

Углеродный материал участвует в формировании всех тканей человеческого организма и составляет около 70 % массы мышц и 40 % костной ткани. В связи с этим углеродные частицы, высвобождаемые при функционировании пары трения, не будут вызывать иммунный ответ, тем самым устраняя одну из основных причин асептической нестабильности компонентов эндопротеза тазобедренного сустава.

Основой предложенного материала является углерод, в связи с тем, что этот материал обладает биоинертностью, а благодаря входящим в его состав бору и кремнию из него можно изготавливать монолитные конструкции достаточной толщины, которые могут использоваться в эндопротезах крупных суставов человека – не только тазобедренного, но и коленного.

Таким образом, основными преимуществами предлагаемого материала являются: высокая износостойкость, низкий крутящий момент, биоинертность. Отсутствие макрофагальной реакции на продукты износа углесталла может значительно уменьшить количество ревизионных вмешательств по причине асептической нестабильности компонентов.

Выводы

1. Максимально достигнутое напряжение в узлах конструкции пары трения из углесталла марки УСБ при экспериментах на 77,8 % меньше предела прочности материалов пары трения.

2. При исследовании статической нагрузки узел подвижности с парой трения из углесталла марки УСБ выдержал нагрузку до 3,5 т.

3. Крутящий момент не превысил требуемые по ГОСТ 31621–2012 1,5 Нм и составил 1,1 Нм.

4. При выполнении сравнительного исследования потери массы пар трения из керамики и углесталла керамическая пара потеряла 0,022 г, пара трения из углесталла – 0,015 г, что на 31,8 % меньше, чем у керамической пары трения.

Список литературы:

1. Тихилов Р.М., Шубняков И.И., Коваленко А.Н., Тотоев З.А., Лю Б., Билык С.С. Структура ранних ревизий эндопротезирования тазобедренного сустава // Травматология и ортопедия России. 2014. № 2. С. 5-13.
2. Fevang B.T. Improved results of primary total hip replacement // Acta Orthopaedica. 2010. Vol. 81. № 6. PP. 649-659.
3. Kenney C., Dick S., Lea J., Liu J., Ebraheim N.A. A systematic review of the causes of failure of Revision Total Hip Arthroplasty // Journal of Orthopaedics. 2019. Vol. 16. № 5. PP. 393-395.
4. Шубняков И.И., Тихилов Р.М., Денисов А.О. Что изменилось в структуре ревизионного эндопротезирования тазобедренного сустава в последние годы? // Травматология и ортопедия России. 2019. № 4. С. 9-27.
5. Cherian J.J., Jauregui J.J., Banerjee S. What Host Factors Affect Aseptic Loosening After THA and TKA? // Clinical Orthopaedics and Related Research. 2015. Vol. 473. PP. 2700-2709.
6. Lohmann C.H., Singh G., Willert H.-G., Buchhorn G.H. Metallic debris from metal-on-metal total hip arthroplasty regulates periprosthetic tissues // World Journal of Orthopedics. 2014. Vol. 5. № 5. PP. 660-666.

Александр Николаевич Митрошин,

д-р мед. наук, профессор,

зав. кафедрой хирургии,

директор Медицинского института,

Михаил Анатольевич Ксенофонтов,

ст. преподаватель,

Дмитрий Алексеевич Космынин,

ст. преподаватель,

кафедра травматологии и ортопедии

Медицинского института,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»,

г. Пенза,

e-mail: Maksenofontov@mail.ru

Ю.В. Якимович, Н.И. Китаев, С.Я. Пичхидзе

Анализ алмазоподобного покрытия на металлическом брекете

Аннотация

Приведены результаты исследования покрытия та-С на металлическом брекете из медицинской стали 12Х18Н10Т. Рассмотрены достоинства и недостатки покрытия. Структура и основные физико-механические свойства исследованы с применением методов рентгенофазового анализа (РФА), растровой электронной микроскопии (РЭМ), проведения измерений микротвердости, энергодисперсионного рентгеновского анализа (ЭДРА) поверхности брекета. Установлено, что покрытие увеличивает твердость брекета в 5,5 раза. Однако слишком высокая твердость алмазоподобного слоя приводит к увеличению хрупкости брекета.

Введение

Брекеты представляют собой замковые приспособления, передающие действие дуги на зубы [1]. Они являются составной частью несъемной брекет-техники, которая используется для устранения аномалий положения зубов и прикуса. Состоят брекеты из паза, крыльев и опорной площадки. В пазу брекета располагается ортодонтическая дуга, благодаря которой осуществляется перемещение зубов по зубному ряду. Фиксируются брекеты на эмаль зубов при помощи ортодонтического адгезивного материала. Брекеты различаются по форме, размеру, способу фиксации и виду материала, из которого они изготовлены [2]. В рассматриваемой работе изучались лигатурные металлические брекеты без покрытия и с нанесением алмазоподобного слоя [3]-[5].

В последнее время большой интерес вызывают тонкие пленки аморфного углерода. Высокая твердость и теплопроводность, химическая инертность и износостойкость, прозрачность в видимом и инфракрасном диапазонах позволяют использовать эти материалы в качестве покрытий для медико-биологических целей, в машиностроении, а также для создания приборов микро-, опто- и наноэлектроники [6]-[9].

Алмазоподобные углеродные покрытия отличаются исключительно высокими механическими свойствами и трибологическими характеристиками. Установлено, что свойства этих покрытий сильно зависят от метода и параметров процесса их формирования. Покрытия состоят из атомов углерода как с алмазо-, так и с графитоподобными связями, что существенно повышает ресурс использования изделий с напылением. Такие аморфные углеродные покрытия обладают твердостью алма-

за и коэффициентом трения графита. Срок службы изделий, на которые нанесено такое покрытие, возрастает в 5...20 раз [10]–[13].

Цель работы заключалась в анализе физико-механических характеристик брекета из медицинской конструкционной легированной стали марки 12X18H10T до и после упрочнения рабочей поверхности покрытием та-С.

Материалы и методы

Материалом для проведения исследования является металлический брекеты из стали марки 12X18H10T фирмы «Ormco» (США). Физико-механические характеристики брекета приведены без нанесения упрочняющего слоя и с алмазоподобным покрытием. Визуальное отличие металлического брекета без какого-либо покрытия и с та-С-слоем представлено на *рис. 1*.

В ходе работы проведен РФА на дифрактометре ARL X'TRA «Thermo Fisher Scientific» (Швейцария), в автоматическом режиме в интервале углов рассеяния от 5 до 90° на CuK_α -излучении с длиной волны 0,154178 нм.

Значения микротвердости получены согласно требованиям ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» на микротвердомере «HVS-1000» фирмы «Time Group Inc.» (Китай) по методу Виккерса при нагрузке на индентор пирамидальной формы 20, 50, 100 и 200 гс.

Нанесение алмазоподобного покрытия проводилось в высоковакуумной установке «DREVA 600» фирмы «VTD Vakuumtechnik» (Германия). Маршрутная карта процесса нанесения алмазоподобного покрытия та-С представлена на *рис. 2*.

Сущность технологии заключается в следующем. Перед покрытием поверхность детали подвергается тщательной ультразвуковой очистке от окисных пленок и загрязнений. После очистки происходит ионное травление хромом и нанесение адгезионного слоя Cr, затем повторяется ионное травление хромом длительностью 60 с. Алмазоподобное покрытие наносится PVD-вакуумным методом путем физического нанесения покрытия из паровой фазы. Для обеспечения необходимой адгезии на поверхность детали методом PVD предвари-

тельно наносится адгезионный углеродистый слой. Установка имеет лазерную камеру, в которой твердый графит под действием ARC-модуля лазера при токе нагрузки 40 А превращается в газообразное состояние. Затем при помощи плотного потока плазмы, создаваемой полым катодом, и дуговых вакуумных источников испарения парообразный графит переводится в возбужденное ионизированное состояние. Под действием подачи напряжения смещения графит осаждается на поверхности адгезионного слоя детали, превращаясь в алмазоподобное тетрагональное аморфное покрытие та-С.

Расчет напряженно-деформированного состояния брекета проведен с учетом толщины алмазоподобного покрытия. Статистический анализ 3D-модели ортодонтического брекета из медицинской стали с алмазоподобным покрытием и без покрытия при приложенной нагрузке, равной 30 Н, осуществляли в программе «SolidWorks 2019 Simulation» компании «Dassault Systemes» (Франция) при помощи менеджера оболочки. ЭДРА поверхности брекета, а также получение изображений морфологии алмазоподобного слоя осуществляли методом РЭМ на микроскопе «Aspex Explorer» фирмы «Aspex» (США) при ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ.

Результаты

По данным РЭМ можно сделать вывод, что плотность нанесения покрытия достаточно высокая, образуются агломераты, при этом толщина покрытия составляет примерно 6 мкм (*рис. 3а-в*). Покрытие является достаточно твердым, но хрупким, поэтому при шлифовке и полировке оно крошится.

Анализ РЭМ-изображений показывает увеличение содержания С на фоне уменьшения содержания Fe на поверхности брекета (*рис. 3г, д*).

По результатам РФА, представленного на *рис. 4а*, можно выявить, что изначально в образце стали 12X18H10T в основном содержалась смесь из двух составляющих: α - и γ -железа. Гранецентрированной кристаллической (ГЦК) решетке γ -фазы Fe принадлежат линии {111} (на $2\theta \sim 43,6^\circ$), {200} (на $2\theta \sim 50,7^\circ$) и {220} (на $2\theta \sim 74,4^\circ$), ее экстраполированный на $\theta = 90^\circ$ период решетки $a_\gamma = 0,3608 \pm 0,0003$ нм. Это легированный аусте-

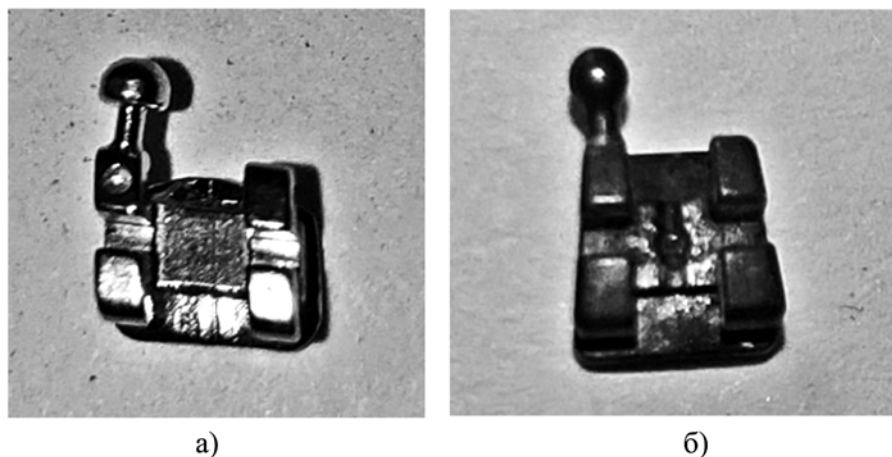


Рис. 1. Металлический брекеты без покрытия (а) и с покрытием та-С (б)

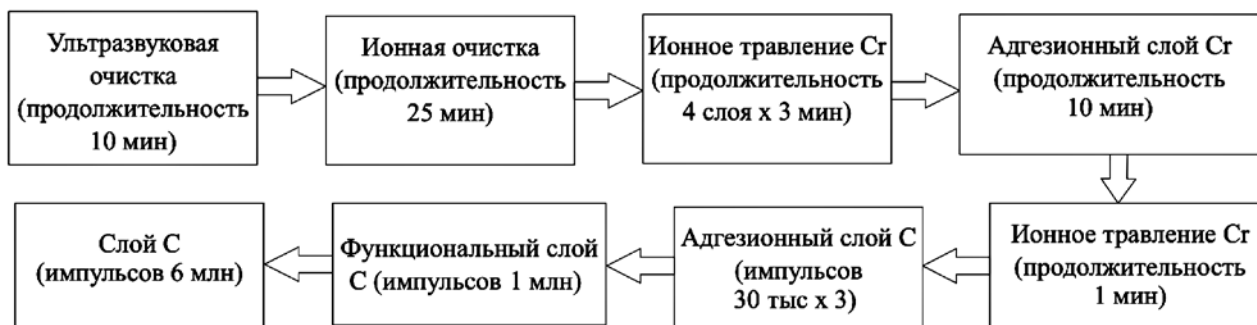


Рис. 2. Маршрутная карта нанесения покрытия на установке «DREVA 600»

нит Fe-Cr-Ni. Объемноцентрированной кристаллической (ОЦК) решетке α -фазы Fe принадлежат линии $\{110\}$ (на $2\theta \sim 44,5^\circ$), $\{200\}$ (на $2\theta \sim 64,5^\circ$) и $\{211\}$ (на $2\theta \sim 81,6^\circ$), ее экстраполированный на $\theta = 90^\circ$ период решетки $a_\alpha = 0,2892 \pm 0,0005$ нм. Эти значения периодов решетки больше периодов решетки соответствующих фаз чистого железа, для которого $a_\gamma = 0,3573$ нм, $a_\alpha = 0,2866$ нм, вследствие обогащения твердого раствора хромом и никелем, увеличивающими период решетки обеих фаз железа.

После нанесения покрытия ta-C исследуемый образец в основном содержит на поверхности сложный карбид Cr-Ni-Fe-C и алмазоподобный углерод. Наблюдается уменьшение интенсивностей пиков, относящихся к α - и γ -Fe. Данный факт свидетельствует о том, что на поверхности образца находится достаточно плотный слой C-алмазоподобного покрытия.

График твердости при изменении нагрузки на индентор показывает, что твердость поверхности образца увеличилась с 540 до 2954 HV после нанесения покрытия (рис. 4б).

Сравнительные статические характеристики ортодонтического брекета из стали 12Х18Н10Т, предел текучести до упрочнения стали равен 620 МПа и после упрочнения 910 МПа (приведены в табл. 1).

По результатам исследования НДС определено, что после нанесения алмазоподобного покрытия на ортодонтический брекет статические перемещения уменьшились практически в 7 раз, а напряжения сократились примерно на 142,2 МПа.

Согласно результатам исследований, приведенным в табл. 1, можно сделать заключение, что нанесение покрытия

на брекет приводит к частичному снятию напряжений и уменьшению перемещений.

Заключение

Проведен анализ физико-механических характеристик брекета из медицинской конструкционной легированной стали марки 12Х18Н10Т до и после упрочнения рабочей поверхности покрытием ta-C. Показано, что поверхностная твердость после нанесения алмазоподобного покрытия ta-C увеличилась примерно в 5,5 раза – с 540 до 2954 HV, что способствует росту прочности конструкции ортодонтического брекета.

Анализ напряженно-деформированного состояния 3D-модели металлического брекета из стали 12Х18Н10Т показал, что статические напряжения после нанесения алмазоподобного покрытия уменьшились на 142,2 МПа, а статические перемещения изменились с 804,9 до 110,8 мкм.

Список литературы:

1. Герасимов С.Н. Несъемная ортодонтическая техника. – СПб.: Дентал-комплекс, 2002. 64 с.
2. Михалин А.Н., Никаноров Р.А. Современные средства лечения зубочелюстных аномалий // *Juvenis Scientia*. 2017. № 12. С. 19-21.
3. Мхитарян А.Р. Брекеты: почему многих людей пугают брекеты?! / Сб. научн. статей «Здоровье и образование в XXI веке». – М.: Техномед Холдингс, 2015. № 1. С. 23-25.

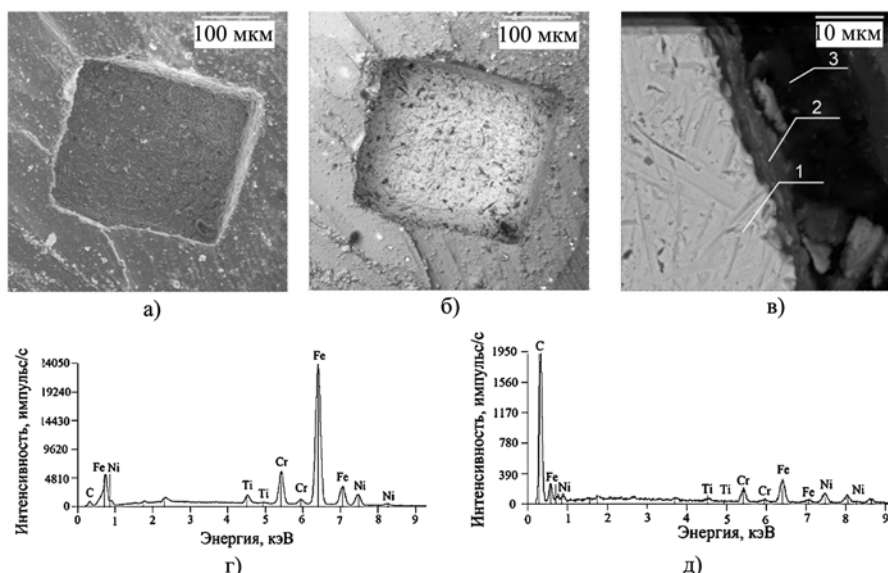


Рис. 3. Морфология и структура брекета: а) в отраженных электронах; б) во вторичных электронах; в) шлиф; 1 – металл; 2 – покрытие; 3 – эпоксидная смола; ЭДРА стали брекета до (г) и после нанесения покрытия ta-C (д)

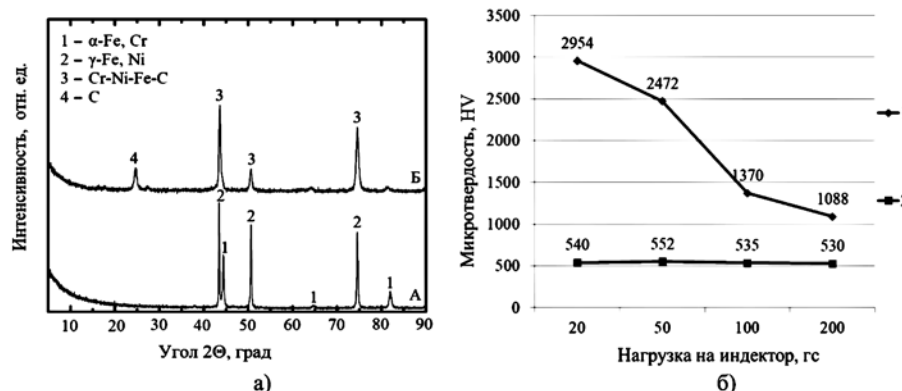


Рис. 4. РФА (а) образца без (А) и с ta-C-покрытием (Б); б) твердость образца при изменении нагрузки на индентор: 1 – образец с покрытием ta-C; 2 – образец без покрытия

4. *Логинова Н.К., Колесник А.Г., Житков М.Ю.* Исследование влияния жевательных нагрузок на твердые ткани зубов // Институт стоматологии. 2009. № 2 (43). С. 64-65.
5. *Персин Л.С.* Ортодонтия. Диагностика и лечение зубочелюстно-лицевых аномалий и деформаций. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. С. 640.
6. *Костин К.Б., Горишков Н.В., Викулова М.А., Лукьянова В.О., Пичхидзе С.Я.* Исследование поверхности и состава стали марки 12Х18Н10Т с разными типами обработки / Сб. материалов XXVIII МНПК. – Самара: НИЦ Л-Журнал, 2017. 2 с.
7. *Либерман Я.Л., Штерензон В.А.* Явление снижения стойкости режущего инструмента при нанесении твердого алмазоподобного покрытия // Символ науки. 2015. № 12-1. С. 64-67.
8. *Паиков М.В., Хисамутдинов Р.М.* Алмазоподобные покрытия / Научные открытия. Сборник статей III Международной научной конференции. – Киров: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2018. С. 68-76.
9. *Перинская Е.Д., Лясникова А.В.* Алмазоподобные ионосинтезируемые биоактивные покрытия для медицинских изделий // Математические методы в технике и технологиях. 2014. № 11 (70). С. 69-71.
10. *Allen M., Myer B., Rushton N.* In vitro and in vivo investigations into the biocompatibility of diamond-like carbon (DLC) coatings for orthopedic applications // Journal of Biomedical Materials Research. Part B: Applied Biomaterials. 2001. Vol. 58. P. 319.
11. *Gruen D.M., Buckley-Golder I.* Diamond Films: Recent Developments // Mater. Res. Soc. Bulletin. 1998. Vol. 23. № 9. P. 16.
12. *Maitre N.* Physical and chemical properties of amorphous hydrogenated carbon films deposited by PECVD in a low self-bias range // Journal of Non-Crystalline Solids. 2005. Vol. 351. PP. 877-884.
13. *Robertson J.* Mechanical properties and coordinations of amorphous carbons // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68. PP. 220-223.

Юлия Владимировна Якимович,
студентка 3 курса бакалавриата,
кафедра «Материаловедение
и биомедицинская инженерия»,
Никита Игоревич Китаев,
студент 1 курса аспирантуры,
кафедра «Технология и системы
управления в машиностроении»,
Сергей Яковлевич Пичхидзе,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра «Материаловедение
и биомедицинская инженерия»,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет им. Гагарина Ю.А.»,
г. Саратов,
e-mail: iakimovic10yulia@gmail.com

Таблица 1

Результаты расчета НДС ортодонтического брекета без покрытия и с покрытием ta-C

