

Улучшение эксплуатационных характеристик имплантатов тазобедренных суставов человека путем повышения качества обработки и геометрической точности их сферических поверхностей

Р. С. Турманидзе¹ • Г. З. Попхадзе¹ • К. С. Инашаридзе²

Received: 12 September 2020 / Accepted: 24 November 2020

Аннотация. Ввиду того, что головки эндопротезов тазобедренного сустава человека эксплуатируются в экстремальных условиях по нагрузке, выбор соответствующего материала, а также повышение точности и качества обработки сферических поверхностей является актуальной задачей.

В представленной работе рассмотрены вопросы, связанные с определением степени влияния ориентации кристалла сапфира на его обрабатываемость при алмазном шлифовании торцом кольца и разработкой перспективной, оригинальной схемы формирования неполной сферической поверхности, в частности, сапфировой головки эндопротеза тазобедренного сустава человека.

Ключевые слова: монокристалл сапфира, анизотропия, шлифуемость, эндопротезирование, прецизионное шлифование, формовка, сферическая поверхность.

Введение

В последнее тридцатилетие одной из актуальных направлений в области обработки материалов резанием является получение имплантатов из разных материалов для тазобедренных суставов с высокими эксплуатационными свойствами, которые обеспечат их применение более 30–40 лет. Это обусловлено тем, что головки указанных эндопротез, с точки зрения характера и величины нагрузки, эксплуатируются в экстремальных условиях. Поэтому в каждом конкретном случае подбор необходимого материала с соответствующими физико-механическими характеристиками, а также повышение точности и качества обработки самой значительной части эндопротеза – сферических поверхностей является весьма важной задачей, острота которой в последние годы интенсивно возрастает. Это

вызвано тем, что если раньше необходимость подобных операций в основном была вызвана возрастным фактором человека или травматологическими переломами, то в последнее двадцатилетие резко увеличилось количество больных в молодом возрасте, даже в 30–40 лет, как мужчин, так и женщин, без всяких травм и переломов [1–4].

По мнению медиков, основными причинами этого бедствия являются неактивный образ жизни молодежи, состав современных искусственных пищевых продуктов и нарушение обмена веществ, а также интенсивный рост разных переломов в результате транспортных и других аварий. Все вышеуказанные причины определяют количество используемых эндопротезов – несколько десятков миллионов штук в год и статистика показывает, что, к сожалению, это количество ежегодно увеличивается [2, 5, 6].

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Медицинская практика доказывает, что повторное протезирование тазобедренного сустава человека связано с большими проблемами. Во многих случаях осуществление таких операций становится практически невозможным. Поэтому срок службы эндопротеза

✉ Р. С. Турманидзе
inform@gtu.ge

¹ Грузинский Технический Университет, Тбилиси, Грузия

² Государственный университет имени Шота Руставели, Батуми, Грузия

тазобедренного сустава до конца жизни для больного, особенно после операций в молодом возрасте, имеет исключительно важное значение [1, 3–5, 7–10].

Этим обстоятельством объясняется тот факт, что в таких ведущих странах мира, как США, Германия, Англия, Япония, Франция и др., ведутся широкомасштабные научно-исследовательские работы по разработке оптимальных схем формообразования, характеристик абразивного инструмента для финишных операций и технологического процесса в целом, для изготовления сферических головок эндопротеза из разных материалов с минимальной погрешностью формы и с высокими показателями качества поверхности.

Кроме того, износостойкость вышеупомянутых материалов в большинстве случаев не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. А проведенные нами сравнительные эксперименты доказывают, что наиболее биосовместимым с человеческим организмом, износостойким и долговечным материалом для изготовления вышеупомянутого изделия является искусственный монокристалл сапфира [3, 7, 8, 10–12].

На сегодняшний день в мировой практике эти головки изготавливаются из различных сплавов, композиционных материалов и керамики, которые, в основном, являются изотропными материалами. Поэтому данные вышеупомянутых работ не дают необходимой информации по обработке анизотропных материалов, в частности, искусственного кристалла сапфира.

В связи с этим по линии Украинского научно-технологического центра был осуществлен международный проект, исполнителями которого являлись Грузинский технический университет (Тбилиси), Институт сверхтвердых материалов Национальной академии наук Украины (Киев) и Институт монокристаллов Национальной академии наук Украины (Харьков).

Участниками проекта были решены отдельные научные задачи, в частности: Грузинским техническим университетом исследовано влияние анизотропии кристалла сапфира на обрабатываемость и качество поверхности материала при шлифовании; разработаны перспективные, теоретические схемы формообразования неполной сферической поверхности с целью обеспечения повышения геометрической точности сферической части эндопротеза, что имеет принципиальное значение для повышения срока службы их эксплуатации за счет увеличения площади контактов между пар эндопротезов и соответственно уменьшения нагрузки на единицу площади их контактных поверхностей. Институтом сверхтвердых материалов была исследована связь коэффициента трения с кристаллографическими особенностями сапфира и режимами отжига; обрабатываемость материалов, обладающих анизотропией свойств, в частности сапфира, по традиционной технологии для оценки влияния анизотропии на точность формообразования сферической поверхности; разработаны рекомендации применительно к процессу алмазной доводки головок эндопротезов тазобедрен-

ного сустава из искусственного монокристалла сапфира. Харьковским институтом монокристаллов были исследованы оптимальные режимы выращивания, обеспечивающие максимальную очистку материала сапфира, в результате чего получен сапфир с кристаллографическом направлении имеющий минимальную анизотропию.

При этом изготовленные нами в рамках проекта опытные образцы имплантатов были использованы Харьковскими ортопедами при реальных операциях и наблюдение на них вместе с хирургами осуществляют Харьковские участники нашего проекта до сегодняшнего дня.

Цель и задачи исследования

Целью представленной работы являются: определение степени влияния ориентации кристалла сапфира на его обрабатываемость шлифованием способом низкотемпературного процесса шлифования (НПШ), созданным на кафедре «Технология машиностроения» Грузинского технического университета и разработка перспективной, оригинальной схемы формообразования неполной сферической поверхности, в частности, сапфировой головки эндопротеза тазобедренного сустава человека. Подробное описание метода низкотемпературного процесса шлифования (НПШ), кинематическая схема лабораторной установки и методика проведения экспериментов можно посмотреть в предыдущих публикациях [13–16].

Исследование влияния ориентации кристалла сапфира на обрабатываемость материала проводилось на образцах сапфира с ориентацией (0001), (1010) и (1012). Размеры образцов: $10 \times 10 \times 6$ мм и $\Phi 10 \times 6$ мм.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, оснащенной с специальной прецизионной головкой. Применялись алмазные круги зернистостью 14/10 и 28/20 на керамической, металлической и органической связках, формы 6А2.

Выходными параметрами процесса являлись: производительность обработки, линейный минутный съем материала – q , мкм/мин; высота неровностей шероховатости поверхности – R_z , мкм; относительная опорная длина профиля на уровне 03 – t_{p03} , %; подрельефный нарушенный слой – H , мкм.

Факторы процесса скорость резания – V , м/с; давление в зоне резания P , кПа и характеристики алмазного инструмента: зернистость – d_3 , мкм; связка концентрации – K , %.

Эксперименты проводились при следующих условиях: диапазон скорости резания – $V = 1 \dots 12$ м/с; давление в зоне резания – $P = 100 \dots 1500$ кПа. Охлаждающая жидкость – отфильтрованная проточная вода.

Такой методологический подход, при котором исследуется практически все возможные варианты ориентаций обрабатываемого материала – кристалла сапфира, алмазно-абразивные инструменты с разными эксплуатационными характеристиками по размерам

зернистости алмазных зерен и тип связи, а также разные режимы обработки и повторение каждого эксперимента минимум 8–10 раз обеспечивают высокую достоверность определения вышеуказанных выходных параметров и соответственно сформированных выводов.

По анализу данных проведенных нами комплексных, всесторонних экспериментальных исследований можно сделать следующее заключение:

Характер влияния факторов процесса на выходные параметры для выбранных ориентаций кристалла сапфира ((0001), (1010), (1012)) – постоянный [3, 6].

При прочих равных условиях обработки наиболее труднообрабатываемой является ориентация (0001). Для всех испытуемых алмазных кругов соотношение значений линейного съема материала – q находится в пределах

$$q_{0001} / q_{1010} = 0,25 \dots 0,5,$$

при этом,

$$q_{1012} / q_{1010} = 0,75 \dots 1.$$

В исследуемых диапазонах режимов резания V и P производительность обработки растет при $V = \dots 6$ м/с, а при $V > 6$ м/с – остается постоянной, также при $P = 100 \dots 1500$ кПа – растет, при $P > 1500$ кПа – остается практически постоянной.

Из характеристик алмазного инструмента на производительность превалирующим образом влияют зернистость и связка алмазного инструмента. Влияние концентрации незначительно. С увеличением размера зерна в пределах $d_3 = 14/10 \dots 28/20$, производительность растет в 1,5 ... 2,5 раза.

Максимальное значение производительности достигается инструментом на керамической связке – СК6 – 130 ... 300 мкм/мин, для всех выбранных ориентаций кристалла сапфира. При этом увеличивается соотношение

$$q_{0001} / q_{1010} = 0,4 \dots 0,5.$$

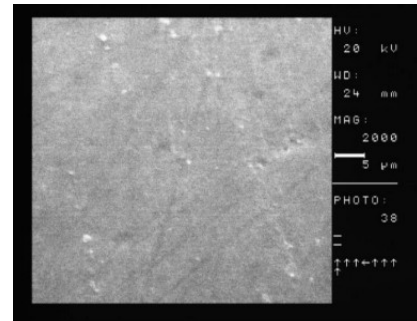
Инструмент на этой связке работает в режиме самозатачивания.

При прочих равных условиях обработки на ориентации (0001) достигается более высокое качество поверхности, чем на остальных двух. Разница в 1...1,5 классах шероховатости.

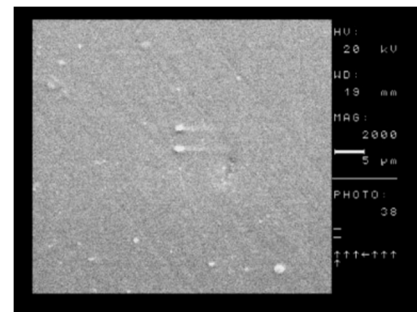
На качество поверхности превалирующим образом влияют зернистость и материал связки инструмента. С увеличением зерна, в исследуемом диапазоне, высота неровностей R_z растет в пределах 1...1,5 класса, а глубина нарушенного слоя H – в 1,5...2 раза.

По качеству обработанной поверхности наилучшие результаты дают алмазные круги на органических связках ВС-11 и органическая специальная, которая разработана нами и находится в процессе патентования. По сравнению с алмазными кругами на металлической и керамической связках, параметр R_z на порядок ниже ~ 0,25 мкм, параметр t_{p03} в 1,5 выше ~ 35...45% и параметр H в 3...5 меньше ~ 2...5 мкм.

Изучением морфологии обработанной поверхности доказана возможность резания материала сапфира пластическим деформированием снимаемого слоя на низких скоростях резания $V = 1 \dots 3$ м/с, с наименьшей глубиной нарушенного подрельефного слоя (рис.1).



a



б

Рис. 1. Микрофотографии поверхностей экспериментальных образцов сапфира, обработанные способом НПШ: *a* – Ориентация 1010, *б* – 1012. Алмазный круг – АСМ 14/10, связка органическая спец., 50 %. Режимы резания: $V = 1$ м/с, $P = 750$ кПа.

Этот результат достоин особого внимания, так как обработка стеклообразных материалов, в частности, кристалла сапфира, путем пластического деформирования снимаемого слоя – залог получения обработанной поверхности практически без наследственных дефектов – без нарушенного подрельефного слоя. Величина H оказалась наименьшей именно на этих образцах сапфира.

Разработка нового, или усовершенствование существующего технологического процесса механической обработки сапфировой головки ставит актуальную задачу создания новых, высокоэффективных схем формообразования. Критерии оптимизации технологических операций, такие как производительность, показатели качества поверхности и, что самое главное, точность обработки, сферической поверхности имплантатов. Как было показано выше в основном именно этот параметр определяет срок службы каждой пары имплантатов. Поэтому при оценке новых эффективных схем-способов формообразования в технологическом процессе или при сравнении с существующими преимущественно определяется этим параметром [5, 17].

Применяемые на сегодняшний день способы абразивной обработки неполной сферической поверхности изделий широкого назначения, как отдельные операции технологического процесса механической обработки неполной сферы, можно разделить на две группы: шлифование абразивными – алмазными кругами, доводка свободным абразивом.

Наш способ относится к первой группы, однако, как способ алмазно-абразивной обработки плоских поверхностей, в отличие от существующих способов, объединяет в себе положительные стороны способов вышеупомянутых двух групп, а именно: НПШ характеризуется высокой производительностью также при высокой точности обработки и качестве поверхности.

Для разработки теоретической схемы алмазной обработки сапфировых сфер с учетом кинематических и других положительных особенностей НПШ, были рассмотрены и проанализированы известные схемы формообразования неполной сферической поверхности.

Наиболее близким по кинематике к способу НПШ является способ шлифования неполной сферы торцом шлифовального круга с двойным вращением детали с угловыми скоростями ω_2 и ω_3 (рис. 2), который взят за основу разработки оригинального варианта теоретической схемы алмазной обработки сапфировых сфер с учетом кинематических и других положительных особенностей способа НПШ.

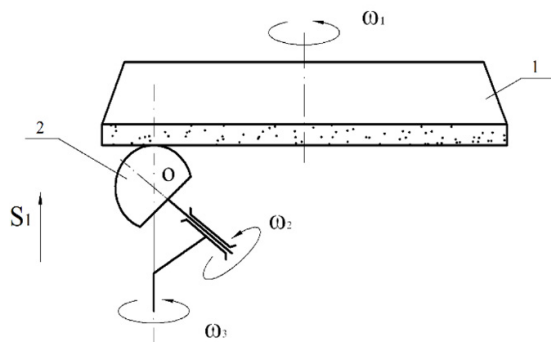


Рис. 2. Схема формообразования неполной сферической поверхности торцевым алмазным кругом с двойным вращением детали: 1 – алмазный шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь – неполная сфера

Нами были разработаны несколько вариантов теоретических схем формообразования неполной сферической поверхности. Один вариант оригинальной кинематической схемы формообразования неполной сферической поверхности сапфировой головки (рис. 3) торцевым шлифовальным кругом представлен на (рис. 4). Режущим инструментом служит специальный, комбинированный торцевой шлифовальный круг с двумя concentric алмазными слоями, с режущими поверхностями в виде внутреннего, в точке *A*, и внешнего, в точке *B*, отсеченных конусов.

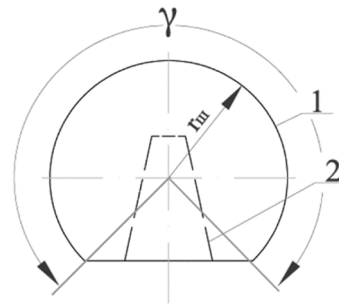


Рис. 3. Сапфировая головка: 1 – Сферическая поверхность; 2 – Конический держатель; $r_{ш}$ – радиус сферы; γ – угол сегмента сферической поверхности.

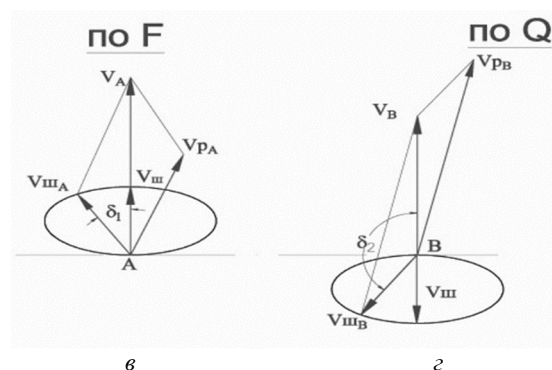
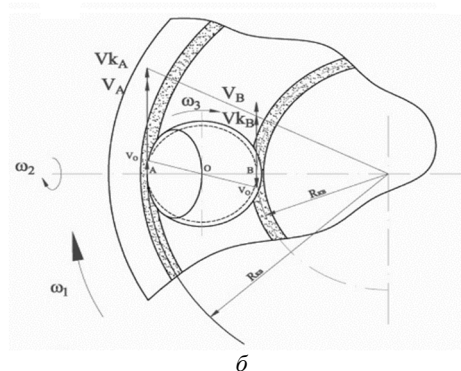
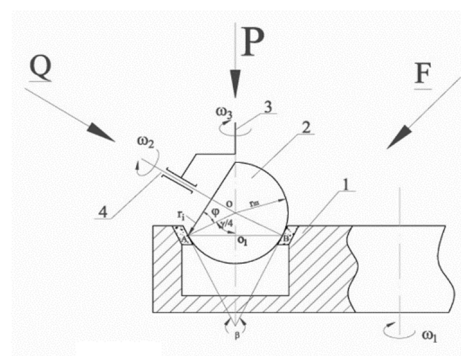


Рис. 4. Кинематическая схема формообразования неполной сферической поверхности торцевым шлифованием на основе способа НПШ: 1 – торцевой шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь – неполная сфера; 3 – ось вращения шпинделя детали; 4 – ось вращения детали

Шлифовальный круг совершает вращательное движение с угловой скоростью ω_1 . Обрабатываемая деталь – шар – совершает двойное вращательное движение с угловыми скоростями ω_2 вокруг собственной оси 4 и ω_3 вокруг оси 3, которая является осью шпинделя детали. Направление угловых скоростей ω_1 , ω_2 и ω_3 одинаковое. Обрабатываемая деталь 2 прижимается к режущей поверхности шлифовального круга в двух точках *A* и *B* подпружиненным усилием *P*. При этом режущие поверхности шлифовального круга в осевом сечении образуют угол β .

Отличительные признаки теоретической схемы от НПШ такие, как форма рабочей поверхности инструмента, дополнительное движение обрабатываемой детали – вращение шара вокруг собственной оси со скоростью ω_2 , форма контакта обрабатываемой поверхности детали с режущей поверхностью шлифовального круга.

Для создания равных условий обработки в двух точках *A* и *B*, необходимо соблюдать равенство как скоростей, так и усилий резания.

Равенство условий обработки по скорости резания означает равенство максимальных значений скоростей резания и идентичность их законов изменения в цикле в двух зонах резания.

Скорости резания при шлифовании неполной сферы по предложенной схеме в точках *A* и *B* показаны на рис.4 б, з, и д.

Результирующая скорость резания v_{PA} - в точке *A*

$$\vec{v}_{PA} = \vec{v}_B - \vec{v}_{ШВ} \quad (1)$$

$$v_{PA} = \sqrt{v_A^2 + v_{шA}^2 - 2v_A \cdot v_{шA} \cdot \cos \delta_1} \quad (2)$$

где $v_A = v_{KA} - v_0 = R_{KA} \cdot \omega_1 - r_{ш} \sin \frac{\gamma}{4} \cdot \omega_3$ (3)

и $v_{шA} = r_{iA} \cdot \omega_2$ (4)

Аналогично, в точке *B* результирующая скорость резания равна

$$\vec{v}_{PB} = \vec{v}_B - \vec{v}_{ШВ}, \quad (5)$$

$$v_{PB} = \sqrt{v_B^2 + v_{шB}^2 - 2v_B \cdot v_{шB} \cdot \cos \delta_2} \quad (6)$$

где $v_B = v_{KB} - v_0 = (R_{KA} - 2r_{ш} \cdot \sin \frac{\gamma}{4}) \cdot \omega_1 + r_{ш} \cdot \sin \frac{\gamma}{4} \cdot \omega_3$ (7)

и $v_{шB} = r_{iB} \cdot \omega_2$ (8)

Линейная скорость детали от вращательного движения с угловой скоростью ω_2

$$v_{Ши} = r_i \cdot \omega_2 = \omega_2 r_{ш} \cdot \cos \phi = \omega_2 \cdot r_{ш} \sqrt{\sin^2 \frac{\gamma}{4} \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{4} \cdot \sin^2 \frac{\gamma}{2} (1 + \sin \alpha)^2}, \quad (9)$$

где ϕ – угол наклона оси 4 относительно образующей рабочей поверхности круга в осевом сечении, α – угол поворота оси 4 относительно оси 3 с угловой скоростью ω_3 .

Текущий радиус r_i точки поверхности детали, при повороте оси 4 вокруг оси 3 на 180° , меняется в пределах $0 \leq r_i \leq r_{ш}$. Таким образом, для полного описания сферической поверхности в течение одного цикла достаточен один оборот детали вокруг оси 4, при повороте оси 4 относительно оси 3 на половину оборота, т.е. на 180° . Следовательно, в этих условиях обрабатываемая сферическая поверхность детали в течение одного цикла описывается дважды. По одному разу в каждой зоне обработки.

Исходя из вышесказанного, между угловыми скоростями ω_2 и ω_3 имеем зависимость

$$\omega_2 = 2 \omega_3. \quad (10)$$

v_{PA} достигает максимума при $\alpha = \pi \frac{3}{2}$, и, следовательно, $\delta_1 = \frac{\pi}{2}$.

$$v_{PAmax} = v_A = R_{KA} \cdot \omega_1 - r_{ш} \cdot \sin \frac{\gamma}{4} \omega_3 \quad (11)$$

v_{PB} достигает максимума при $\alpha = \frac{\pi}{2}$, и, следовательно, $\delta_2 = \pi$.

$$v_{PBmax} = R_{KA} \cdot \omega_1 - 2r_{ш} \sin \frac{\gamma}{4} \omega_1 + r_{ш} \cdot \sin \frac{\gamma}{4} \cdot \omega_3 + r_{ш} \sin \frac{\gamma}{2} \omega_2. \quad (12)$$

При условии $v_{PAmax} = v_{PBmax}$, по выражениям (10), (11) и (12) определяется отношение угловых скоростей ω_3 и ω_1

$$\frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{1}{1 + 2 \cos \frac{\gamma}{4}}. \quad (13)$$

Таким образом, по предложенной схеме формообразования неполной сферической поверхности для достижения равенства условий обработки по скорости резания надо соблюдать отношения угловых скоростей ω_1 , ω_2 и ω_3 , по выражениям (10) и (13).

Равенство условий в двух точках по усилию прижима достигается расположением обрабатываемой детали по отношению шлифовального круга. Подпружиненное усилие *P* проходит через центр *O* сферы и совпадает с биссектрисой угла β и таким образом проходит на равных расстояниях от двух *A* и *B* зон обработки. В каждой зоне создаются равные усилия по *P/2*,

которые в свою очередь слагаются из двух составляющих, нормальную P_N и тангенциальную P_τ (на рисунке не показаны). При этом:

$$P_N = \frac{P}{2} \cdot \cos \frac{\gamma}{4}, \quad P_\tau = \frac{P}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{4}.$$

Кинематическое сходство новой схемы формообразования со способом НПШ, учитывая сохранение физики процесса резания при НПШ, который и определил его название «Низкотемпературное» (низкая по сравнению с обычным шлифованием скорость резания – 1,6 м/с и как следствие низкая температура в контакте – 100 °С), также «Прецизионное» (высокая точность формы рабочей поверхности инструмента достигается при правке и поддерживается в работе кинематикой процесса, чем и обеспечивается высокая точность обработки – плоскопараллельность на пластине 10×10 мм ≤ 1 мкм), позволяет предложенную схему формообразования, как исходящую из первого, назвать Низкотемпературным прецизионным шлифованием неполной сферы, в сокращении – НПШНС, который находится в процессе патентования.

Предполагается, что способ НПШНС, по сравнению с традиционными методами алмазного шлифования, которые применяются на сегодняшний день в технологическом процессе механической обработки сапфировой головки, при прочих равных условиях, позволит: значительно (не менее чем в два раза) повысить производительность обработки, не ухудшая показатели качества поверхности и точность формы изделия; значительно повысить качество обработанной поверхности и точность формы изделия, не увеличивая производительность обработки, тем самым также значительно уменьшить операционный припуск, в итоге время и себестоимость обработки на финишных операциях (переходах).

Таким образом, на наш взгляд, способ НПШНС может быть вполне конкурентоспособным на предварительных операциях, вплоть до финишной обработки, в технологическом процессе механической обработки сапфировой головки.

По долгосрочной программе предусмотрена организация европроекта с созданием необходимого оборудования, инструментов, технологической оснастки и всего технологического процесса изготовления высокоточных сферических поверхностей из разных хрупких материалов повышенной прочности, в том числе и из сапфира.

References

- [1] K.-J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2nd ed., Watertown, MA, 2016.
- [2] N.G. Afendikova, "Istoriya metoda Galerkina i ego rol' v tvorchestve M.V. Keldysha", *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha*, no. 77, pp. 3–17, 2014. <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-77>
- [3] S.P. Demidov, *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity], Vyssha shkola, Moscow, Russia, 1979.
- [4] C.A.J. Fletcher, *Computational Galerkin methods*, New-York, USA: Springer-Verlag, 1984.

Выводы

В результате исследования влияния кристаллографической ориентации монокристалла сапфира на интенсивность съема обрабатываемого материала, а также состояния подповерхностного слоя при доводке поверхностей методом низкотемпературного плоского шлифования установлено, что:

1. Обрабатываемость монокристалла сапфира значительно зависит от кристаллографической ориентации. Относительные величины съема материала при образцах с разными кристаллографическими ориентациями (1010) находятся в пределах $q_{0001}/q_{1010} = 0.25 \dots 0.5$, и $q_{1012}/q_{1010} = 0.75 \dots 1$. При других равных условиях процесса НПШ высшее качество шлифованной поверхности достигается для кристаллографической ориентации (1010). Разница с двумя остальными ориентациями кристаллографической плоскости находится в пределах 1...1.5 класса шероховатости.

2. Изучением морфологии обработанной поверхности доказана возможность резания материала сапфира пластическим деформированием снимаемого слоя без образования трещин при низкой скорости резания. При таких условиях механической обработки была обнаружена наименьшая глубина поврежденного подповерхностного слоя.

3. Предложены новые кинематические схемы обработки неполных сферических поверхностей, обеспечивающие более высокую геометрическую точность деталей из разных материалов, в частности сферических головок эндопротеза тазобедренного сустава человека.

Благодарность

1. Выражаем огромную благодарность нашим коллегам из разной организации Украины и сотрудником Грузинского Технического Университета, которые, в разное время принимали участие в отдельных частях работы.

2. Работа поддержана Национальным научным фондом им. Шота Руставели (SRNSF) [PHDF-19-2224, Повышение эффективности мехатронных систем для обеспечения реформы «Индустрии-4.0»].

- [5] S.P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*, 2nd ed., New–York, USA: McGraw-Hill Inc., 1959.
- [6] I. Elishakoff *et al.*, “Rigorous versus naïve implementation of the Galerkin method for stepped beam”, *Acta Mechanica*, vol. 230, pp. 3861–3873, 2019. doi:<https://doi.org/10.1007/s00707-019-02393-z>
- [7] G.B. Warburton, “The vibration of rectangular plates”, *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, vol. 168, pp. 371–384, 1954. doi:https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1954_168_040_02
- [8] P. Moreno-García, J.V. Araújo dos Santos, and H. Lopes, “A review and study on Ritz method admissible functions with emphasis on buckling and free vibration of isotropic and anisotropic beams and plates”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 25, pp. 785–815, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9214-7>
- [9] U. Lee, *Spectral element method in structural dynamics*, John Wiley and Sons (Asia), Singapore, 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470823767>
- [10] J.T.-S. Wang and C.-C. Lin, “Dynamic analysis of generally supported beams using Fourier series”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 196, no. 3, pp. 285–293, 1996. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0484>
- [11] S. Zhang, L. Xu, and R. Li, “New exact series solutions for transverse vibration of rotationally-restrained orthotropic plates”, *Applied Mathematical Modeling*, vol. 65, pp. 348–360, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.08.033>

Усунення експлуатаційних характеристик імплантатів тазобедренних сугавів людини шляхом підвищення якості обробки та геометричної точності їх сферичних поверхонь

Р. С. Турманідзе, Г. З. Попхадзе, К. С. Інашарідзе

Анотація. З огляду на той факт, що головки ендопротезування тазостегнового суглоба людини експлуатуються в екстремальних умовах щодо навантаження, підбору відповідного матеріалу, а також підвищення точності та якості обробки сферичних поверхонь є досить актуальним завданням.

У представленій роботі розглядаються проблеми, пов'язані з визначенням ступеня впливу орієнтації кристала сапфіра на його працездатність при алмазному шліфуванні торцем кільця та розробка перспективи, оригінальна схема формування неповної сферичної поверхні, зокрема, сапфірової головки ендопротезування тазостегнового суглоба людини.

Ключові слова: монокристалічний сапфір, анізотропія, шліфувальність, ендопротезування, точне шліфування, формування, сферична поверхня.

Improving the performance of human hip implants by improving the quality of processing and geometric accuracy of their spherical surfaces

Raul Turmanidze, G. Popkhadze, K. Inasharidze

Abstract. In view of the fact that the endo-prosthesis heads of human hip-joint are operated in extreme conditions, in respect of load, the selection of corresponding material and also increase of precision and quality of machining of spherical surfaces is rather topical task.

In the submitted work are reviewed the problems connected with definition of the influence degree of orientation of the sapphire crystal on its workability during diamond grinding with a butt of the ring and elaboration of the perspective, original scheme of formation of the incomplete spherical surface, particularly, of the sapphire head of endo-prosthesis of the human hip-joint.

Keywords: single crystal sapphire, anisotropy, grindability, endoprosthesis, precision grinding, forming, spherical surface.