

Р. С. Турманидзе, д-р техн. наук, Д. С. Буцхрикидзе, канд. техн. наук,
М. Д. Беридзе, Тбилиси, Грузия

ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ КРИСТАЛЛА САПФИРА МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ И СХЕМА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Розглянуто питання, пов'язані з визначенням ступеня впливу орієнтації кристала сапфіра на його оброблюваність при алмазному шліфуванні торцем круга і розробці перспективної, оригінальної схеми формоутворення неповної сферичної поверхні, зокрема, сапфірової голівки, ендопротезу тазостегнового суглоба людини.

Головки ендопротеза тазобедренного сустава человека, 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 актуальной задачей, острота которой в последние годы интенсивно возрастает. Это обусловлено тем, что если раньше необходимость подобных операций была вызвана возрастным фактором человека или травматологическими переломами, то в последнее двадцатилетие резко увеличилось количество больных в молодом возрасте 30-40 лет как мужчин, так и женщин, без всяких травм и переломов. По мнению медиков, основными причинами этого явления являются неактивный образ жизни молодежи, состав современных искусственных пищевых продуктов и нарушение обмена веществ. 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 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.

Наиболее биосовместимым с человеческим организмом, износостойким и долговечным материалом для изготовления вышеупомянутого изделия является искусственный монокристалл сапфира.

Целью представленной работы являются: определение степени влияния ориентации кристалла сапфира на его обрабатываемость и разработка перспективной, оригинальной схемы формообразования неполной сферической поверхности, в частности, сапфировой головки эндопротеза тазобедренного сустава человека.

Для проведения исследований обрабатываемости кристалла сапфира был выбран способ низкотемпературного прецизионного шлифования (НПШ), разработанный на кафедре «Технология машиностроения» Грузинского технического университета, как вариант прогрессивных способов алмазного шлифования твердых и хрупких, неметаллических материалов.

На рис.1а - обрабатываемые детали, установленные на кассете в сепараторах или другим способом крепления, например, приклеиванием, совершают вращательное движение с угловой скоростью ω_2 , а шлифовальный круг – со скоростью ω_1 в том же направлении. В зоне резания осуществляется прижим усилием P обрабатываемых поверхностей деталей к рабочей поверхности шлифовального круга.

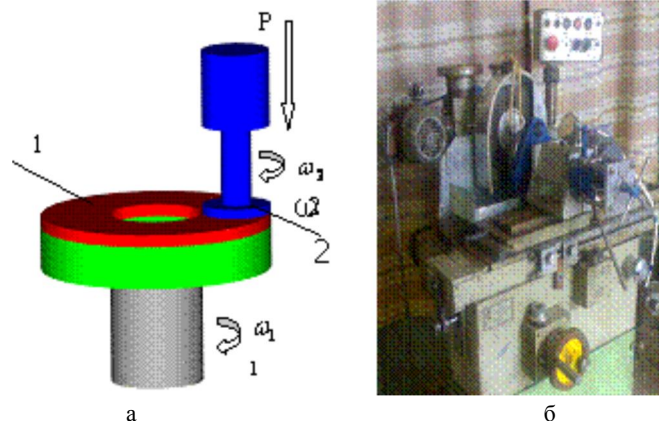


Рис. 1 – а - Схема НПШ: 1- шлифовальный круг, 2- кассета с деталями, б- лабораторная установка для НПШ.

Скорость резания определяется в пределах площади контакта как среднее значение скорости относительного

перемещения рабочей поверхности инструмента по обрабатываемой поверхности детали:

$$V_{\text{ред}} = \frac{1}{F_g} \int_F V dF,$$

где F_g – площадь обрабатываемой поверхности детали – площадь контакта.

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 специальной прецизионной головкой (рис.1.б). 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 – τ_{03} ,%; 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,

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

Производительность обработки растет в диапазоне скорости резания $V=1...6$ м/с, тогда как, при дальнейшем увеличении скорости резания, до 12 м/с – остается постоянной.

С увеличением усилия прижима P , во всем исследуемом диапазоне, производительность обработки растет, однако в интервале

$P=1000...1500$ кПа, рост производительности значительно снижается.

Из характеристик алмазного инструмента на производительность преваляющим 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. Максимальную производительность обработки обеспечивает инструмент на керамической связке ({0001}– 130 мкм/мин; {1010}– 300 мкм/мин; {1012}– 250 мкм/мин), далее на металлической ({0001}– 50 мкм/мин; {1010}– 200 мкм/мин; {1012}– 170 мкм/мин) и органической ({0001}– 30 мкм/мин; {1010}– 120 мкм/мин; {1012}– 110 мкм/мин). Инструмент на керамической связке работает в режиме самозатачивания.

Из характеристик алмазного инструмента на качество поверхности преваляющим 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. При прочих равных условиях обработки на ориентации (0001) достигается более высокое качество поверхности, чем на остальных двух. Разница в 1...1,5 классах шероховатости. По этому показателю наилучшие результаты показывают алмазные круги на органической связке. Так, например, на алмазных кругах, на связках ВС-11 и органическая специальная, получены следующие результаты: $R_z=0,25$ мкм; $\tau_{03}=35...45\%$; $H=2...5$ мкм. При этом, значение параметра R_z на порядок ниже, параметра τ_{03} – в 1,5 раза выше и параметра H – в 3...5 раза меньше, чем значения соответствующих параметров, которые получены на алмазных кругах на керамической и металлической связках.

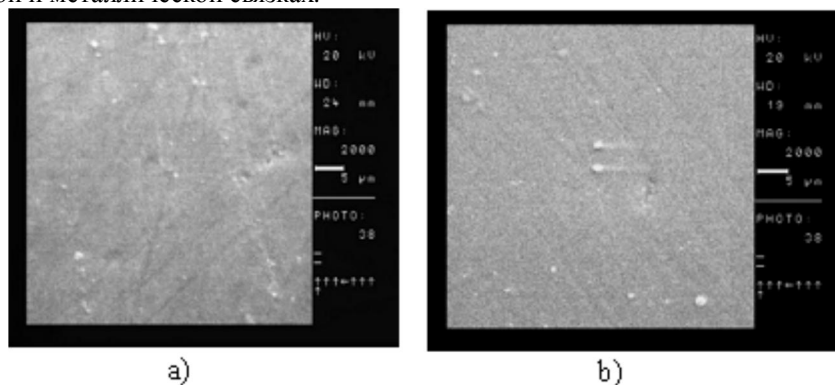


Рис. 2 – Микрофотографии поверхностей экспериментальных образцов сапфира, обработанные способом НПШ: а- Ориентация 1010, б- 1012. Алмазный круг – АСМ 14/10, связка органическая спец., 50 %. Режимы резания: $V=1$ м/с, $P=750$ кПа.

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 (фиг.2).

Известно, что обработка стеклообразных материалов, в частности, кристалла сапфира, путем пластического

деформирования снимаемого слоя, вместо хрупкого разрушения – диспергирования, залог получения обработанной поверхности практически без наследственных дефектов – без нарушенного подрельефного слоя. Величина H оказалась наименьшей именно на этих образцах сапфира. Полученный значимый результат требует отдельных исследований, проведение которых планируется.

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.

Для разработки теоретической схемы алмазной обработки сапфировых сфер с учетом многолетнего опыта работы в области исследования обрабатываемости сверхтвердых хрупких, неметаллических материалов абразивными - алмазными кругами, были рассмотрены и проанализированы известные схемы формообразования неполной сферической поверхности связанными абразивом.

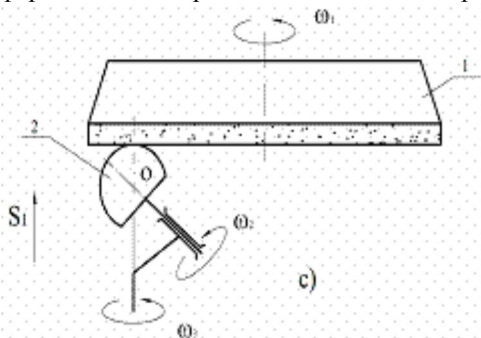


Рис. 3 – Схема формообразования неполной сферической поверхности торцевым алмазным кругом с двойным вращением детали:

1 – алмазный шлифовальный круг;
2 – обрабатываемая деталь – неполная сфера.

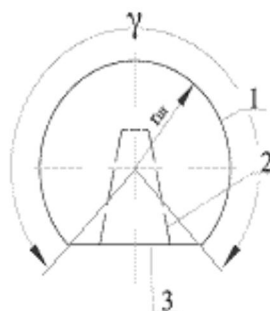


Рис. 4 – Сапфировая сферическая головка:
r_ш – радиус сферы;
γ – угол сегмента сферической поверхности.

В качестве аналога варианта теоретической схемы алмазной обработки сапфировой неполной сферы был выбран, наиболее близкий к нему по кинематике, способ шлифования неполной сферы торцом круга с двойным вращением детали с угловыми скоростями ω_2 и ω_3 (фиг. 3).

Нами были разработаны несколько вариантов теоретических схем формообразования неполной сферической поверхности. Один вариант оригинальной кинематической схемы формообразования неполной сферической поверхности сапфировой головки (фиг. 4) торцевым шлифовальным кругом представлен на фиг.5. Режущим инструментом служит специальный, комбинированный торцевой шлифовальный круг с двумя концентрическими алмазоносными 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 (плоскость чертежа) образуют угол β , бисектриса которого проходит через центр 0 – обрабатываемой сферы.

Отличительные признаки теоретической схемы от аналога такие, как форма рабочей поверхности инструмента и 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.

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.5 в, с, и d.

Результирующая скорость резания $v_{РА}$ в точке А

$$\vec{v}_{РА} = \vec{v}_В - \vec{v}_{шВ} \quad (1)$$

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

где

$$v_A = v_{КА} - v_0 = R_{КА} \cdot \omega_1 - r_m \sin \frac{\gamma}{4} \cdot \omega_1 \quad (3)$$

и

$$v_{шA} = r_A \cdot \omega_2 \quad (4)$$

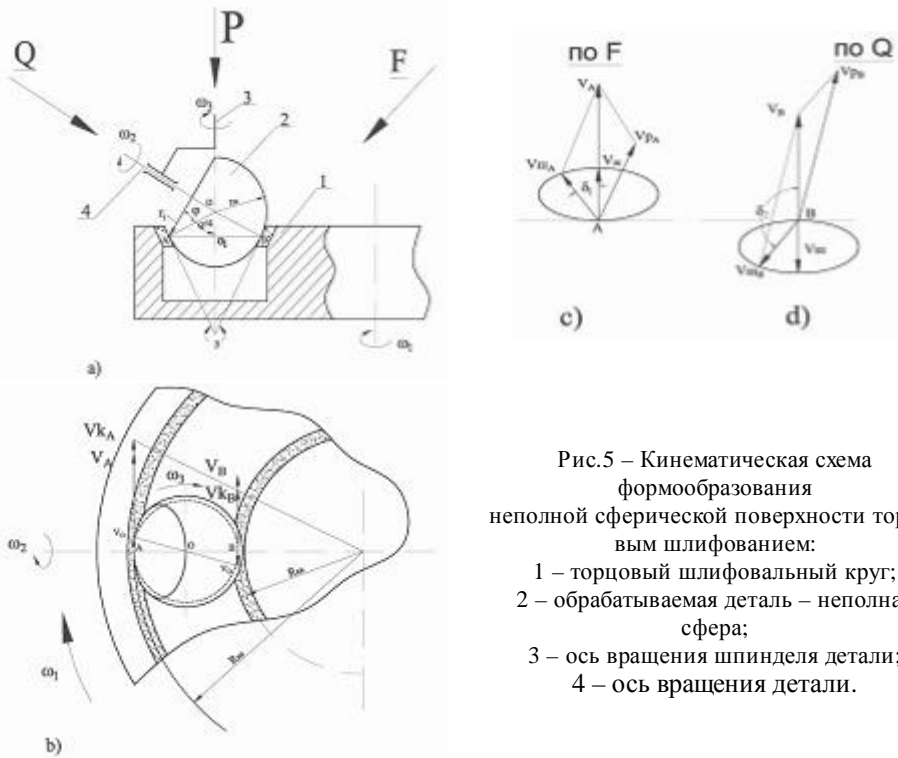


Рис.5 – Кинематическая схема формообразования неполной сферической поверхности торцовым шлифованием:

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

Аналогично точке А, в точке В результирующая скорость резания равна

$$\vec{v}_{\text{РВ}} = \vec{v}_{\text{В}} - \vec{v}_{\text{ШВ}}, \quad (5)$$

$$v_{\text{РВ}} = \sqrt{v_{\text{В}}^2 + v_{\text{ШВ}}^2 - 2v_{\text{В}} \cdot v_{\text{ШВ}} \cdot \cos \delta_1}, \quad (6)$$

где

$$v_{\text{В}} = v_{\text{КВ}} - v_{\text{А}} = (R_{\text{КА}} - 2r_{\text{ш}} \cdot \sin \frac{\gamma}{4}) \cdot \omega_1 + r_{\text{ш}} \cdot \sin \frac{\gamma}{4} \cdot \omega_1 \quad (7)$$

и

$$v_{\text{ШВ}} = r_{\text{ш}} \cdot \omega_1. \quad (8)$$

Линейная скорость детали от вращательного движения с угловой скоростью ω_2

$$v_{\text{Шд}} = r_{\text{д}} \cdot \omega_2 = \omega_1 r_{\text{ш}} \cdot \cos \varphi = \omega_1 r_{\text{ш}} \sqrt{\sin^2 \frac{\gamma}{4} \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{4} \cdot \sin^2 \frac{\gamma}{2} (1 + \sin \alpha)^2}, \quad (9)$$

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_1 .

Текущий радиус $r_{\text{д}}$ точки поверхности детали, при повороте оси 4 вокруг оси 3 на 180° , меняется в пределах $0 \leq r_{\text{д}} \leq r_{\text{ш}}$. 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, т.е. по одному разу в каждой зоне обработки.

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

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

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

$$v_{\text{РАmax}} = v_{\text{А}} = R_{\text{КА}} \cdot \omega_1 - r_{\text{ш}} \cdot \sin \frac{\gamma}{4} \cdot \omega_1 \quad (11)$$

$v_{\text{РВ}}$ достигает максимума при $\alpha = \pi/2$, и, следовательно, $\delta_2 = \pi$.

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

При условии $v_{\text{РАmax}} = v_{\text{РВmax}}$, по выражениям (10), (11) и (12) определяется отношение угловых скоростей ω_1 и ω_1

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

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).

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:

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

Несмотря на некоторое кинематическое сходство новой схемы формообразования с аналогом, явными отличительными признаками являются, такие, как форма рабочей поверхности инструмента в виде двух самостоятельных режущих поверхностей и исходя из этого, форма контакта обрабатываемой поверхности сферы с инструментом, а именно образование двух идентичных зон резания. Как было показано выше, идентичность двух зон резания – контакта реализована равенством условий обработки в в обеих зонах как по результирующей скорости резания, так и по усилию прижима. Исходя из вышесказанного следует логическое заключение, что новая схема формообразования позволит значительного повышения производительности шлифования.

Предполагается, что разработанный оригинальный способ который находится в процессе патентования взамен традиционных методов алмазного шлифования, которые применяются на сегодняшний день в технологическом процессе механической обработки сапфировой головки, может быть успешно применен на предварительной стадии обработки с обеспечением значительного повышения производительности обработки. Также при оптимизации процесса по таким критериям, как качество обработанной поверхности и точность формы изделия, способ может быть применен на окончательной стадии обработки, до финишной операции, с обеспечением значительного повышения показателей качества поверхности и точности обработки, тем самым также значительного уменьшения операционной припуска, в результате времени и себестоимости обработки на финишных операциях (переходах).

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

В работе представленные материалы получены в рамках международного проекта, который был организован по линии Украинского научно-технологического центра, исполнителями которого являются 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 материала при шлифовании; разработаны перспективные, теоретические схемы формообразования неполной сферической поверхности. 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 искусственного монокристалла сапфира. Харьковским институтом монокристаллов были определены режимы выращивания, обеспечивающие максимальную очистку материала сапфира; получен сапфир в кристаллографическом направлении- имеющий минимальную анизотропию.

Результаты проведенных исследований в рамках вышеупомянутого проекта, по нашей оценке, представляют собой хорошую базу данных для перспективных разработок. А именно, участниками проекта в УНТЦ был представлен новый проект под названием «Развитие методов упрочнения сапфира, применяемого в медицине». В рамках этого проекта планируется проведение работ по разработке комплексного метода упрочнения сапфира для изготовления изделий, эксплуатирующихся при высоких механических нагрузках - в экстремальных условиях, а также, конкурентоспособных технологических процессов изготовления сапфировых эталонов для определения физико-механических свойств нового материала, и оригинального технологического процесса изготовления сапфировых изделий медицинского назначения.

По долгосрочной программе предусмотрена организация европроекта с созданием необходимого оборудования, инструментов, технологической оснастки и всего технологического процесса изготовления высокоточных сферических поверхностей из сапфира повышенной прочности или других подходящих по своим свойствам материалов.

Список литературы: 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.