

УДК 621.923.91

¹ Р. С. Турманидзе, д.т.н., проф., ¹ Г. З. Попхадзе, докторант,² К. С. Инашаридзе, ассистент проф.¹ Грузинский Технический Университет, Тбилиси, Грузия.² Государственный университет имени Шота Руставели, Батуми, Грузия.

Тел: + (995) 577423709; E-mail: inform@gtu.ge

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПЛАНТОВ ТАЗОБЕДРЕННЫХ СУСТАВОВ ЧЕЛОВЕКА ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ИХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В связи с тем, 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 весьма 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.

R. S. Turmanidze, G. Z. Pophadze, N. S. Inasharidze

IMPROVEMENT OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF IMPLANTS HUMAN HIP JOINTS BY INCREASING PROCESSING QUALITY AND GEOMETRIC ACCURACY SPHERICAL SURFACES

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.

1. Введение

В последнее тридцатилетие одной из актуальных направлений в области обработки материалов резанием является получение имплантов 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. 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.

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 тазобедренного сустава до конца жизни для больного, особенно после операций в молодом возрасте, имеет исключительно важное значение.

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.

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.

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.

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 тазобедренного сустава из искусствен-

ного 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.

Целью представленной работы являются: определение степени влияния ориентации кристалла сапфира на его обрабатываемость шлифованием способом 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[1,2,3,4].

Исследования влияния ориентации кристалла сапфира на обрабатываемость материала проводились на образцах сапфира с ориентацией (0001), (1010) и (1012). Размеры образцов: 10x10x6 мм и Φ 10x6 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 – $V=1...12$ м/с; давление в зоне резания – $P=100...1500$ кПа. Охлаждающая жидкость – отфильтрованная проточная вода.

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.

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

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

при этом,

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

В исследуемых диапазонах режимов резания V и P производительность обработки растет при $V=...6$ м/с, а при $V > 6$ м/с – остается постоянной, также при $P = 100...1500$ 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 $d_3=14/10...28/20$, 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.

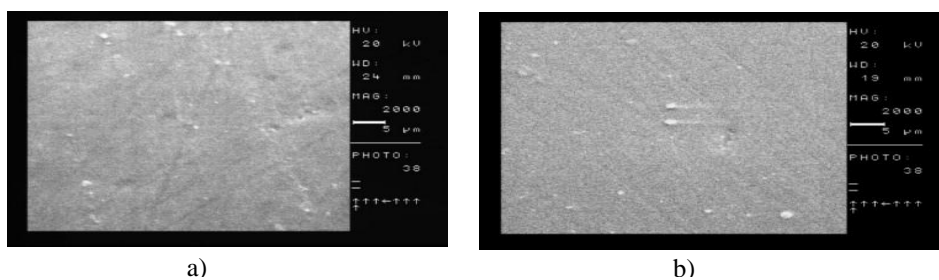


Рисунок 1. Микрофотографии поверхностей экспериментальных образцов сапфира, обработанные способом НПШ:

а – Ориентация 1010, б – 1012. Алмазный круг – АСМ 14/10, связка органическая спец., 50 %. Режимы резания: $V=1$ м/с, $P=750$ кПа.

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

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 точность обработки, определяют место новых схем-способов формообразования в технологическом процессе с учетом их преимуществ.

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.

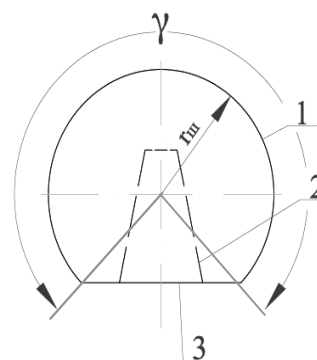
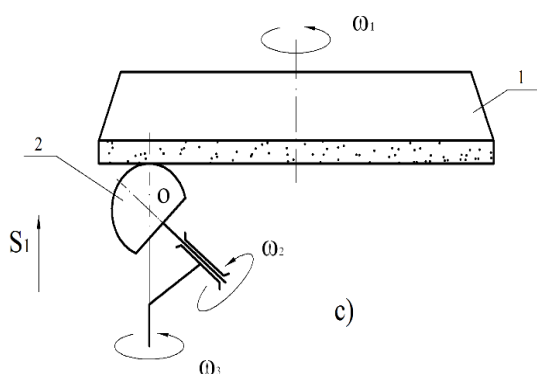


Рисунок 2. Схема формообразования неполной сферической поверхности торцевым алмазным кругом с двойным вращением детали:
1 – алмазный шлифовальный круг;
2 – обрабатываемая деталь – неполная сфера.

Рисунок 3. Сапфировая сферическая головка:
 $r_{ш}$ – радиус сферы;
 γ – угол сегмента сферической поверхности.

Нами были разработаны несколько вариантов [5, 6] теоретических схем формообразования неполной сферической поверхности. Один вариант оригинальной кинематической схемы формообразования неполной сферической поверхности сапфировой головки (рис. 3) торцовым шлифовальным кругом представлен на (рис. 4). Режущим инструментом служит специальный, комбинированный торцовый шлифовальный круг с двумя концентричными алмазоносными слоями, с режущими поверхностями в виде внутреннего, в точке А, и наружного, в точке В, отсеченных конусов.

Нами были разработаны несколько вариантов теоретических схем формообразования неполной сферической поверхности. Один вариант оригинальной кинематической схемы формообразования неполной сферической поверхности сапфировой головки (рис. 3) торцовым шлифовальным кругом представлен на рис. 4. Режущим инстру-

ментом служит специальный, комбинированный торцовый шлифовальный круг с двумя концентрическими алмазонасными слоями, с режущими поверхностями в виде внутреннего в точке А, и наружного, в точке В, отсеченных конусов.

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 А и В подпружиненным усилием Р. 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 А и В, необходимо соблюдать равенство как скоростей, так и усилий резания.

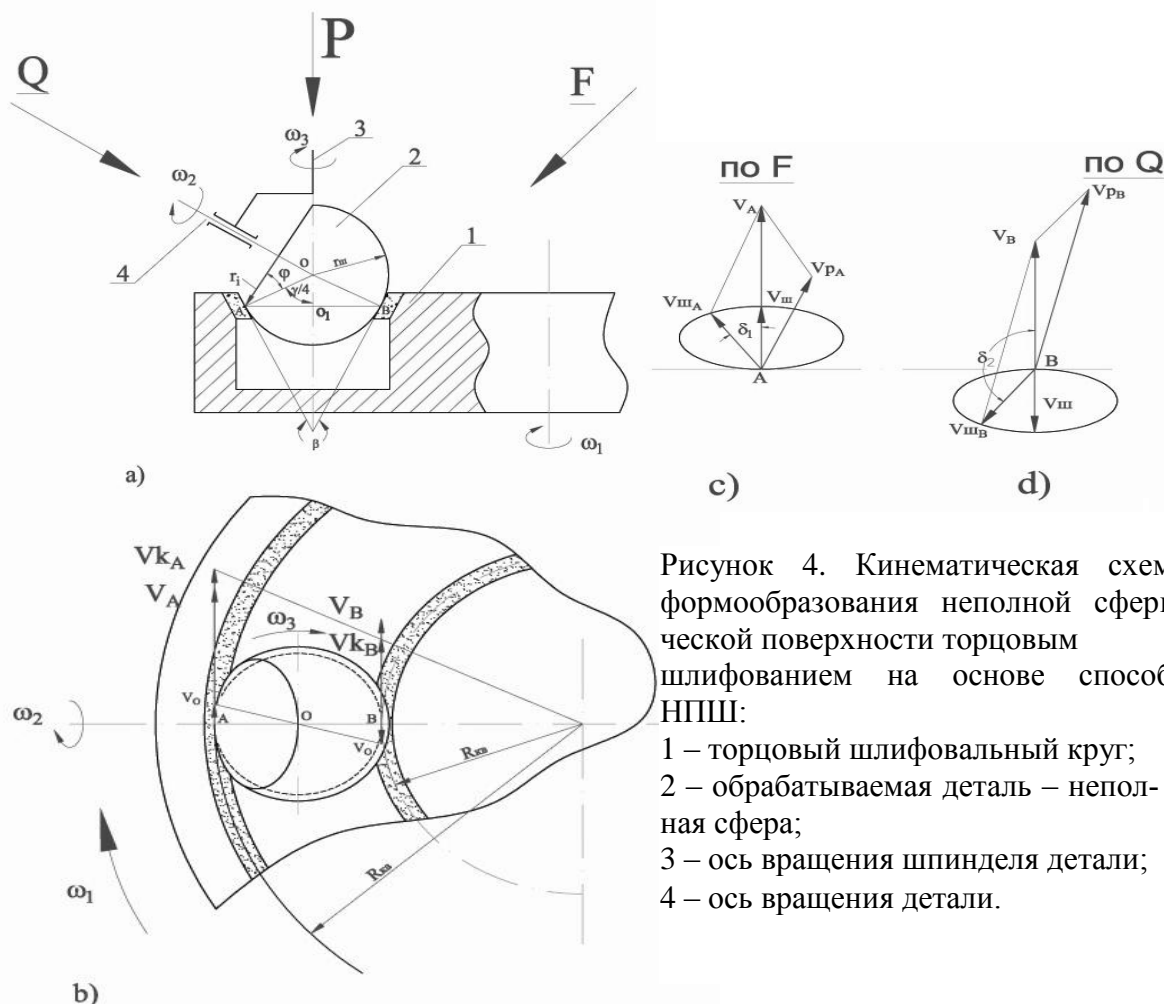


Рисунок 4. Кинематическая схема формообразования неполной сферической поверхности торцовым шлифованием на основе способа НПШ:

- 1 – торцовый шлифовальный круг;
- 2 – обрабатываемая деталь – неполная сфера;
- 3 – ось вращения шпинделя детали;
- 4 – ось вращения детали.

Скорость 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 А и В даются на фиг.4 в, с, и d.

Результующая скорость резания v_{PA} - в точке А

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

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

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

и
$$v_{ША} = r_{iA} \cdot \omega_2 \quad . \quad (4)$$

Аналогично точке А, в точке В результирующая_скорость резания равна

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

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

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

и
$$v_{ШВ} = r_{iB} \cdot \omega_2 \quad . \quad (8)$$

Линейная скорость детали от вращательного движения с угловой скоростью ω_2

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

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 180^0 , 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 180^0 . 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

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

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

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

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

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

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

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

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).

Усилие прижима. 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 фигуре 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 -100^0C), также «Прецизионное» (высокая точность формы рабочей поверхности инструмента достигается при правке и поддерживается в работе кинематикой процесса, чем и обеспечивается высокая точность обработки – плоско параллельность на пластине $10 \times 10 \text{ мм} \leq 1 \text{ мкм}$), 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.

Заключение.

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, в частности сферических головок эндопротеза тазобедренного сустава человека.

Признательность.

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

ЛИТЕРАТУРА:

1. Batiashvili B.I., Butskhrikidze D.S., Mamulashvili G.L., Mgaloblishvili O. B., Turmanidze R.S., Kromp K., Mills B., Steinkellner W., Schafner E., Rösel F. G., Peterlik H.. Evaluation of surface preparation techniques, SFG: Swing Frame Grinding and LPG: Low Temperature Precision Grinding, by comparison of results on alumina and siliconcarbide model materials. FRACTOGRAPHY OF ADVANCED CERAMICS. International Conference Stará Lesná, High Tatras, May 2001.

2. Batiashvili B.I., Butskhrikidze D.S., Mamulashvili G.A, Turmanidze R.S., Kromp K., Mills B., Mgaloblishvili O. Technological Possibilities of Low Temperature Precision Grinding Process when Machining Hard and Brittle Materials. FRACTOGRAPHY OF ADVANCED CERAMICS, International Conference, Stará Lesná, High Tatras, May 2001.

3. Turmanidze R.S, Butskhrikidze D.S, Kromp K., Mills B., “Low temperature precision grinding of hard and brittle materials”. Problems of mechanics and physiko-chemistry of the process of abrasive machining, Kiev 2002. – 490-499 pp.

4. Turmanidze R.S., Butskhrikidze D.S., Mamulashvili G.L., Kromp K., Mills B., Morgan M., Mgaloblishvili O. Low-temperature precision grinding of hard and brittle materials and Outlook of its development and application. Proceedings of 19th NCMR Conference. Glasgow, September 2003.

5. R. Turmanidze, D. Butskhrikidze, E. Kutelia, M. Beridze, Influence of the Sapphire Crystal Anisotropy of Medical Purpose on Workability of the Endoprosthesis Material at a Low Temperature Precision Grinding. “MicroCAD 2008” International Scientific Conference. 20-21 March, 2008. Section N: Production Engineering and Manufacturing Systems. University of Miskolc, Hungary. – ISBN 978-963-661-812-4 Ö ISBN 978-963-661-823-0.

6. R. Turmanidze, G. Popkhadze, Selection criteria of optimal characteristic material and technologies for precision processing of basic working surface of human hip-joint implant. 9TH INTERNATIONAL CONGRESS ON PRECISION MACHINING. ATHENS, GREECE-2017. – ISSN 0377-6883.

Поступила в редколлегию 02.02.2021 г.