие в нем напряжения превышают предел текучести, также могут привести к его упрочнению. Однако для этого давление на металл со стороны разряда должно быть достаточно велико. Источником высокого давления в условиях ПРПЖ может быть только ударная волна. Оценки показывают [4], что версию электронного удара сразу можно отбросить, так как ускоряющая разность потенциалов в приэлектродном слое у анода недостаточна для того, чтобы вызывать ударную волну в материале. Наиболее вероятно, что достаточно сильную ударную волну, способную вызвать пластическую деформацию металла, вызывают пондеромоторные силы, возникающие в объеме металла, то есть давление пинча в тонком слое анода, где плотность тока, сосредоточенная в пятне порядка 10—20 мкм, очень велика — сотни килоампер на квадратный миллиметр. Волна сжатия, возникающая в пределах объема плазмоида, проникает в металл и при разрушении кластера из-за ухода электронов мгновенно переходит в волну разрежения, которая сжимает металл, окружающий плазмод (эффект взрыва сосредоточенного заряда взрывчатого вещества).

Как показывают анализы, зерна переплавленного металла, образовавшегося на дне лунки после остывания образца, сильно измельчены, аморфизированы, металл имеет высокую твердость.

Таким образом, разряд оказывает на материал тепловое и деформационное воздействие, механизм которых подробно рассмотрен в [3—6]. При этом в материале происходят фазовые превращения второ-

го рода. Так,  $\alpha$ -титан превращается в  $\beta$ , имеющий ГЦК-решетку, затем при остывании он переходит в  $\alpha'$ -фазу.

## Результаты

Подвергались испытаниям следующие марки титановых сплавов: ВТЗ-1, ВТ5, ВТ6, ВТ14, ОТ4-1 [3, 4, 7, 8].

Основными критериями оценки эффективности воздействия ПРПЖ на металлы были приняты показатели микротвердости, измеряемые как на поверхности образца, так и по его торцу (на прямых шлифах), что позволяло получить данные о воздействии ПРПЖ на износостойкость, для оценки которой проводились трибологические испытания. Для отдельных образцов был проведен рентгеноструктурный фазовый и элементный анализ.

Исследование микротвердости и особенностей микроструктуры титановых сплавов после воздействия ПРПЖ проводили на плоских образцах, изготовленных из титановых сплавов с псевдо- $\alpha$ - и  $\alpha + \beta$ -структурой. Образцы вырезали из полуфабрикатов, находящихся в состоянии поставки: титановые сплавы ОТ4-1 и ВТ6 — после отжига. Микроструктурный анализ образцов проводили с использованием металлографических микроскопов (светового и бинокулярного). Исследовали структуру как обработанных ПРПЖ поверхностей, так и металлографических шлифов, вырезанных перпендикулярно обработанной поверхности. Металлографические шлифы после полирования подвергали травлению для получения контрастного рельефа, а также выявления структурных и фазовых составляющих. Микротвердость (НВ) поверхности измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузках до 1,962 Н. Из-за малой толщины упрочненных слоев микротвердость на поперечных шлифах измеряли при нагрузках на индентор не более 0,490 Н.

Для определения средней микротвердости измеряли не менее чем по 20 отпечатков по двум диагоналям. При этом в расчет принимались только те отпечатки, для которых различие в размерах диагоналей не превышало 5 %.

Химический состав образцов, подвергнутых воздействию ПРПЖ, приведен в табл. 1.

При обработке образцов варьировали следующие параметры: расстояние от поверхности образца до среза наконечника сопла, скорость перемещения столика относительно неподвижного наконечника.

Диапазон исследуемых длин разряда обработки находился в пределах 2—8 мм. Скорость перемещения образца изменялась в интервале 0,25—2,0 мм/с.

Материал	Содержание основных химических элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	N <sub>2</sub>	Fe
Сплав ОТ4-1	<0,10	<0,15	0,70—2,00	—	—	—	—	Основа	1,00—2,50	<0,05	<30,0
Сплав ВТ6	<0,08	<0,15	—	—	—	—	3,50—4,50	Основа	5,50—7,00	<0,05	<0,25

В качестве жидкости, подаваемой в рабочее пространство, использовали водопроводную воду.

На рис. 5 приведены фотографии (увеличение в 200 раз) поверхности образца из титанового сплава, подвергнутого воздействию ПРПЖ. Зона 1 расположена в центральной части участка образца, обработанного ПРПЖ, а зона 2 — на его периферии, где встречаются одиночные кратеры. На рис. 5,а особенно хорошо видны строго ориентированные кристаллы, прилегающие к расплавленному центру кратера.

В результате воздействия ПРПЖ на поверхности образцов наблюдаются многочисленные кратеры различной степени плотности, расположенные в виде полос по направлению движения разряда. Полосы кратеров шириной 2—3 см каждая разделены зоной необработанной холодной поверхности шириной 0,5—1,5 см. В необработанной зоне отмечаются отдельные кратеры и рельефные образо-

вания из ряда концентрических окружностей с точкой в центре. Цвет образований более светлый (светло-желтый), чем у кратеров, и не отличается от цвета необработанной поверхности образца. Кратеры имеют форму круглых ямок достаточно правильной формы со светлой точкой в центре. На светло-желтой необработанной поверхности наблюдаются голубые зигзагообразные прожилки в направлении перемещения разряда. Можно предположить что это оксид Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, светло-желтая поверхность — оксид TiO. В полосах кратеров можно рассмотреть темно-фиолетовые и черные пятна, которые можно идентифицировать как оксиды Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ti<sub>3</sub>O<sub>4</sub> соответственно. Изменение цвета оксидной пленки от светло-желтого до черного можно наблюдать не только между необработанной зоной образца и полосой кратеров, но и в пределах одного кратера. Центр кратера, как правило, более светлый, и по мере приближения к краю кратера (черного или

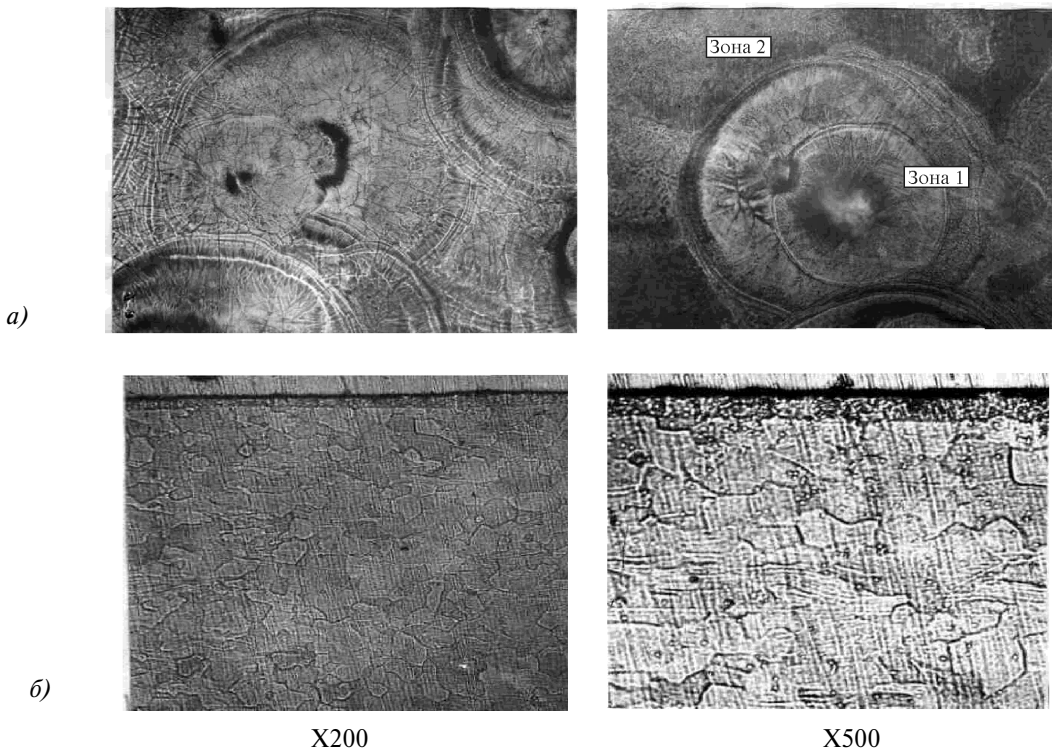


Рис. 5. Характер воздействия ПРПЖ на поверхность и структуру титановых сплавов:  
 а — макроструктура поверхности сплава ВТ5 после воздействия ПРПЖ (X 200);  
 б — микроструктура сплава ВТ5 на прямых шлифах после воздействия ПРПЖ

темно-фиолетового) цвета могут изменяться несколько раз.

Наличие на поверхности образцов титанового сплава, обработанных ПРПЖ, оксидных пленок различной окраски, т.е. большого разнообразия оксидов титана, говорит о существенном разбросе температур, при которых возможно их образование.

Как правило, при окислении титана образуется только рутил  $TiO_2$ , оксиды  $Ti_2O_3$  и  $TiO$  наблюдаются в весьма незначительном количестве. Наблюдаемое разнообразие оксидов  $TiO_2$ ,  $TiO$ ,  $Ti_3O_5$ ,  $Ti_2O_3$  и  $Ti_3O_4$ , по-видимому, связано с особенностями прерывистого разряда в потоке жидкости.

Сам кратер имеет форму достаточно правильных концентрических окружностей большого диаметра, внутри которых расположены с некоторым смещением относительно первых концентрические окружности меньшего диаметра. Поверхность кратера изменяется по цвету: края больших окружностей кратера имеют более темную окраску (черную, темно-фиолетовую), которая по мере приближения к центру становится светлой (светло-желтой). На окружности меньшего диаметра кратер вновь становится темным, и по мере приближения к его центру поверхность становится светлой.

На поверхности кратера отчетливо видны кристаллы, формирование которых происходит в условиях значительного переохлаждения. Формирующиеся кристаллы направлены от внешнего большого диаметра кратера к его центру. В центральной части кратера зерна имеют правильную форму.

В зонах, подвергнутых обработке с одним набором варьируемых параметров, диаметры кратеров различаются, но варьируются вокруг некоторого среднего значения. После воздействия разрядов с разной длиной разрядного промежутка средние диаметры кратеров различны. Режимы, различающиеся по скорости перемещения образцов, характеризуются близкими средними размерами кратеров.

Средние размеры единичных кратеров после обработки ПРПЖ определяли по результатам измерений в двух взаимно перпендикулярных направлениях не менее 20 произвольно выбранных кратеров с использованием отсчетного устройства микроскопа с погрешностью  $\pm 0,01$  мм. Данные табл. 2 показывают, что размеры кратеров на участках, подвергшимся оплавлению единичными импульсами, возрастают с увеличением длины разрядного промежутка.

Микроструктура поперечных сечений образцов из титанового сплава, полученная на приборе «Тесла-340» — растровом микроскопе системы «Link»

QX—2000, приведена на рис. 5,б. В качестве травителя применялась жидкость, состоящая из одной части плавиковой кислоты, одной части азотной кислоты и двух частей глицерина.

На обоих образцах видна белая полоска, представляющая собой более слаботравящиеся участки, подвергнутые непосредственной обработке ПРПЖ. В этой зоне расположен титан, быстрозакаленный при температуре, превышающей температуру  $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$ -превращений, ниже — переходные зоны неполной закалки из  $(\alpha + \beta)$ -области. В последующем  $\beta$ -титан в зависимости от скорости охлаждения  $\beta$ -фазы может претерпевать эвтектидное превращение  $\beta \rightarrow \alpha + Ti_3Al$  (для ВТ-5 при медленном охлаждении), а при определенных условиях и в  $\alpha'$ -фазу.

Также была исследована максимальная глубина модифицированного слоя  $h$  (мкм) при различных режимах работы установки. Данные приведены в табл. 3.

В табл. 4. приведены данные по замеру микротвердости поверхности образцов после обработки (по Бринеллю) для титановых сплавов разных групп. При этом варьировалось расстояние от среза электрода до поверхности образца (условно — длина разряда) и скорость перемещения образца. Следует отметить, что твердость по отношению к исходной возрастает во всех случаях, хотя на нее оказывает существенное влияние длина разряда.

При тех же режимах проводились обработка и испытания других образцов. Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 2

Материал	Средний диаметр кратеров, мм, при длине разряда обработки, мм			
	2	4	6	8
Сплав ОТ4-1	0,24	0,30	0,37	0,42
Сплав ВТ-6	0,30	0,35	—	0,45

Примечание. Скорость перемещения при электроимпульсной обработке 1 мм/с.

Таблица 3

Марка сплава	Разрядный промежуток $H$ , мм при $V = 1$ мм/с			Скорость перемещения образца $V$ , мм/с при $H = 4$	
	2	4	8	0,5	1,0
ОТ4-1	< 5	< 5	< 5	—	< 5
	< 5	< 5	< 5	—	< 5
ВТ6	< 5	< 5	< 5	—	< 5

Таблица 4

Материал	Исходная микротвердость	Длина разряда, мм				Скорость перемещения, мм/с			
		2	4	6	8	0,25	0,50	1,00	2,00
Сплав ОТ4-1 (с предварит. отжигом)	2560	3030 – 3620	3060 – 4400	2770 – 5210	2630 – 5500	—	3030 – 5500	3060 – 4400	—
Сплав ВТ6 (с предварит. отжигом)	3400	4000 – 5750	4000 – 5500	—	3620 – 5500	—	3620 – 5500	3620 – 5500	—

Таблица 5

Наименование сплава	Изготовитель	Твёрдость по Виккерсу, НV	
		Исходная	После обработки ПРПЖ
Сплав титановый ВТ3-1	Серийный продукт	469	498—590
Сплав титановый ВТ6 (с предварит. отжигом)	Серийный продукт	340	400—575
Сплав титановый ВТ14	Серийный продукт	400	452—657

Как видно, наибольшее увеличение микротвердости по предварительным данным наблюдается у сплава ВТ-14, поэтому он был исследован на микротвердость более подробно — не только по поверхности, но и по глубине модифицированного слоя [8].

Всего было обработано 28 образцов. Для определения микротвердости было выбрано 12 характерных образцов по следующим критериям: по количеству проходов (№ 412, 142, 196, 949), по высоте (№ 120, 138, 141, 102), по пиковым значениям параметров обработки (№ 20, 12, 111, 144). Результаты выборки и итоговые результаты исследования, параметры выбранных образцов сплава ВТ14 для обработки ПРПЖ и измерение микротвердости

$\left(\frac{\min}{\max}\right)$  после обработки (Па) приведены в табл. 6

(где № — номер образца;  $h$  — расстояние от электрода до образца;  $U$  — напряжение разрядной ем-

кости  $C = 0,094$  мкФ;  $I_{cp}$  — средний ток зарядной цепи;  $Q$  — расход воды: во время разряда/установленный до обработки;  $n$  — количество проходов электрода над поверхностью образца по одной линии; микротвердость исходного образца (№ 77):  $HV = 426,03 \div 326,70$ ,  $HV_{cp} = 344,16$ ).

Измерение микротвердости проводилось на твердомере ПМТ-3 по 9 точкам в средней зоне образца с учетом влияния краевого эффекта (зона влияния краевого эффекта принималась равной трем диаметрам струи с каждой стороны [4, 7]). Образцы обрабатывали вдоль длинной стороны. Шаг обработки — 1 мм.

Для определения микротвердости по глубине образца проводилась его подготовка по следующей методике:

I. Изготовление микрошлифов проводилось на линии для подготовки металлографических шлифов фирмы Struers (Дания). Резка образцов проводилась

Таблица 6

Серия	По количеству проходов				По высоте				$I=I_{\min}$	$Q=Q_{\min}$	$I=I_{\max}$	$Q=Q_{\max}$	
	№	412	142	196	949	120	138	141					102
$h$ , мм	5	5	5	5	8	7	6	5	5	8	6	4	6
$U$ , кВ	3,9	4	4,1	4	5,2	5	4,6	4	4	5,8	5	3,6	4,5
$I_{cp}$ , мА	100	95	80	95-100	40	55	68	85	30	60	120	70	70
$Q$ , см <sup>3</sup> /мин	$\frac{36,0}{45,0}$	$\frac{36,0}{45,0}$	$\frac{46,4}{51,0}$	$\frac{60,00}{72,0}$	$\frac{44,0}{47,0}$	$\frac{44,0}{47,0}$	$\frac{44,0}{47,0}$	$\frac{44,0}{47,0}$	$\frac{21,6}{29,4}$	$\frac{29,4}{30,0}$	$\frac{69,6}{75,6}$	$\frac{66,0}{96,0}$	$\frac{66,0}{96,0}$
$n$	2	4	6	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4
HV	$\frac{409,03}{701,83}$	$\frac{536}{1539}$	$\frac{479,22}{825,50}$	$\frac{310}{424}$	$\frac{513}{817}$	$\frac{395,65}{707,89}$	$\frac{593,70}{878,86}$	$\frac{367}{367}$	$\frac{435,41}{637,18}$	$\frac{505,49}{724,74}$	$\frac{457,21}{897,31}$	$\frac{408,49}{571,84}$	$\frac{408,49}{571,84}$
$HV_{cp}$	550,57	1037,5	610,88	367	665	510,96	685,30	367	505,86	604,73	637,84	460,54	460,54



на отрезном станке «Дискотом-2» при небольших подачах с обильным охлаждением. Шлифовка и полировка проводилась на станке «Абраматик» с применением алмазных паст различной зернистости, на твердых дисках для исключения «завала» кромки шлифа. Шлифы изготовлялись «прямые», т.е. перпендикулярно поверхности (обработки образца).

Травление проводилось в специально подобранном травителе для титановых сплавов:



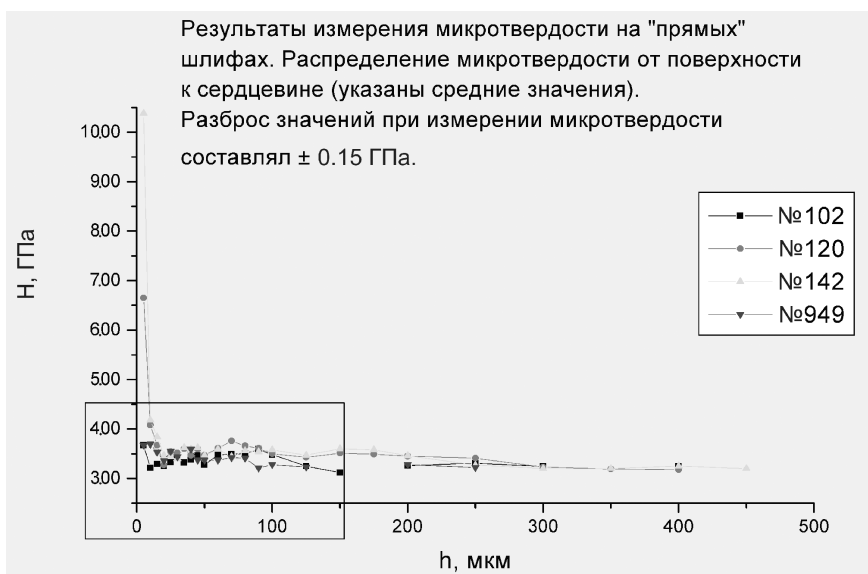
II. Металлографическое исследование структуры проводилось на микроскопе POLYVAR-MET (Австрия) при увеличениях  $\times 500$  и  $\times 1000$ .

III. Исследование распределения микротвердости в зависимости от расстояния от поверхности

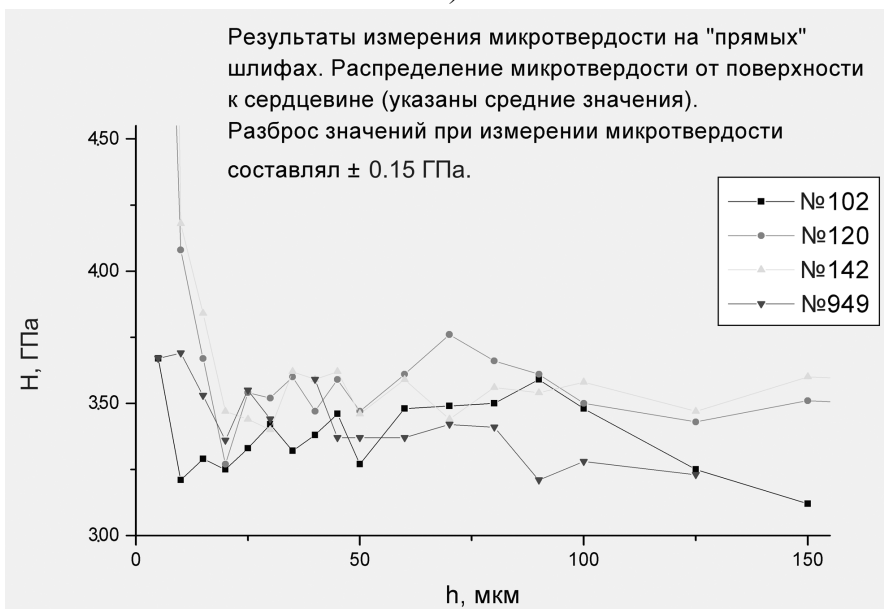
проводилось на ультрамикротвердометре «Микро-Дюромат-4000» для микроскопа POLYVAR-MET. Микротвердость измерялась с использованием нагрузки 0,1 Н (при расстоянии от поверхности до 50 мкм), и с нагрузкой 0,15 Н (при расстоянии от поверхности  $> 50$  мкм). Точность измерения диагонали отпечатка до 0,02 мкм.

IV. Для исследования микротвердости по глубине образца были отобраны образцы № 102 и 120 из серии с различной высотой электрода над образцом ( $h_{102} = 5$  мм,  $h_{120} = 8$  мм) и № 142 и 949 из серии с различным числом проходов электрода над поверхностью образца по одной линии ( $n_{142} = 4$ ,  $n_{949} = 8$ ).

В результате исследований были построены зависимости, приведенные на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Распределение микротвердости по глубине на образцах сплава ВТ-14 после обработки ПРПЖ (а); выделенная зона (б)

Таким образом, микротвердость образцов из титановых сплавов ОТ4-1, ВТ3-1, ВТ5, ВТ6, ВТ14 повышается в среднем на 35–60%.

В результате исследований для титановых сплавов можно рекомендовать следующие режимы обработки, обеспечивающие наибольшее повышение микротвердости:

- число проходов  $n = 4$ ;
- скорость перемещения 0,5–1,0 мм/с;
- сила тока 300–400 А и более 1000 А;
- величина разрядного промежутка 4–6 мм для сплавов ВТ3-1, ВТ5, ВТ6 и 6–8 мм для сплавов ВТ14 и ОТ-4.

**Трибологические испытания**

Более точные характеристики износостойкости были получены в результате экспериментов с использованием трущихся пар [7, 8].

Испытания проводились на установке «Фрикцион -1М», схема которой приведена на рис. 7. Испытывались образцы в форме дисков диаметром 20 мм и толщиной 3 мм.

Результаты испытаний приведены на рис. 8.

Абразивную стойкость металлов исследовали на устройстве, используемом в часовой и ювелирной промышленности.

Установка состоит из барабана диаметром 100 мм и шириной 55 мм, заполненного абразивным материалом. В качестве абразивного материала использовали резину с вкраплением твердых частиц. Резина измельчалась на гранулы с условным диаметром 4–6 мм и затем проходила предварительную обработку в вращающемся барабане в течение 8 ч. Образцы загружали в барабан, наполненный гранулами абразивной резины. При вращении барабана со скоростью 30 об/мин происходит контакт

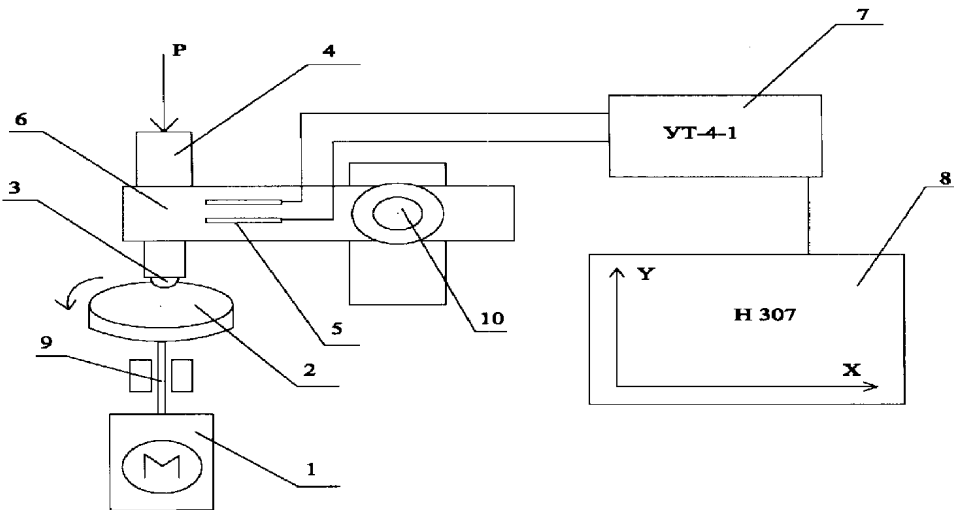


Рис. 7. Схема установки «Фрикцион-1М»:

1 – привод; 2 – предметный столик; 3 – сферический индентор; 4, 6 – тензобалки; 5 – тензодатчики; 7 – тензоусилитель; 8 – двухкоординатный самописец; 9 – вал; 10 – стойка

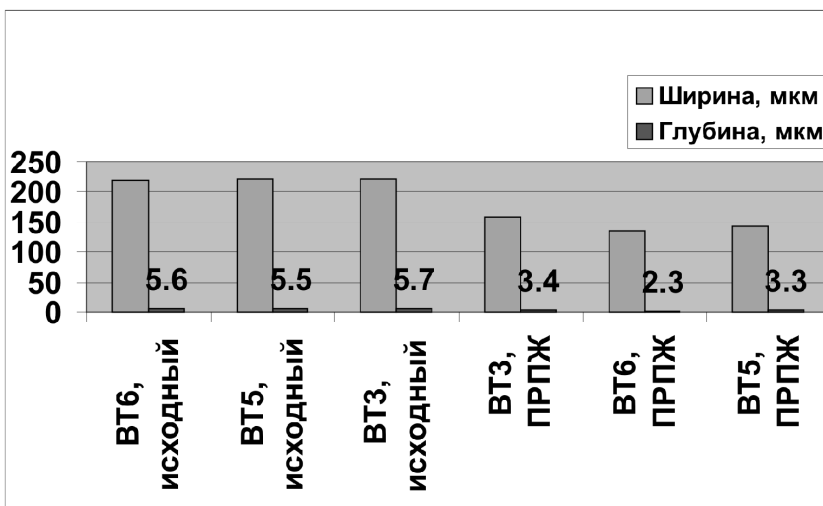


Рис. 8. Параметры дорожек трения при испытании с нагрузкой 0,55 Н

и истирание поверхности образцов абразивным материалом. Износостойкость оценивали по убыли массы образцов на единицу поверхности. Замер массы образцов осуществлялся на аналитических весах ВЛР-200 (2 кл., ГОСТ 241004-80) через каждые 6—7 ч.

В табл. 7 представлены экспериментальные данные убыли массы образцов сплава ВТ5 на единицу поверхности в процессе испытаний в зависимости от продолжительности изнашивания.

Таблица 7

Состояние поверхности образца	Изменение массы образца за время истирания, ч					
	5	11	18	25	33	40
Необработанная	0	0,091	0,17	0,24	0,31	0,39
После обработки ПРПЖ	0	0,04	0,06	0,11	0,1	0,18

Как видно, образцы после воздействия ПРПЖ имеют примерно в два раза более высокую абразивную стойкость, чем до обработки.

Параметры дорожек трения, полученные на установке «Фрикцион-1М» для некоторых титановых сплавов, приведенные на рис. 8, также свидетельствуют о повышении их износостойкости после обработки ПРПЖ в среднем на 35—60%.

**Выводы**

1. Анализ свойств металлических материалов показывает, что наиболее подходящими как для работы в парах трения, так и для целей эндогенного протезирования являются титан и его сплавы.

2. Экспериментально, на основании измерений микротвердости и трибологических характеристик, определены оптимальные режимы обработки титановых сплавов, подтверждено повышение микротвердости на глубину порядка 15—20 мкм. Проведенные эксперименты показали повышение характеристик обработанного материала по сравнению с исходным при оптимальных режимах: микротвердости и износостойкости образцов из титановых сплавов ОТ4-1, ВТ3-1, ВТ5, ВТ6 в среднем на 35—60%, абразивной стойкости — в два раза.

**Библиографический список**

1. Гаврюшенко Н.С. Материаловедческие аспекты создания эрозионностойких узлов трения искусственных суставов человека: Дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. 05.02.01. М., 2000.

2. Богданович Б.Ю., Калинин Б.А., Нестерович А.В., Пучков А.Н. Периодический дуговой разряд в потоке жидкости как средство повышения микротвердости и «травления» поверхности металла // Всероссийская научная конференция по модификации свойств конструкционных материалов. Томск: ТПУ, 1996.

3. Ахметова Е.Р. Перспектива использования безвакуумной технологии в обработке титановых материалов для эндопротезирования // Материалы научной сессии МИФИ-2004. Т. 5. М.: МИФИ, 2004.

4. Отчет о НИР «Обоснование механизма воздействия периодического разряда в потоке жидкости (ПРПЖ) на металлы и сплавы в зависимости от режимов обработки и их параметров». Этап №1: «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия периодического разряда в потоке жидкости (ПРПЖ) на материалы ВВТ». Шифр «Элион-М». Тема № 98610-901, МАИ (ТУ), каф.901, 2001г. Научный руководитель Фетисов Г.П.

5. Фетисов Г.П., Тазетдинов Р.Г., Лень Е.Н. Модели воздействия периодического разряда в протекающей жидкости (ПРПЖ) на металлы: 1. Физико-математическая модель деформационного воздействия и методика его расчета // Технология металлов. 2003. №3.

6. Фетисов Г.П., Тазетдинов Р.Г., Лень Е.Н. Модели воздействия периодического разряда в протекающей жидкости (ПРПЖ) на металлы: 2. Физико-математическая модель теплового воздействия и методика его расчета // Технология металлов. 2003. №3.

7. Алферов П.В., Ахметова Е.Р., Гавзе А.Л., Семенова М.А. Изменение комплекса механических и химических характеристик металлических материалов под действием периодического разряда в потоке жидкости // Материалы научной сессии МИФИ. Т. 4. М.: МИФИ, 2004.

8. Отчет о НИР «Исследование и разработка принципиальной технологии повышения износостойкости и трибологических характеристик материалов для эндогенного протезирования посредством воздействия мощных ионно-плазменных потоков». УДК 621.039.8, № госрегистрации 306449, МАИ (ТУ), каф.901, 2001г. Научный руководитель Фетисов Г.П.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 3.10.2008