

# Инструмент, порошки пасты

---

УДК 621.922.34:615.477.2

**Е. А. Пащенко, С. Е. Шейкин, Д. В. Ефросинин,  
А. Н. Черненко, Р. В. Милоцкий** (г. Киев)

## **Инструмент для прецизионной алмазной обработки сферических головок эндопротезов из чистого титана**

*Разработаны абразивные композиты на основе модифицированных эпоксидных смол и синтетических алмазов, представляющие собой трехуровневые адаптивные системы, которые позволяют производить обработку технически чистого титана без схватывания. Инструмент, содержащий данные композиты, позволил создать эффективную технологию изготовления головок эндопротезов тазобедренного сустава из технически чистого титана.*

**Ключевые слова:** головка эндопротеза тазобедренного сустава, абразивные композиты, технически чистый титан.

В настоящее время производимые в Украине эндопротезы тазобедренного сустава по качеству существенно уступают зарубежным. По этой причине в отечественной медицинской практике используются в основном импортные изделия, высокая стоимость которых делает операцию протезирования недоступной для пациентов с небольшими доходами, что не позволяет им вернуться к полноценной жизни. Таким образом, создание отечественного социального эндопротеза тазобедренного сустава, который отвечал бы современным требованиям и был бы доступен потенциальным потребителям Украины, является чрезвычайно важной медико-социальной проблемой.

В Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ НАН Украины) в течение последних лет активно ведутся работы по созданию технологии изготовления деталей шарнирного сочленения (пары трения) эндопротеза – сферической головки и ацетабулярной чашки (рис. 1), которые в значительной мере определяют надежность и долговечность изделия. Нестабильность и износ деталей пары трения могут явиться причиной ревизионной операции.

Долговечность шарнирного сочленения эндопротеза определяется рабочими свойствами применяемых материалов, среди которых износостойкость, прочность, триботехнические характеристики, биоинертность. Необходимо отметить, что материал, в полной мере отвечающий перечисленным требова-

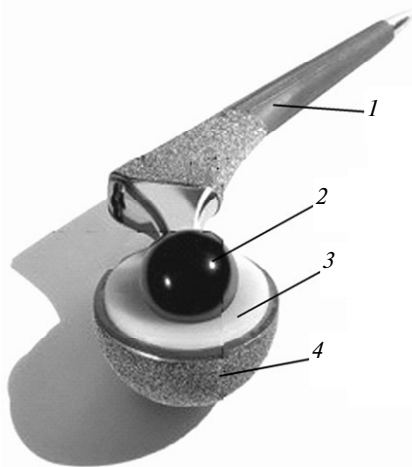


Рис. 1. Общий вид эндопротеза тазобедренного сустава с металлической головкой: 1 – ножка; 2 – головка; 3 – ацетабулярная чаша; 4 – обойма.

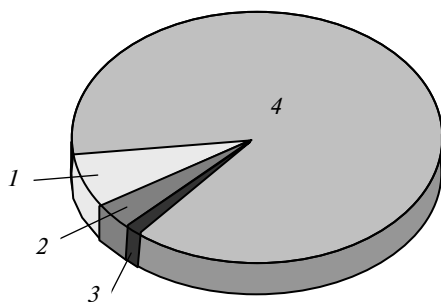


Рис. 2. Диаграмма различного сочетания материалов в паре трения, применяемых в эндопротезах тазобедренного сустава: 1 – СВМПЭ–керамика 7,2 %; 2 – металл–металл; 3 – керамика–керамика; 4 – СВМПЭ–металл 85,0 %.

ниям, к настоящему времени не создан. Каждый из существующих медицинских материалов имеет свои достоинства и недостатки, которые достаточно подробно описаны в литературе.

Современная медицина в качестве заменителей костей использует металлы и их сплавы (Ti, TiAlV, CoCr, нержавеющую сталь горячейковки FeCrNiMoMn (ISO 5832/1), CoCrMo (ISO 5832/4)), керамику, специальные виды стекла, полимеры и различные композиты [1, 2].

В 1958 г. J. Charnley [3], подойдя к проблеме создания пары трения эндопротеза как, прежде всего, трибологической, создал эндопротез, ставший “золотым” стандартом эндопротезирования. В качестве материала головки был применен сплав на основе CoCrMo, а ацетабулярной чашки – хирулен (сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) – ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE)). До настоящего времени пара трения с таким сочетанием материалов наиболее широко распространена в практике эндопротезирования (рис. 2) [1, 2, 4, 5].

Однако с точки зрения биоинертности сплав CoCrMo – не идеальный материал. Компоненты данного сплава не являются абсолютно безвредными для человеческого

организма [6]. Исходя из этого, было бы предпочтительным применение в качестве материала головки чистого титана. Основное препятствие для его широкого применения в практике эндопротезирования – недостаточные для использования в парах трения механические и трибологические характеристики.

Необходимым условием успешного применения чистого титана как материала сферической головки эндопротеза является модификация его рабочей поверхности, результатом которой должно стать оптимальное сочетание механических и трибологических характеристик для использования в паре трения. Получить такие характеристики рабочей поверхности изделия можно при использовании азотирования как метода ее модификации [7, 8]. Это открывает перспективы применения чистого титана в эндопротезировании и делает актуальной комплексную задачу разработки технологии прецизионной механической обработки сферических головок из титана ВТ1-0.

Необходимо отметить, что к настоящему времени такая технология не создана. Причиной является высокая шероховатость поверхности чистого титана при использовании методов абразивной обработки. Повышенная склонность к схватыванию с практически всеми конструкционными и инструментальными материалами приводит к нестабильности процесса обработки и, как следствие, неудовлетворительному качеству обрабатываемой поверхности. Именно это заставляет применять для изготовления головок эндопротезов двухфазные титановые сплавы (ВТ6 – “Инмед” (Киев), ВТ6, ВТ20 – МАТИ (Москва)). Возможность повышения твердости этих сплавов термообработкой позволяет улучшить их обрабатываемость. Однако вследствие наличия легирующих добавок они уступают чистому титану по такому показателю как биоинертность. Именно по этой причине их применение для изготовления деталей имплантатов в развитых странах неуклонно сокращается. По трибологическим характеристикам ВТ6 и ВТ1-0 практически не отличаются [6, 7, 9].

Эксперименты авторов показали, что для достижения необходимой точности изделия, соответствующей ИСО 7206-2-2005, при изготовлении керамических головок эндопротезов достаточно эффективной оказалась схема свободного притирания (рис. 3) [10]. Преимуществом данной схемы является то, что она не требует сложных и дорогостоящих станков и может быть реализована на универсальном оборудовании.

К детали, посаженной на оправку и установленной в патрон токарного станка, прижимают под углом  $\alpha$  инструмент, закрепленный в обойме, которая опирается на шарнир. Характерной особенностью схемы является малая скорость перемещения инструмента (притира) относительно обрабатываемой детали в сравнении с традиционным шлифованием.

При обработке сферических заготовок из чистого титана проблемой было отсутствие инструмента, обеспечивающего стабильное снятие припуска и получение соответствующей шероховатости поверхности титанового изделия при обработке по данной схеме.

Технологический маршрут обработки сферических деталей из ВТ1-0 должен включать предварительные операции прецизионной обработки, задачей которых является получение необходимой точности изделия, и финишные операции (полирование) для получения шероховатости поверхности  $Ra = 0,05$  мкм, соответствующей ИСО 7206-2-2005.

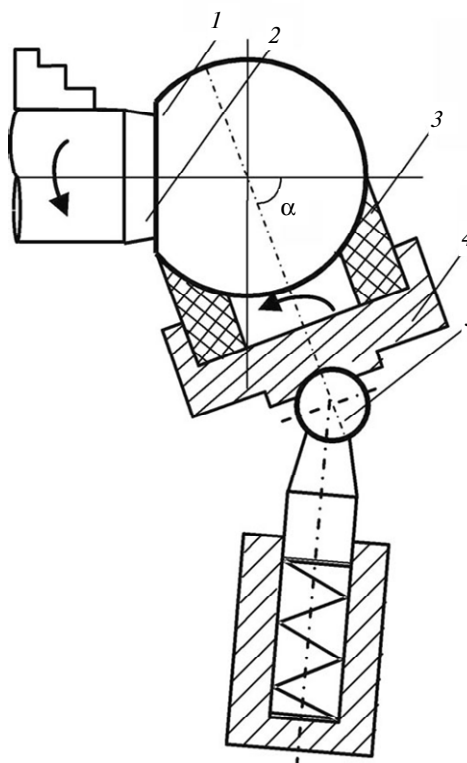


Рис. 3. Обработка сферических головок по схеме свободного притирания: 1 – деталь; 2 – оправка; 3 – инструмент; 4 – обойма; 5 – шарнир.

Основной задачей при разработке инструмента для предварительной прецизионной обработки является создание работоспособного абразивного композита, позволяющего избежать шаржирования обрабатываемой поверхности изделия и задиорообразования.

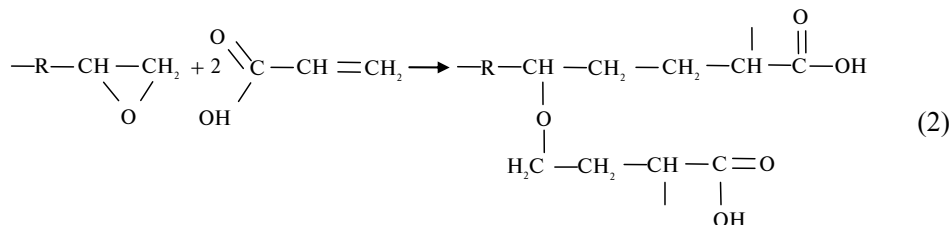
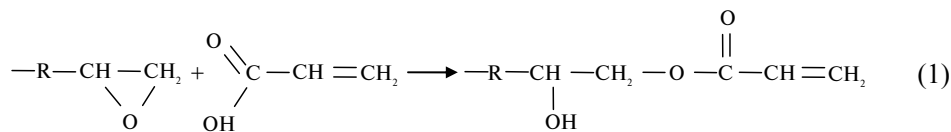
Экспериментально установлено, что можно исключить шаржирование обрабатываемого изделия, применив в абразивном композите связку, надежно удерживающую абразивные зерна, при этом избежав их макроразрушений.

Известно, что интенсивность возникновения и развития очагов схватывания при контактном взаимодействии абразивного инструмента с обрабатываемым изделием быстро возрастает с увеличением реальной площади контакта связки абразивного композита с поверхностью титановой заготовки. Величина этой площади и скорость ее изменения в процессе изнашивания инструмента или при изменении условий его работы зависят от структуры и свойств абразивного композита.

При использовании традиционных абразивных композитов [11, 12] вершины режущих зерен на их поверхности находятся на разной высоте, поэтому при неизменном усилии прижима площадь непосредственного контакта абразивных зерен и связки с обрабатываемой поверхностью может изменяться в широких пределах. Как правило, с обрабатываемой поверхностью контактирует лишь малая доля зерен, на которых концентрируется значительная нагрузка, приводящая к их разрушению с отделением крупных фрагментов. При этом формируется новая база контакта, представленная небольшим количеством зерен с меньшим уровнем выступания над связкой. По мере разрушения абразивных зерен разница между их выступанием над поверхностью и глубиной внедрения в обрабатываемый материал уменьшается. В результате увеличивается площадь контакта связки с обрабатываемой поверхностью. При абразивной обработке титана это приводит к формированию очагов схватывания между свежесформированными поверхностями и появлению задиоров на обрабатываемой поверхности.

Избежать перечисленных негативных явлений при обработке титана можно, применив абразивные композиты, связка которых способна к обратимому уменьшению модуля упругости и повышению деформируемости в ответ на увеличение механической нагрузки, приложенной к абразивным зернам, т. е. к адаптивной перестройке своей структуры под действием нагрузки. Этим требованиям удовлетворяет эпоксиакрилатная смола, наполненная порошком карбоната кальция.

Традиционно эпоксиакрилатные смолы получают путем взаимодействия эпоксидных олигомеров, например глицидиловых эфиров дифенилпропана, с акриловой кислотой. При введении акриловой кислоты в эпоксидный олигомер происходит взаимодействие эпоксидных циклов с ее карбонильными группами. В образующемся продукте свободные эпоксидные группы отсутствуют. Образование пространственно сшитого полимера происходит за счет двойных связей привитых фрагментов акриловой кислоты. Оба упомянутых типа реакционных центров не способны к химическому взаимодействию с поверхностью частиц карбоната кальция. Альтернативный подход к синтезу эпоксиакрилатных олигомеров позволил получить продукт, образующий химические связи на границе раздела с наполнителем. Синтез проводили в среде диметилацетамида в присутствии малой (менее 0,2 % по массе) концентрации пероксида дикумила. Различие традиционного и альтернативного синтезов эпоксиакрилатных олигомеров иллюстрируется соответствующими схемами:



Наличие в эпоксиакрилатном олигомере, синтезированном по схеме (2), свободных карбоксильных групп обуславливает его высокую реакционную способность по отношению к наполнителю – карбонату кальция.

По схеме (2) образуются олигомеры разветвленного строения. По сравнению с линейными продуктами, получаемыми по схеме (1), они обладают несколько большей молекулярной массой, сохраняя, тем не менее, плавкость и растворимость. Наличие в олигомерах простых эфирных мостиков и свободных карбоксильных групп, отсутствующих в продуктах реакции (1), подтверждается данными ИК-спектроскопии.

Особенности взаимодействия на границе связующего и частиц наполнителя были изучены методом спектроскопии комбинационного рассеяния с использованием Фурье-спектрометра Smart-Raman DXR компании “Thermo Scientific”. Техника Фурье-спектроскопии позволила разделить составляющие совокупного спектра, обусловленные эпоксиакрилатным полимером и частицами наполнителя (карбоната кальция).

Спектры снимали с поверхности образцов алмазосодержащего композита в условиях прижима к поверхности прозрачной таблетки из кварцевого стекла, имитирующей обрабатываемый материал. Поверхность таблеток из алмазосодержащего композита предварительно вскрывали на плоскошлифовальном станке с использованием абразивного круга 1A1 150×20×32 64C3.

Схема эксперимента представлена на рис. 4. Образцы композита содержат 25 % (по объему) порошка алмаза AC20 125/100.

Диаметр пятна возбуждающего лазера составлял 25 мкм, что позволило изучить процессы в веществе связки, находящейся в силовом поле, создаваемом нагруженным зерном алмаза в непосредственной близости от границы раздела. Поскольку авторов интересовали изменения, связанные с поверхностью частиц наполнителя (карбонат кальция со средним размером частиц 0,4 мкм), был исключен вклад полимерной составляющей. Спектры комбинационного рассеяния (КР), отражающие изменения в поверхностных слоях частиц наполнителя, обусловленные их обратимым химическим взаимодействием с функциональными группами композита, представлены на рис. 5, 6.

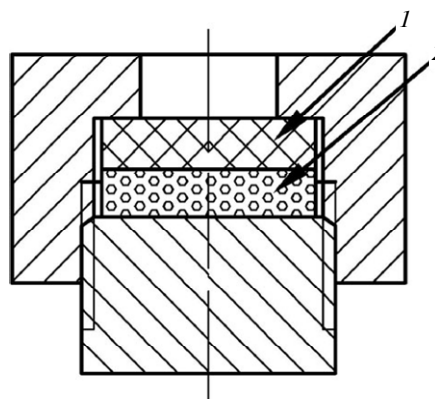


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 – таблетка из кварцевого стекла; 2 – образец композита.

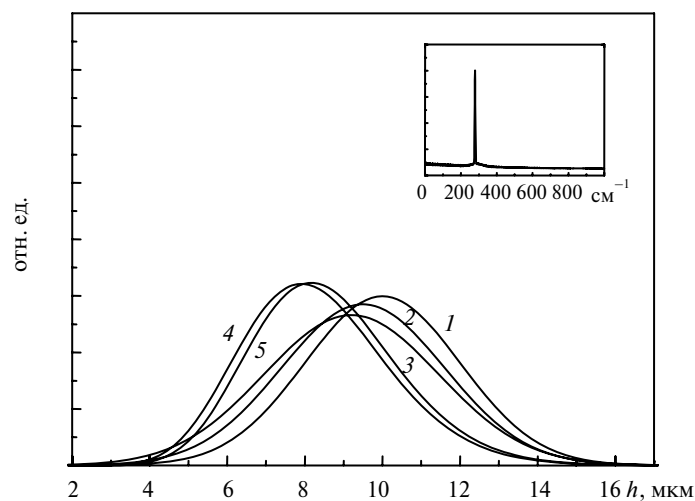


Рис. 5. Распределение зерен алмаза по высоте выступания над связкой при различных усилиях прижима для композита, не обладающего адаптивными свойствами (смола синтезирована по схеме (1): ненагруженный (1) и разгруженный (6) образцы; усилие прижима – 0,1 (2), 0,2 (3), 0,4 (4) МПа. На вкладке показан КР-спектр частиц наполнителя (карбоната кальция) в составе связки в окрестности алмазных зерен.

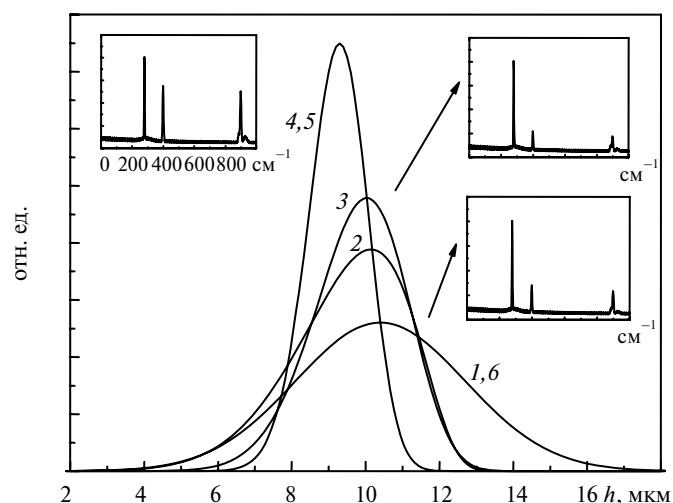


Рис. 6. Распределение зерен алмаза по высоте выступания над связкой при различных усилиях прижима для адаптивного композита (смола синтезирована по схеме (2): ненагруженный (1) и разгруженный (6) образцы; усилие прижима – 0,1 (2), 0,2 (3), 0,4 (4), 0,5 (5) МПа. На вкладках показаны КР-спектры частиц наполнителя (карбоната кальция) в составе связки в окрестности алмазных зерен.

Для образцов полимера на основе эпоксиакрилатной смолы, синтезированной по схеме (1), не зафиксировано никаких изменений состояния частиц наполнителя при различных усилиях нагружения. Единственная присутствующая в спектре узкая полоса  $280\text{ см}^{-1}$  относится к карбонату кальция. Параллельно с фиксацией химических превращений в слоях композита, прилегающих к поверхности зерен алмаза, степень выступания зерен над связкой оценивали с помощью бесконтактного профилометра (см. рис 5, 6).

Незначительное погружение зерен в связку в диапазоне усилий прижима до 0,2 МПа связано, по-видимому, с упругой деформацией связки. При уве-

личении нагрузки до 0,4 МПа наблюдается скачкообразное уменьшение высоты выступания зерен, не связанное с внедрением зерен в композит. Основным механизмом в этом случае следует считать скалывание наиболее выступающих вершин. Подтверждением этому служит практическое отсутствие изменения выступания зерен после разгрузки образца (рис. 7). Смещение зерен в нормальном направлении остается в пределах упругой реакции связки.

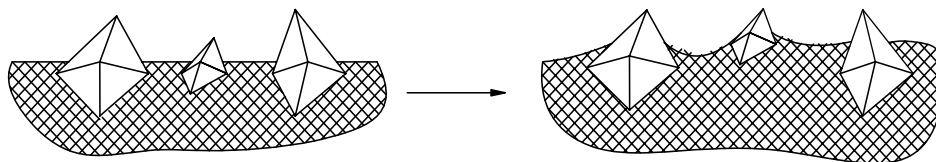


Рис. 7. Схема микросмещений зерен вследствие адаптивных изменений свойств связки.

Другое поведение демонстрируют частицы наполнителя в составе композита на основе смолы, синтезированной по схеме (2). В окрестности алмазных зерен на поверхности ненагруженного образца помимо полосы, связанной с карбонатом кальция, присутствует единичная полоса  $\sim 370 \text{ см}^{-1}$ , связанная с декарбонизированными (возможно, отчасти связанными с гидроксильными группами) атомами кальция в поверхностном слое карбоната. Кроме того, на спектре присутствует дублет в области  $900 \text{ см}^{-1}$ , обусловленный продуктами взаимодействия карбоната кальция с карбоксильными группами полимера.

При нагружении образца в пределах 0,1 МПа характер связи частиц наполнителя с полимером не претерпевает сколько-нибудь заметных изменений. Некоторое уменьшение выступания зерен можно объяснить упругой деформацией связки. Начиная с усилия 0,2 МПа, зафиксировано уменьшение интенсивности полос  $\sim 370$  и  $900 \text{ см}^{-1}$ , связанных с гидратированной и карбоксилированной формой фрагментов  $\text{O-Ca-O}$  на поверхности частиц карбоната в окрестности некоторых зерен алмаза, в то время как для окрестности других зерен она остается неизменной. Полная синхронность такого уменьшения свидетельствует, что оно происходит в рамках единого процесса. Это вполне коррелирует с предположением авторов, что в окрестности наиболее выступающих, и, следовательно, наиболее нагруженных зерен, происходит обратимый разрыв части связей, обусловленных адсорбционным взаимодействием полимера с поверхностью частиц наполнителя. При этом деформируемость связки значительно возрастает. Наиболее нагруженные зерна погружаются в нее без нарушения сплошности границ раздела (см. рис. 6).

При достижении усилия прижима 0,4 МПа, напротив, зафиксировано значительное усиление взаимодействия частиц карбоната кальция с полимером в окрестности нагруженных зерен алмаза, что проявляется в росте интенсивности соответствующих линий спектра КР. При этом характер локально зафиксированных спектров становится идентичным для окрестностей всех зерен. Это подтверждает постулированную авторами стадию адаптивного поведения связки, при которой резко увеличивается количество зерен с одинаковой степенью внедрения в обрабатываемый материал. В статическом случае, когда контакт происходит исключительно через осевой прижим, это означает распределение нагрузки на максимальное количество зерен. Схематическое изображение этой стадии приведено на рис. 7.

Нагрузка на каждое отдельное зерно оказывается в этом случае в том диапазоне, который способствует существенному увеличению плотности ад-

сорбционных связей на границе полимера и частиц наполнителя. При этом степень деформирования связки, прилегающей к алмазным зернам, значительно уменьшается. Об этом свидетельствует неизменность спектра КР для окрестностей зерен, а также распределения зерен по высоте выступления над связкой при увеличении усилия прижима с 0,4 до 0,5 МПа (см. рис. 6)

При разгрузке образца композита, обладающего адаптивными свойствами, происходит возврат формы спектра КР для окрестностей зерен (как и формы распределения зерен по высоте) в исходное состояние (см. рис. 6, кривая б). Это прямо подтверждает вывод об адаптивном поведении ансамбля зерен в полученной связке, основанном на обратимом изменении хемосорбционного взаимодействия ее полимерной составляющей с частицами наполнителя. Безусловно, представляла бы интерес оценка абсолютных значений усилий для отдельных зерен, вызывающих адаптивные изменения прилегающих слоев связки. Что касается связки как таковой, не наполненной зернами алмаза, то для нее адаптивный структурный переход связан с обратимым изменением модуля упругости в 2,5–3 раза. Однако следует отметить, что такая количественная оценка для отдельного зерна мало что может добавить к качественной интерпретации механизма адаптивного поведения алмазосодержащего композита, а это было одной из задач авторов в данной работе.

Такая качественная интерпретация, с учетом приведенных выше данных, может заключаться в следующем. Нагрузка, передаваемая наиболее выступающими абразивными зернами в удерживающий их микрообъем связки, приводит к структурным изменениям на границе раздела отвержденной эпоксиакрилатной смолы и частиц наполнителя. Повышение нагрузки приводит к частичным разрывам химических связей между функциональными группами смолы и радикальными активными центрами поверхности частиц карбоната кальция. Группа наиболее выступающих зерен, не скалываясь, погружается в связку на большую глубину. При этом количество зерен, составляющих базу контакта, увеличивается. Нагрузка, передаваемая зерном на удерживающий ее микрообъем связки, падает ниже критического уровня и дальнейшее погружение зерен приостанавливается. В этом случае усилие на каждом отдельном зерне оказывается значительно меньшим, чем в случае применения традиционного композита. При этом происходит равномерный износ массива режущих зерен не за счет макроскалывания наиболее выступающих, а при отделении микроскопических фрагментов от большего количества режущих кромок. Разница между выступанием зерен над поверхностью инструмента и глубиной их внедрения в обрабатываемый материал остается стабильной на протяжении всего рабочего цикла. При оптимальном составе связки эта разница достаточно велика для надежного предотвращения схватывания и повреждения обрабатываемой поверхности.

О полном предотвращении схватывания поверхности титана с инструментальным композитом в процессе шлифования свидетельствует отсутствие на ней соответствующих повреждений, что прослеживается вплоть до финишной стадии обработки с достижением шероховатости  $Ra = 0,05$  мкм.

Инструменты (притиры) на основе разработанного композита (рис. 8) испытаны при обработке сферических изделий из титана марки ВТ1-0 в лабораторных условиях ИСМ НАН Украины. В инструменте применены синтетические алмазы марки АС20 при относительной концентрации 100. Испытания производили на станке 1К62 при обработке шаров  $\varnothing 28$  мм. В качестве смазки использовали масло “Индустриальное-20”.



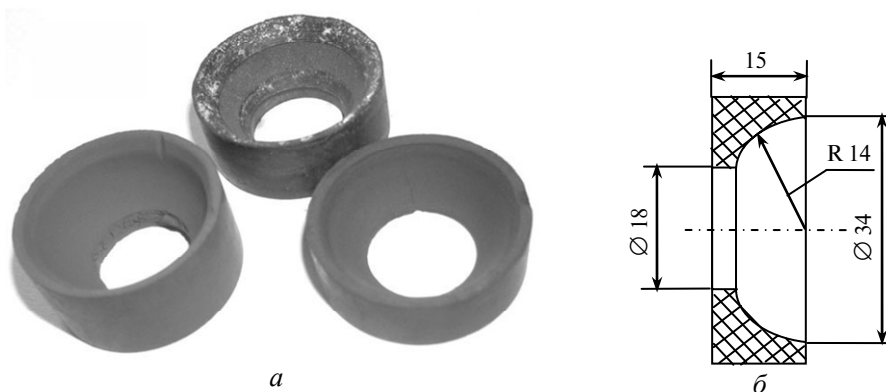


Рис. 8. Притиры для алмазно-абразивной обработки титановой заготовки: фотоснимок (а) и чертеж (б) инструментов.

Экспериментально установлено, что увеличение (более 90 м/мин) скорости относительного перемещения инструмента и заготовки приводит к повышению температуры в зоне обработки. Причиной является низкая (21,9 Вт/(м·К)) теплопроводность титана, что может быть причиной образования задиров и неисправимого брака.

Стабильная, без схватывания, работа инструмента на основе описанного выше композита имеет место при частоте вращения заготовки  $n \approx 1000$  об/мин. Как показали результаты экспериментальных исследований, наибольшая скорость относительного перемещения инструмента и заготовки составляет  $\sim 90$  м/мин.

На рис. 9 приведена зависимость интенсивности съема материала заготовки от силы прижима инструмента при различной зернистости алмазов.

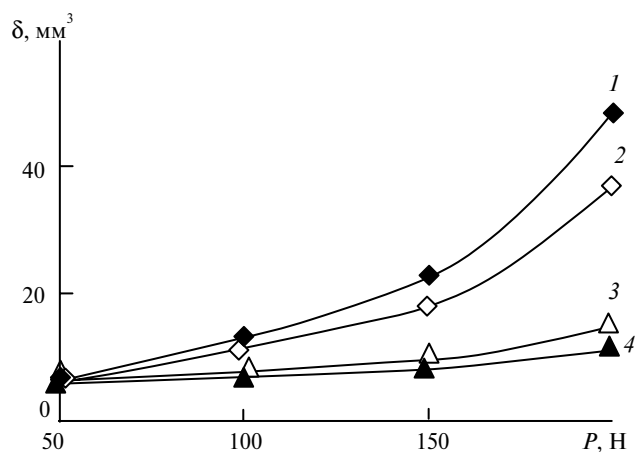


Рис. 9. Зависимость интенсивности съема материала от силы прижима инструмента к заготовке при различной зернистости синтетических алмазов в инструменте: 200/160 (1), 125/100 (2), 63/50 (3), 50/40 (4).

Видно, что наиболее интенсивный съем обеспечивает инструмент, содержащий алмазы зернистостью 200/160. Его задачей является устранение погрешностей формы заготовки после токарной обработки. Практика показала,

что за 3 мин обработки при использовании этого инструмента отклонение от сферичности заготовки снижается от 0,1 до 0,01 мм.

Экспериментально установлено, что необходимым условием полирования и получения шероховатости рабочей поверхности готового изделия  $Ra = 0,05$  мкм (в соответствии с ГОСТ Р ИСО 7206-2-2005) является значение шероховатости поверхности  $Ra = 0,25$  мкм после предварительных операций прецизионной обработки. Это может быть достигнуто применением алмазов меньшей зернистости в инструменте.

Шероховатость поверхности  $Ra$  измеряли на приборе Микрон-альфа [13], разработанном в Национальном авиационном университете (г. Киев). Прибор создан на базе серийного интерферометра МИИ-4 с использованием новой электронно-механической системы управления, цифровой видеосистемы и программного обеспечения. Он позволяет строить двух- и трехмерное изображение рельефа сферической поверхности, получать его количественные характеристики.

На рис. 10 приведены значения шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности сферы в зависимости от зернистости синтетических алмазов в абразивном композите инструмента.

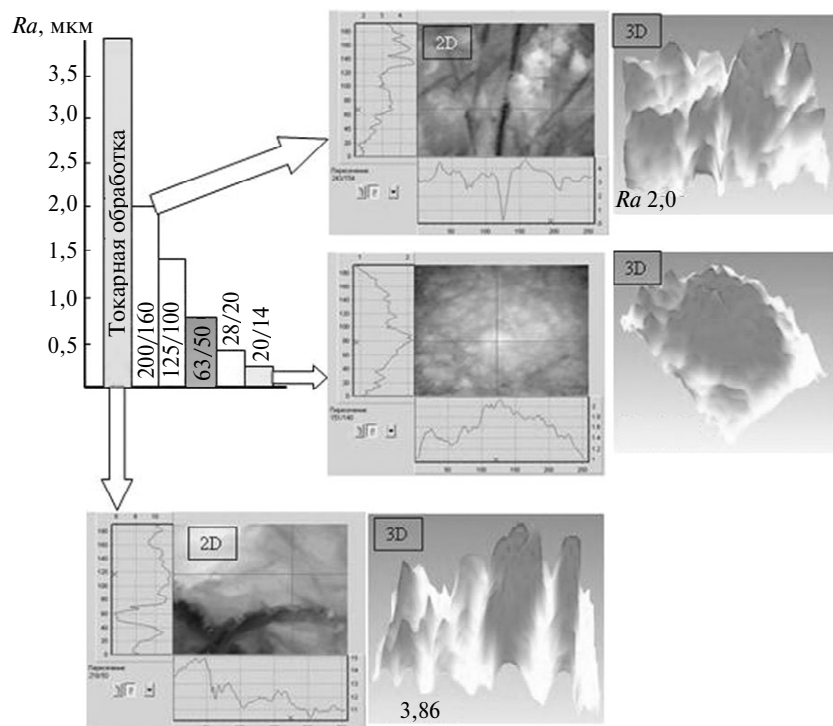


Рис. 10. Зависимость шероховатости поверхности детали от зернистости синтетических алмазов в инструменте.

Очевидно, что для получения шероховатости  $Ra = 0,25$  мкм необходимо применить инструмент из синтетических алмазов зернистостью 20/14 мкм.

Исследования, выполненные в ИСМ НАН Украины на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO 50XVP методом электронной микроскопии, шаржирования обработанной поверхности не выявили\*.

\* Работы проведены д-ром физ.-мат. наук В. Н. Ткачом.

Чистовую обработку титановых головок для получения шероховатости поверхности  $Ra = 0,05$  мкм необходимо производить полировальными пастами и тканевыми кругами.

## ВЫВОДЫ

Абразивные композиты на основе модифицированных эпоксидных смол и синтетических алмазов, представляющие собой трехуровневые адаптивные системы, позволяют производить обработку технически чистого титана по схеме свободного притирания без схватывания и шаржирования обрабатываемой поверхности, обеспечивая шероховатость до  $Ra = 0,25$  мкм и точность до 0,008 мм (в соответствии с ГОСТ Р ИСО 7206-2–2005).

С использованием инструментов на основе указанных композитов создана эффективная технология механической обработки головок эндопротеза тазобедренного сустава из технически чистого титана.

*Розроблено абразивні композити на основі модифікованих епоксидних смол і синтетичних алмазів, що представляють собою тривірвеві адаптивні системи, які дозволяють проводити обробку технічно чистого титану без схоплювання. Інструмент, що містив дані композити, дозволив створити ефективну технологію виготовлення головок ендопротезів кульшового суглоба з технічно чистого титану.*

**Ключові слова:** головка ендопротеза кульшового суглоба, абразивні композити, технічно чистий титан.

*Abrasive composites based on modified epoxy resins and synthetic diamonds, which are three-level adaptive systems that make it possible to machine technically pure titanium without seizure, have been developed. The tools containing these composites have allowed us to elaborate an efficient technology of manufacturing heads of hip joints from technically pure titanium.*

**Keywords:** head of hip joint, abrasive composites, technically pure titanium.

1. Пинчук Л. С., Николаев В. И., Цветкова Е. А. Эндопротезирование суставов: технические и медико-биологические аспекты. – Гомель: ИММС НАНБ, 2003. – 300 с.
2. Филиппенко В. А., Танькут А. В. Эволюция проблемы эндопротезирования суставов // Международный медицинский журнал. – 2009. – № 1. – С. 70–74.
3. Charnley J. Arthroplasty of the hip. A new operation // Lancet. – 1961. – 277, N 7187. – P. 1129–1133.
4. Сиваш К. М. Исследование о создании нового способа артропластики тазобедренного сустава // Материалы конф. специалистов по костно-суставному туберкулезу Москвы и Москов. обл. – М., 1956. – С. 16–52.
5. McKee G. K., Watson-Farrar J. Replacement of arthritic hips by the McKee-Farrar prosthesis // J. Bone Joint Surg. Br. – 1966. – 48-B. – P. 245–259.
6. Иголкин А. И. Титан в медицине // Титан (научно-технический журнал). – 1993. – № 1. – С. 86–90.
7. Белый А. В., Кукареко В. А., Кононов А. Г. и др. Структура и триботехнические свойства субмикрористаллического титана, модифицированного ионами азота // Трение и износ. – 2008. – 29, № 6. – С. 571–577.
8. Федірко В. М., Погрелюк І. М. Азотування титану та його сплавів. – Київ: Наук. думка, 1995. – 220 с.
9. Чечулин Б. В., Ушков С. С., Разуваева И. Н., Гольдфайн В. Н. Титановые сплавы в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
10. Пат. 61729 А Україна, 7В24В11/10. Спосіб обробки сферичних поверхонь та пристрій для його реалізації / М. В. Новіков, О. О. Розенберг, С. В. Сохань. – Заявл. 09.04.2003; Опубл. 17.11.03, Бюл. № 11.
11. Пат. 2136481 РФ, В24D3/34, С08J5/14. Масса для изготовления абразивного инструмента / А. Н. Порада, Л. А. Волович, О. Л. Кисельгоф, И. П. Козыряцкий. – Заявл. 02.03.98; Опубл. 10.09.99.

12. Пат. 2104857 РФ, В24D3/22. Композиция для абразивного инструмента и способ ее изготовления / М. Д. Демченко, Н. Н. Парфенов, В. П. Безрукова и др. – Заявл. 07.08.95; Опубл. 20.02.98.
13. *Игнатович С. Р., Закиев И. М.* Контроль качества поверхности с использованием интерференционного профилометра // Винахідник і раціоналізатор. – 2007. – № 6. – С. 8–11.

Ин-т сверхтвердых материалов  
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 15.05.12