

Литература

1. Ильин А.А., Загородний Н.В., Мамонов А.М., Балберкин А.В., Карпов В.Н., Макунин В.И., Магомедов Х.М., Палтиевич А.Р. Обоснование конструкции и исследование биомеханического поведения клиновидной ножки цементной фиксации эндопротезов тазобедренного сустава. // Вестник травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова. Медицина, 2005, №3, с. 3-10
2. Кнетс И.В., Пфафрод Г.О., Саулгозис Ю.Ж. Деформирование и разрушение твердых биологических тканей. – Рига: Зинатне, 1980. – 319 с.
3. Evans F. Mechanical properties of bone. Charls C. Thomas. Springfield, 1973. – 300 p.
4. Introduction to the Biomechanics of Joints and Join Replacement. / Edited by D. Dowson and V. Wright. / Mechanical engineering Publications LTD, London, 1981, p. 254.

УДК 669.295:615.46

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ  
И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И АДГЕЗИОННУЮ  
ПРОЧНОСТЬ ТИТАНОВОГО ПОКРЫТИЯ ИМПЛАНТАТОВ**

член-корр. РАН, д.т.н., проф. А.А. Ильин, к.т.н., доц. С.В. Бабин,  
к.т.н. Е.Н. Егоров, О.А. Поляков

В работе приведены результаты исследований по влиянию режимов плазменного напыления и термообработки на структуру и адгезионную прочность пористого титанового покрытия имплантатов.

This work presents the results of the study of the influence of routines of spray treatment and thermal treatment on structure and adhesion strength of spraying titanium coating of the implants.

Титановые сплавы широко применяют в качестве материалов имплантатов, в частности, для элементов эндопротеза тазобедренного сустава (ЭПТБС). Для улучшения срастания костных тканей с имплантатом необходимо повысить пористость и шероховатость его поверхности. Одним из перспективных способов получения пористого титанового покрытия является плазменное напыление [1]. В данной работе исследовали влияние технологических режимов плазменного напыления и термообработки на структуру и адгезионную прочность покрытия из технического титана марки ВТ1-0.

Нанесение покрытия на подложку из сплава ВТ6 проводили методом плазменного напыления проволоки из технического титана марки ВТ1-0. Напыление проводили в три слоя. Режим напыления был следующий: первый слой – напряжение  $U=38$  В, сила тока  $I=320$  А, расход плазмообразующих газов аргона и гелия  $Gg=0,65$  усл.ед.; второй и третий слои -  $U=34$  В,  $I=300$  А,  $Gg=0,5$  усл.ед.

Перед напылением для обеспечения необходимой чистоты поверхности и ее активации образцы подвергали пескоструйной обработке в течение 2 мин. Непосредственно перед напылением покрытия образцы нагревали в потоке

плазмы до температур 200-600 °С. После напыления образцы выдерживали до испытаний на срез при комнатной температуре в течение 24, 168 и 720 ч. Часть образцов подвергали термообработке непосредственно после напыления и после месяца вылеживания, после чего их также испытывали на срез. Режимы термообработки выбирали в соответствии с принципами, изложенными в монографии [2]. Для определения адгезионной прочности на срез применяли цилиндрические образцы из титанового сплава ВТ6 диаметром 9 мм, длиной 20 мм с нанесенным на них покрытием из технического титана в виде пояска толщиной 0,5 мм и шириной 3 мм. Испытания на срез проводили на установке FP100.

На рис. 1 приведена зависимость адгезионной прочности покрытия от времени вылеживания до испытаний на срез после плазменного напыления при разных температурах. При температуре нагрева подложки до 200 °С адгезионная прочность остается неизменной в течение всего времени вылеживания и составляет 15-17 МПа. При температуре нагрева подложки до 300 °С адгезионная прочность за неделю вылеживания уменьшается приблизительно в 1,8 раза (с 63 до 35 МПа), а за месяц – в 2,3 раза (до 28 МПа). При температуре нагрева подложки до 450 °С адгезионная прочность за неделю вылеживания уменьшается приблизительно в 2 раза (с 92 до 45 МПа) и затем остается постоянной после месяца выдержки. При температуре нагрева подложки до 600 °С адгезионная прочность уменьшается в процессе выдержки в наименьшей степени. В течение недели падение адгезионной прочности составляет 1,4 раза (с 64 до 45 МПа) и не изменяется после дальнейшего вылеживания.

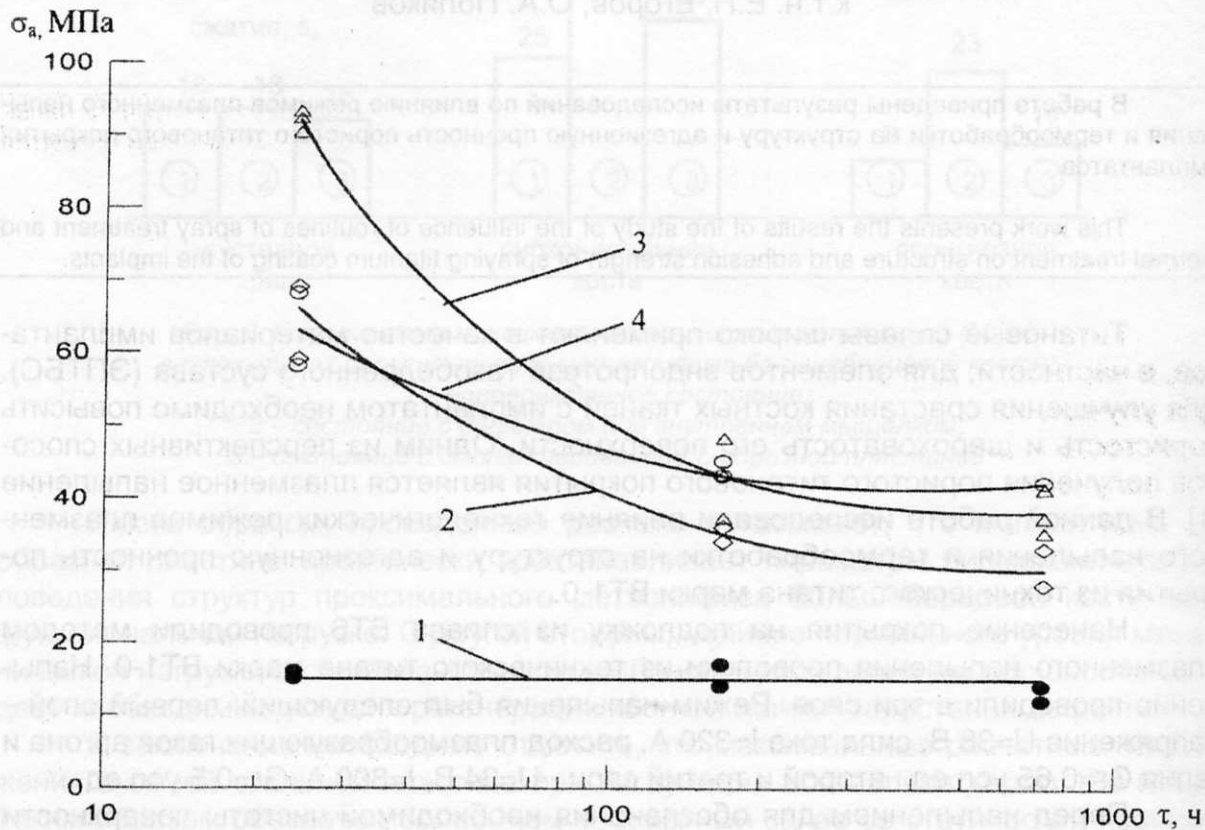


Рис. 1. Зависимость адгезионной прочности покрытия из титана ВТ1-0 от времени вылеживания до испытаний на срез после плазменного напыления при температуре нагрева подложки из сплава ВТ6, °С: 1 – 200; 2 – 300; 3 – 450; 4 – 600

Уменьшение адгезионной прочности может быть связано с релаксацией остаточных напряжений в покрытии, что приводит к ухудшению физического контакта покрытия с подложкой. Остаточные напряжения являются следствием термических условий напыления, различия в теплофизических свойствах материалов основы и покрытия, фазовых превращений и ряде других причин. Они появляются в процессе кристаллизации и остывания, как отдельных частиц, так и всего покрытия в целом. Очень короткое время взаимодействия и остывания не позволяет релаксировать напряжениям, как в самих частицах, так и по границе между ними в период образования покрытия.

По данным микроструктурного анализа при напылении покрытия с низкой температурой подложки процессы взаимодействия частиц с подложкой минимальны, поэтому остаточные напряжения практически не влияют на уровень адгезионной прочности. При температурах нагрева подложки 300-450 °С высокая адгезионная прочность обусловлена хорошим физическим контактом покрытия и дальнейшим химическим взаимодействием частиц покрытия с подложкой. Но вследствие действия остаточных напряжений происходит разрушение как самого покрытия, так и контактной зоны (покрытие + подложка). Поэтому очаги химического взаимодействия, которые возникли, разрушаются, а дальнейшие не образуются. При температурах подложки свыше 500 °С на поверхности титана образуются существенные оксидные пленки, что приводит к ухудшению взаимодействия частиц с основой. Вместе с тем падение адгезионной прочности за счет остаточных напряжений менее выражено, чем при температурах 300-450 °С.

Проведенные микроструктурные исследования показали, что после выдержки в течение месяца всех образцов наблюдается практически полное отсутствие физико-химического контакта между подложкой и покрытием. По границе раздела покрытия и подложки наблюдается несплошности шириной от 2 до 10 мкм. При этом доля участков физико-химического контакта составляет 1-3 %, в то время как сразу после напыления зона контакта приблизительно равна 20-25 %.

Для сохранения адгезионной прочности на максимальном уровне после напыления рекомендуется проводить термическую обработку для снятия остаточных напряжений и активации диффузионных процессов. Перерыв между напылением и термической обработкой не должен превышать 24 часов. Одним из эффективных способов повышения адгезионной прочности плазменного покрытия является термоводородная обработка (ТВО) [2, 3].

Поэтому в настоящей работе было исследовано совместное влияние температуры нагрева подложки перед напылением, времени перерыва между напылением и испытаниями на срез и дополнительное воздействие термоводородной обработки на структуру и адгезионную прочность покрытия ВТ1-0 с подложкой ВТ6. Результаты испытаний на срез обобщены на рис. 2. Для всех образцов обнаружено увеличение адгезионной прочности покрытия с повышением температуры подложки с 200 до 500-550 °С. При дальнейшем повышении температуры нагрева подложки наблюдается некоторое уменьшение адгезионной прочности покрытия (для образцов без ТВО).

ТВО приводит к существенному увеличению адгезионной прочности при всех температурах нагрева подложки. Так, при нагреве подложки до 200 °С ад-

гезионная прочность возрастает в 9,3 раза (с 15 до 140 МПа); до 300 °С – в 3,6 раза (с 55 до 200 МПа); 500°С – в 2,3 раза (с 90 до 210 МПа).

Наиболее сильное увеличение адгезионной прочности после ТВО по сравнению с исходными образцами наблюдается при температурах нагрева подложки до 200 °С. Это, прежде всего, связано с тем, что при этой температуре для образцов без ТВО доля физико-химического контакта покрытия с подложкой очень мала (1-5 %), что приводит к низким значениям адгезионной прочности. После ТВО наблюдается значительное увеличение доли участков, по которым прошло физико-химическое взаимодействие, до 40-50 %.

Вылеживание образцов с покрытием в течение месяца до проведения ТВО и испытаний привело к уменьшению адгезионной прочности при всех температурах нагрева подложки примерно в 1,4-1,8 раза. Так, при температуре нагрева подложки до 300°С адгезионная прочность покрытия для образцов, подвергнутых ТВО, уменьшилась с 200 до 120 МПа, а при 550 °С – с 210 до 150 МПа. Для образцов без ТВО также наблюдается уменьшение адгезионной прочности после вылеживания в течение месяца (при всех исследованных температурах нагрева подложки).

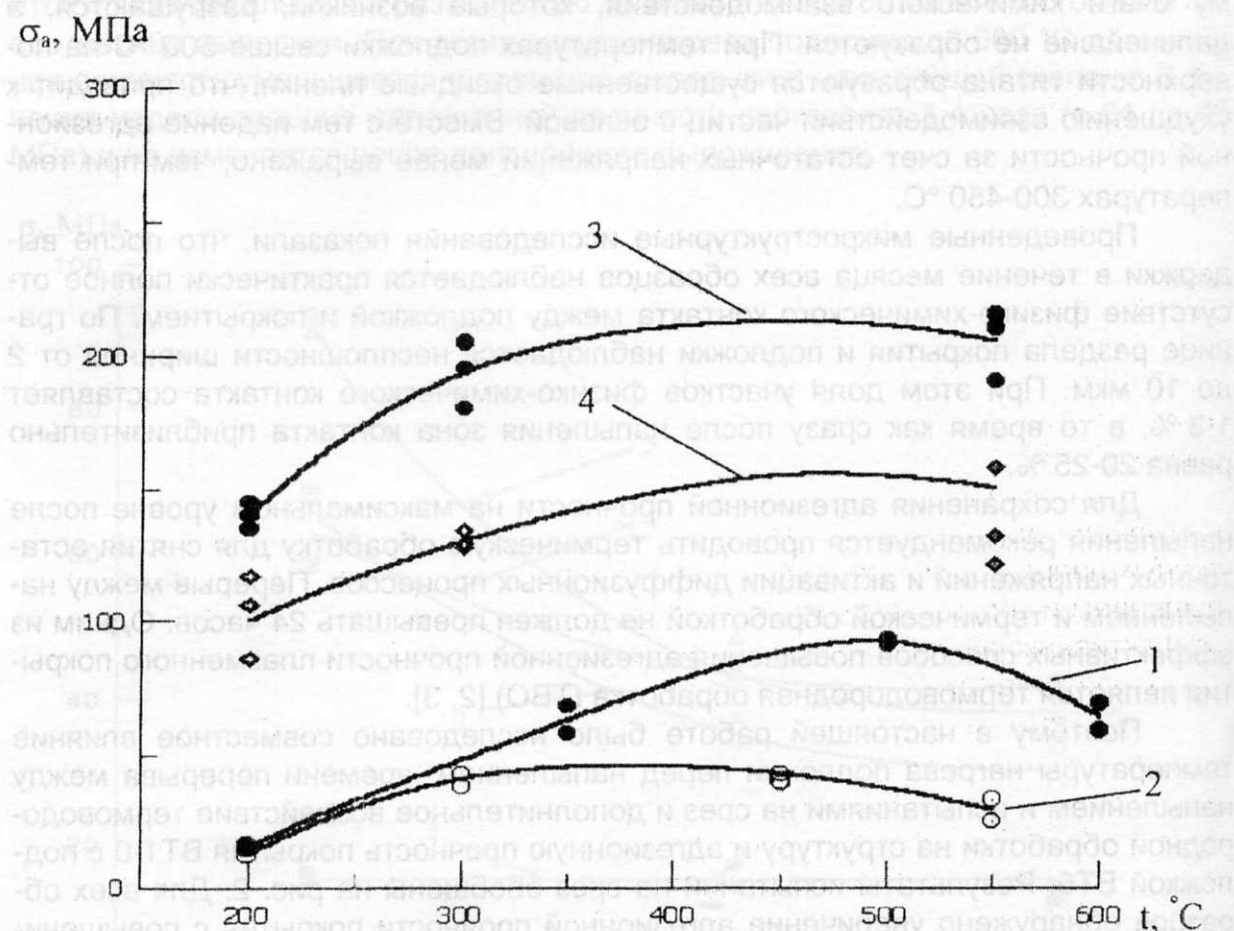


Рис. 2. Зависимость адгезионной прочности покрытия ВТ1-0 от температуры подложки из сплава ВТ6 и продолжительности вылеживания (после напыления) до испытаний на срез: 1 – без ТВО, испытания на срез в течение часа после напыления; 2 – без ТВО, испытания на срез после вылеживания в течение месяца; 3 – ТВО сразу после напыления, испытания на срез через час после ТВО; 4 – ТВО через месяц после напыления, испытания на срез через час после ТВО

**Заключение**

1. Исследовано влияние времени вылеживания образцов после напыления покрытия до испытаний на срез. Установлено, что после недели вылеживания образцов адгезионная прочность покрытия снижается в 2 раза, а после месяца вылеживания – примерно в 2,5 раза.
2. Установлено, что после месяца вылеживания адгезионная прочность образцов, подвергнутых термоводородной обработке, снижается приблизительно в 1,4-1,8 раза в зависимости от температуры нагрева подложки. С увеличением температуры нагрева подложки с 200 до 500°С адгезионная прочность возрастает с 140 до 210 МПа.
3. Для сохранения адгезионной прочности на максимальном уровне после напыления рекомендуется проводить термическую обработку для снятия остаточных напряжений и активации диффузионных процессов. Перерыв между напылением и термической обработкой не должен превышать 24 часов.

**Литература**

1. Новые материалы / В.Н. Анциферов, А.А. Ильин и др. Под науч. Ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
2. Водородная технология титановых сплавов. / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, В.К. Носов, А.М. Мамонов – М.: МИСИС, 2002. – 392 с.
3. Бабин С.В., Егоров Е.Н. Влияние термоводородной обработки на адгезию пористого титанового покрытия VT1-0 к подложке VT6./ Сб. тезисов докладов междунар. Научно-технической конференции «XXVII Гагаринские чтения», 2001. – С. 56.

УДК 669.295'245: 615.472

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ БЕДРЕННОГО КОМПОНЕНТА ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА ЦЕМЕНТНОЙ ФИКСАЦИИ**

д.т.н., проф. А.М. Мамонов, к.т.н. В.Н. Карпов, к.т.н., доц. А.Р. Палтиевич,  
к.т.н. А.А. Левочкин

Методом математического компьютерного моделирования определены параметры напряженно-деформированного состояния и механического поведения костных структур при эндопротезировании тазобедренного сустава с использованием ножки цементной фиксации «Имплатн-Ц». Близость полученных параметров к параметрам здоровой бедренной кости при функциональной нагрузке свидетельствует о хорошей биомеханической совместимости бедренного компонента.

By mathematical computer modeling method parameters of mode of deformation and of mechanical behavior of bone structures during hip replacement using "Implatn-C" stem of cement fixation were determined. The closeness of obtained parameters to parameters of unaffected femoral bone during functional load indicates good biomechanical compatibility of femoral component.