



УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

Експериментальне моделювання процесу алмазного шліфування внутрішньої сфери в сапфірі

С. В. Сохань¹⁾, Н. О. Мельник-Кагляк²⁾, В. Є. Кіреєв³⁾^{1),2)} Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля, вул. Автозаводська, 2, 04074, м. Київ, Україна;³⁾ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, 03056, м. Київ, Україна**Article info:**

Paper received:

05 September 2016

The final version of the paper received:

03 November 2016

Paper accepted online:

22 November 2016

Correspondent Author's Address:¹⁾ sokhan@ism.kiev.ua

Істотним недоліком, що ускладнює застосування сапфіру або керамічних матеріалів у артропластиці суглобів людини, є їх недостатня тріщиностійкість і міцність. Один із способів уникнення цього недоліку реалізований у конструкції гібридних протезів стегнових головок, що мають зовнішній шар із зазначених матеріалів та осердя з металу. У цьому сенсі актуальною є проблема механічного оброблення внутрішньої поверхні сферичної оболонки із сапфіру чи кераміки через отвір, діаметр якого вдвічі менший за діаметр оброблюваної сфери, без розтріскування поверхневого шару. Наведені результати дослідження впливу кута нахилу інструмента, режиму оброблення на силові характеристики процесу, шорсткість обробленої поверхні при експериментальному моделюванні процесу алмазного шліфування внутрішньої сфери в сапфірі. Виявлені умови, що сприяють зменшенню тріщин у поверхневому шарі.

Ключові слова: гібридний протез стегнової головки людини, сферична оболонка, внутрішня сфера, алмазне шліфування, експериментальне моделювання, кут нахилу інструмента, режим оброблення, силові характеристики, шорсткість поверхні.

1. ВСТУП

Операція тотального ендопротезування суглоба людини, тобто його заміни штучним, є однією з найбільш ефективних хірургічних операцій сучасної медицини, що практично повністю відновлює здоров'я і працездатність пацієнтів на десятки років [1–2].

Наразі фактором, що безпосередньо визначає тривалість експлуатації штучного суглоба, є недостатня біологічна сумісність застосовуваних матеріалів [3–4] (є усталеним уявленням, що за прямого контакту з клітинами організму біосумісний матеріал не повинен їх пошкоджувати й негативно впливати на біохімічні процеси). Інший фактор – нестабільність функціонування (через зношування) рухомого зчленування, іншими словами пари тертя ендопротеза і, як наслідок, асептична нестабільність (набула рухомість) фіксуючих компонентів й штучного суглоба в цілому в опорно-рухомому апараті людини. Тому важливим є вдосконалення конструкції штучних суглобів [5].

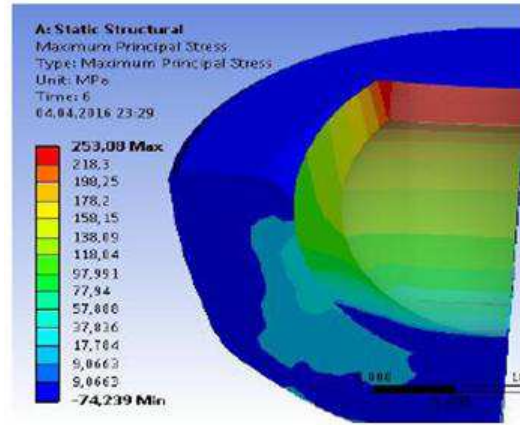
Традиційно завдання підвищення зносостійкості поверхонь пари тертя вирішують виготовленням головки ендопротезу не з металу, а з полікристалічних корунду чи діоксиду цирконію, чи сапфіру, які мають переваги щодо зносостійкості й біологічної сумісності. На сучасному етапі сапфір є одним із найкращих біологічно сумісних і зносостійких матеріалів. Однак істотним недоліком застосування таких матеріалів є недостатня тріщиностійкість і міцність в умовах дії розтягувальних напружень від фіксації головки на ніжці ендопротезу. Приклад розрахунку колових

напружень від фіксації керамічної головки ендопротеза на ніжці наведено на рис. 1 [6]. Для уникнення цього недоліку запропоновано гібридні сапфір-металеві або кераміко-металеві протези стегнових головок зі зносостійким зовнішнім шаром та осердям із металу [6–9]. З аналізу напружено-деформованого стану елементів запропонованої у [8] двошарової головки – сапфірової оболонки та осердя з титану – випливає, що найбільші напруження в сапфіровому шарі виникають навпроти бічної конічної поверхні отвору і зони його переходу у внутрішню сферу, а міцність головки в цілому досягається при певному значенні товщини сапфірового шару (рис. 2) [10].

Із технологічної точки зору актуальною проблемою виготовлення таких протезів є механічне оброблення внутрішньої поверхні сферичної оболонки з сапфіру чи кераміки – необхідно із суцільної заготовки або в умовах значного змінювання величини припуску утворити внутрішню поверхню виробу шліфуванням кінцевим алмазним інструментом через отвір, діаметр якого вдвічі менший за діаметр оброблюваної сфери, з мінімальним пошкодженням поверхневого шару тріщинами, що виникають. За таких умов алмазне шліфування внутрішньої поверхні оболонки здійснюється методом контурного оброблення, оскільки неможливо забезпечити необхідну колову подачу інструмента через отвір і навколо нерухомої осі його повороту. Тому кут атаки інструмента до оброблюваної поверхні постійно змінюється у визначеному діапазоні (рис. 3), як і сила шліфування, і шорсткість обробленої поверхні.



Рисунок 1 – Схематичне зображення протезу стегнової головки з кераміки Al_2O_3 на металевій шийці нижки штучного суглоба [6]



Риснок 2 – Розподіл напружень у сапфіровому шарі головки і сапфіровому вкладиші штучного кульшового суглоба [10]

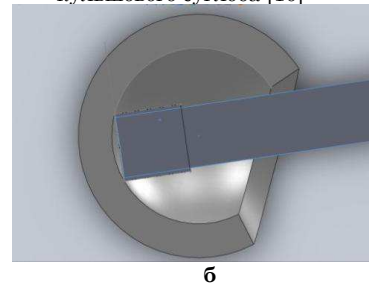
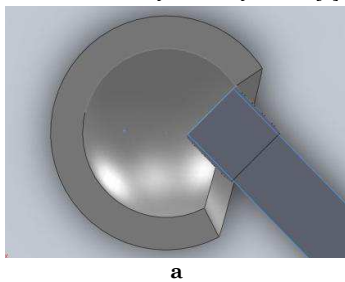


Рисунок 3 – 3D-модель геометричного контакту кінцевого шліфувального інструмента та оброблюваної внутрішньої сферичної поверхні на початку (а) і в кінці (б) оброблення

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Процес алмазного шліфування сапфіра, що є монокристалом, як і будь-якого крихкого неметалевого матеріалу, докорінно відрізняється від процесу алмазного шліфування металів. Під час шліфування крихких неметалевих матеріалів мають місце: пружно-пластична деформація без руйнування, диспергування припуску при пластичній деформації й крихке руйнування зі сколюванням частинок. Ймовірність тих або інших механізмів руйнування припуску визначається як фізико-механічними властивостями матеріалу, так і навантаженням на зерна (залежно від режимів оброблення). Характерним результатом знімання припуску при шліфуванні є бічні відколювання й виривання кластерів з поверхневого шару, що проявляються у вигляді осередків руйнування, які найбільше впливають на формування шорсткості поверхневого шару [11].

Характер руйнування крихкого неметалевого матеріалу, яким є сапфір, залежить головним чином від величини нормальної сили на алмазному зерні. При досягненні нормальною силою критичної величини, необхідної для формування бічних тріщин, руйнування відбувається за рахунок сколювання. Величина критичної сили, необхідної для утворення бічних тріщин, визначається залежністю

$$P_{kp} = k_p \cdot K_{IC}^4 / H_\mu^3, \quad (1)$$

k_p – сталий коефіцієнт; K_{IC} – коефіцієнт інтенсивності напружень I роду (критична інтенсивність тріщиниутворення); H_μ – мікротвердість [12].

Величину критичної сили, що утворює бічні трі-

щини в сапфірі, порівнювали з такою, яка утворює бічні тріщини в полікристалічній корундовій кераміці, одержаній методом гарячого пресування. Виходячи з фізико-механічних властивостей розглянутих матеріалів (табл. 1), критичне значення сили, необхідне для утворення бічних тріщин у кераміці, більше, ніж для сапфіру в 4,5–6,7 раза. Тому при шліфуванні сапфіру менше критичне значення площі перерізу зрізу матеріалу на зерні [11], при якому відбуваються відколювання, і відповідно у кілька разів менша, ніж для кераміки, глибина різання потрібна для утворення відколів.

З іншого боку, критичний розмір медіанної тріщини, за якого вона починає стійко розвиватися при індентуванні, обернено пропорційний квадрату індексу крихкості матеріалу:

$$l_M = k_M / (H_\mu / K_{IC})^2, \quad (2)$$

де k_M – сталий коефіцієнт [12]. Експериментально доведено під час алмазно-абразивного оброблення [11], що величина максимальної напівдовжини дефектів оброблення в поверхневому шарі кераміки лінійно залежить від критичної величини медіанної тріщини при індентуванні, за якої тріщина розвивається стало. Чим менший індекс крихкості матеріалу, а отже, більша величина критичної медіанної тріщини при індентуванні, тим більших значень необхідно очікувати і напівдовжин максимальної тріщини від оброблення і глибини тріщинуватого шару. Отже, виходячи з даних табл. 1 за однакових умов шліфування відколювання на обробленій поверхні сапфіру повинні бути більшими, а глибина тріщинуватого шару – навпаки, меншою, ніж на повер-

хні корундової кераміки. У той самий час необхідно відзначити, що виконаний порівняльний аналіз ураховує лише фізико-механічні властивості матеріалів, але не власне умови алмазно-абразивного оброблення (режим шліфування та ін.), які визначають глибину тріщинуватого шару.

Зважаючи на результати порівняння схильності моно- і полікристалічного матеріалу із штучного корунду до тріщиноутворення, а також наведені особливості контурного оброблення внутрішньої сфери в сапфірі, мета роботи полягала в експериментальному дослідженні впливу кута атаки інструмента та режимів оброблення на силові характеристики процесу шліфування, шорсткість обробленої поверхні для кращого розуміння можливих способів зменшення тріщин у приповерхневому шарі.

Дослідження силових характеристик процесу шліфування проводили на вимірювальному стенді на базі горизонтально-фрезерного верстата з ЧПК мод. OMM64SCE02 з установленим на його столі динамометром УДМ-600 (рис. 7). Аналоговий сигнал із динамометра оцифровувався в аналого-цифровому перетворювачі й подавався на комп'ютер (див. рис. 7). Державку із зразками розміщували в динамометрі таким чином, щоб під час шліфування за схемою, показаною на рис. 5, одержати сигнали по каналах вимірювальної системи за складовими P_x і P_y сили шліфування. Для градуювання каналів P_x та P_y вимірювальної системи використовували динамометр пружний ДОСМ 3-01 із межею навантаження до 1 000 Н. Інтерфейс вимірювальної системи під час градуювання каналів P_x і P_y показаний на рис. 8. Дослідження шорсткості обробленої поверхні сапфіру проводили на профілометрі-профілографі моделі 170623 заводу «Калібр» (РФ) [14].

Таблиця 1 – Деякі фізико-механічні властивості сапфіру й корундової кераміки, отриманої методом гарячого пресування

Показник	Al ₂ O ₃ -кераміка (Гп) [11]	Сапфір [13]
Густина, кг/м ³	3900	3990
Модуль Юнга, ГПа	365	345
Мікротвердість H _ц , ГПа	14,9	19,4–22,0
Міцність при згині σ _з , МПа	930	400–895
Міцність при розтягненні σ _р , МПа	360	275–400
Міцність при стисненні σ _с , ГПа	3,27	2,0
Індекс крихкості H _ц /K _{1C}	3,55	5,54–6,29
Коефіцієнт інтенсивності напружень I роду (критична інтенсивність тріщиноутворення) K _{1C} , МПа·м ^{-1/2}	4,2	3,5



Рисунок 4 – Алмазний інструмент для шліфування сферичної поверхні: кільцевий (зліва), типу АГЦ (в центрі та справа)

Вивчали вплив кута нахилу, подачі інструмента та глибини різання на складові сили різання, шорсткість обробленої поверхні сапфіру. На попередньому етапі провели кілька базових дослідів для визначення характеру і ступеня впливу подачі інструмента та глибини різання на силові характеристики процесу, шорсткість поверхні. Діапазон змінювання подачі – від 10 до 60 мм/хв при постійному куті нахилу 15° і двох рівнях глибини різання – 0,05 та 0,1 мм. На другому етапі, оскільки було відсутнє кількісне оцінювання ступеня впливу факторів, що вивчаються, на вихідні змінні процесу, для недетермінованого об'єкта було вибрано повний факторний експеримент типу 2³, що передбачає варіювання усіх факторів на двох рівнях: кут нахилу α – 15 і 75°, глибина різання h_s – 0,05 та 0,1 мм, подача s – 10 і 40 мм/хв. Матриця планування експерименту з урахуванням взаємодії факторів наведена у табл. 2.

За одержаними результатами дослідів будували лінійні моделі вихідних змінних процесу від факторів, що варіюються, з урахуванням взаємодії факторів у вигляді:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{k+1}x_1x_2 + \dots + b_{2k}x_{k-1}x_k, \quad (3)$$

в якій коефіцієнти лінійної моделі розраховуються за формулами:

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ji} Y_i, \quad j = \overline{0, k}, \quad (4)$$

$$b_{j+k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [X_{ji} X_{(j+1)i} + X_{ji} X_{(j+2)i}] Y_i, \quad j = \overline{1, k}. \quad (5)$$

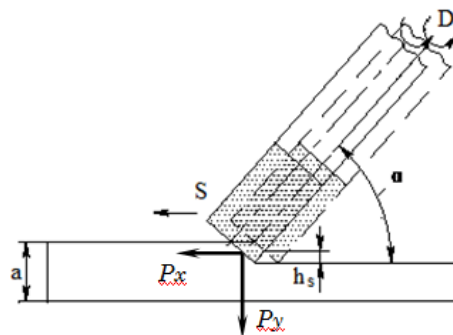


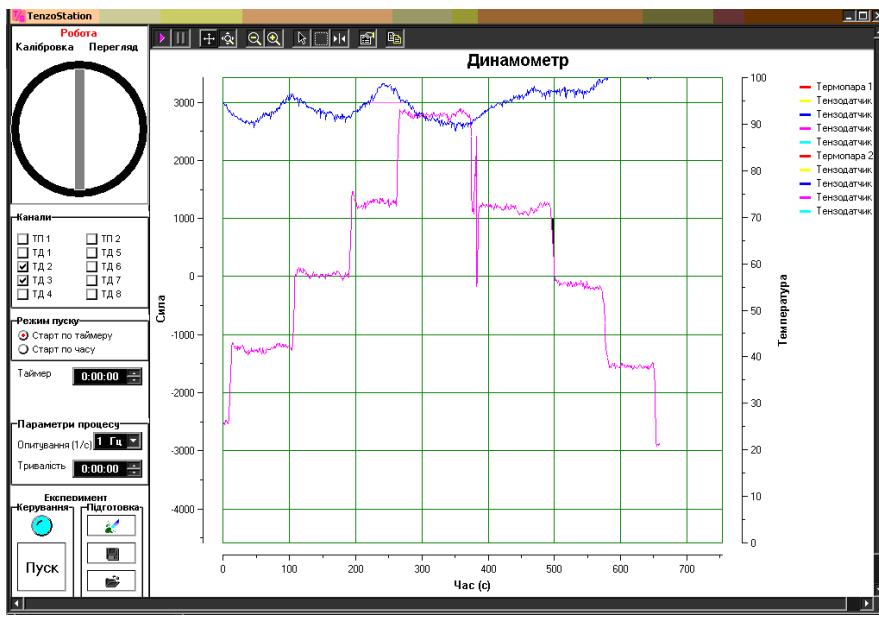
Рисунок 5 – Схема шліфування для встановлення залежностей сили різання від кута нахилу інструмента та подачі



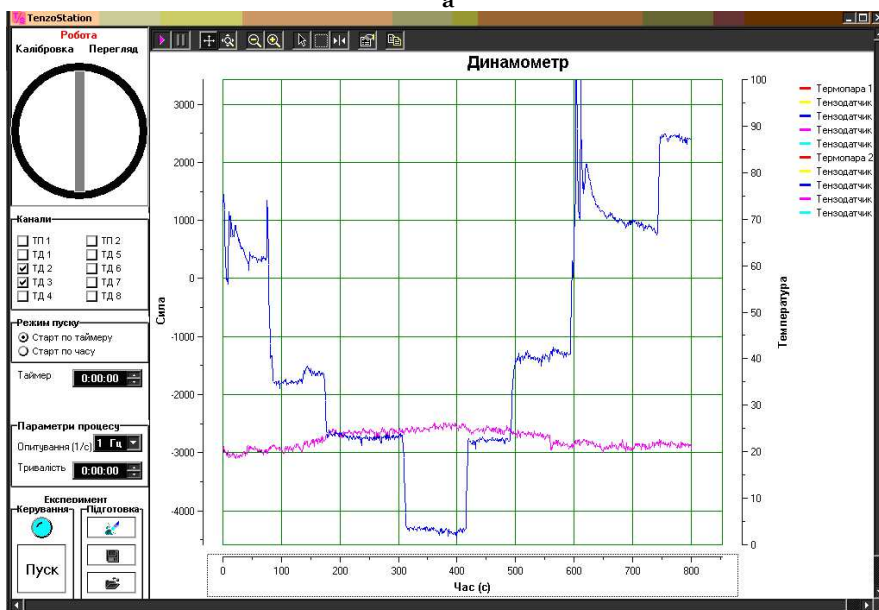
Рисунок 6 – Загальний вигляд досліджуваних зразків сафіру, наклеєних на державку, після попереднього плоского шліфування



Рисунок 7 – Загальний вигляд вимірювального станда на базі верстата з ЧПК мод. OMM64SCE02 й динамометра УДМ-600



а



б

Рисунок 8 – Інтерфейс вимірювальної системи із зафіксованими сигналами під час градування каналів за складовими P_x (а) і P_y (б) сили шліфування

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту типу 2^3 у відносних величинах

Номер досліджу	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	Буквені позначення рядків	y
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	(1)	y_1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	a	y_2
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	b	y_3
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	c	y_4
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	ab	y_5
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	ac	y_6
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	bc	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	abc	y_8

Графіки на рис. 9 ілюструють в цілому лінійний характер змінювання складових сили різання, параметрів шорсткості обробленої поверхні в дослідженому діапазоні подачі інструмента від 10 до 60 мм/хв (при куті його нахилу 75° і на глибинах різання 0,05 та 0,1 мм) зі збільшенням подачі. Як бачимо з рис. 9 а, темп зростання величини P_x і зменшення величини P_y є різним і залежить від глибини різання – зі збільшенням останньої темп зростання величини P_x підвищується, а темп зменшення величини P_y , навпаки, знижується. Порівнюючи залежності параметрів шорсткості поверхні від подачі при досліджених глибинах різання, необхідно наголосити, що значення цих параметрів практично не залежать від глибини різання (рис. 9 б).

У таблиці 3 наведені результати вимірювань складових сили різання, параметрів шорсткості обробленої поверхні зі стандартним відхиленням, одержані під час проведення повного факторного експерименту типу 2^3 , а також наведені результати розрахунку дисперсій вибірок із 5 вимірювань за кожним із 8 проведених дослідів.

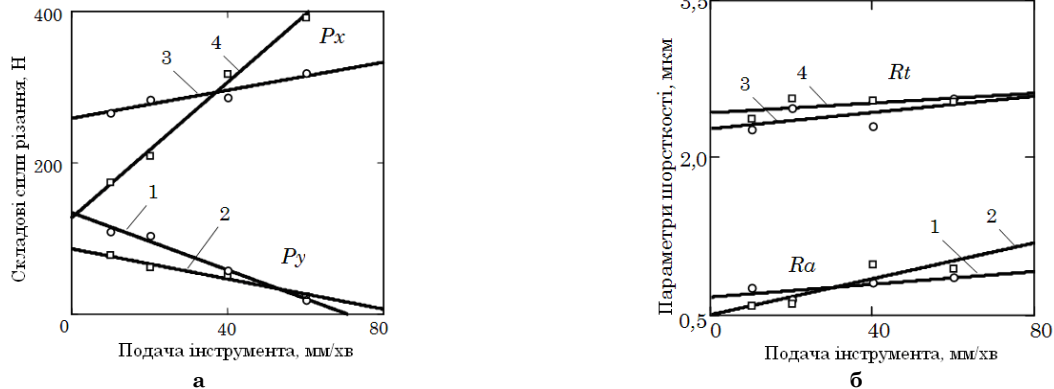


Рисунок 9 – Залежності складових сили різання (а), параметрів шорсткості (б) від подачі інструмента: 1–2 – P_y , R_a ; 3–4 – P_x , R_t ; 1,3 – $h_s = 0,05$ мм; 2,4 – $h_s = 0,1$ мм

Таблиця 3 – Матриця змінювання факторів, що варіюються, в абсолютних величинах, значення вихідних змінних процесу

Номер досліджу	Кут нахилу α , град.	Глибина різання h_s , мм	Подача інструмента s , мм/хв	Складова P_x сили різання, Н	Дисперсія вибірки S_x^2	Складова P_y сили різання, Н	Дисперсія вибірки S_y^2	Параметр R_a шорсткості, мкм	Дисперсія вибірки S_a^2	Параметр R_t шорсткості, мкм	Дисперсія вибірки S_t^2
1	15	0,05	10	68,9±5,0	25,30	171,7±23,5	7689,09	0,760±0,128	0,016321	2,27±0,33	0,107414
2	75	0,05	10	109,3±14,6	213,52	266,8±15,2	35681,43	0,965±0,336	0,057229	2,72±0,65	0,427860
3	15	0,1	10	41,8±10,1	101,50	322,4±4,8	23,33	0,585±0,125	0,015627	2,37±0,43	0,188111
4	15	0,05	40	119,3±22,8	282,56	263,0±14,8	7636,43	0,805±0,181	0,032781	2,30±0,35	0,119481
5	75	0,1	10	78,5±16,8	521,64	174,0±11,0	17400,50	0,817±0,161	0,025957	2,71±0,61	0,374284
6	75	0,05	40	58,0±17,1	292,52	286,7±16,9	20720,27	0,975±0,341	0,060946	2,72±0,62	0,378226
7	15	0,1	40	60,6±13,8	190,00	156,9±14,0	12438,95	0,985±0,279	0,077890	2,54±0,40	0,157396
8	75	0,1	40	51,2±13,2	174,86	317,7±17,3	25386,11	0,920±0,308	0,047294	2,90±0,65	0,420818

Таблиця 4 – Розрахунок статистичних величин для перевірки адекватності рівнянь регресії експериментальним результатам

Показник	P_x	P_y	Ra	Rt
Розрахований критерій Кохрена	0,2895	0,2810	0,2332	0,1968
Табличний критерій Кохрена при $f_1 = (m - 1) = 4$ і $f_2 = N = 8$	0,5175	0,5175	0,5175	0,5175
Середньозважена дисперсія відтворення $S_{\text{відтв}}^2$	225,24	15872,02	0,041756	0,271699
Дисперсія середнього значення $S^2(\bar{y})$	45,048	3174,40	0,008351	0,054340
Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів $S(b_j)$	2,373	19,920	0,032	0,082
Табличний критерій Стьюдента $t_p(f)$ для $p = 0,05$ і числа ступенів вільності $f = N(m - 1)$	2,0369	2,0369	2,0369	2,0369
Дисперсія адекватності $S_{\text{ад}}^2$	70,42	4275,70	0,006041	0,248048
Розрахований критерій Фішера	0,31	0,27	0,72	0,91
Табличний критерій Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів вільності	2,40 ($f_{\text{ад}} = 6,$ $f_{\text{відтв}} = 32)$	3,30 ($f_{\text{ад}} = 2,$ $f_{\text{відтв}} = 32)$	2,40 ($f_{\text{ад}} = 6,$ $f_{\text{відтв}} = 32)$	2,32 ($f_{\text{ад}} = 7,$ $f_{\text{відтв}} = 32)$

За наведеними результатами побудовано лінійні моделі вихідних змінних процесу з урахуванням взаємодії факторів, що варіюються:

– складових сили різання:

$$P_x = 73,5 + 0,7x_1 - 104,5x_2 - 1,1x_3 + 8,0x_1x_2 - 0,1x_1x_3 - 1,9x_2x_3, \quad (7)$$

$$P_y = 244,9 + 2,6x_1 + 402,0x_2 - 1,1x_3 - 17,7x_1x_2 + 0,2x_1x_3 - 33,3x_2x_3, \quad (8)$$

– параметрів шорсткості обробленої поверхні:

$$Ra = 0,8515 + 0,0045x_1 - 0,495x_2 + 0,007x_3 - 0,0347x_1x_2 - 0,0003x_1x_3 + 0,112x_2x_3, \quad (9)$$

$$Rt = 2,5663 + 0,0131x_1 + 1,275x_2 + 0,0049x_3 - 0,0283x_1x_2 - 0,00001x_1x_3 + 0,0825x_2x_3. \quad (10)$$

Значущість коефіцієнтів рівнянь регресії перевіряли за критерієм Стьюдента. Якщо виконується умова

$$t_j = |b_j|/S(b_j) > t_p(f), \quad (11)$$

де $S(b_j) = S(\bar{y})/\sqrt{N}$ – середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів; $t_p(f)$ – табличне значення критерію Стьюдента для $p = 0,05$ і числа ступенів вільності $f = N(m - 1)$, то коефіцієнт значущо відрізняється від нуля. Результат перевірки значущості коефіцієнтів для рівнянь регресії: складової P_x сили різання – 2 статистично значущі коефіцієнти (b_2 і b_4), складової P_y сили різання – всі, параметра Ra шорсткості поверхні – 2 коефіцієнти (b_2 і b_6) і параметру Rt шорсткості поверхні – 1 коефіцієнт (b_2).

Для перевірки адекватності одержаних рівнянь регресії за критерієм Фішера спочатку розраховували дисперсію адекватності результатів розрахунку за моделлю експериментальним результатам:

$$S_{\text{ад}}^2 = [m/(N - l)] \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (12)$$

де \hat{y}_i – результат розрахунку величини за моделлю, l – число значущих коефіцієнтів рівнянь регресії. Рівняння регресії є адекватними експериментальним результатам, якщо виконується умова

$$F = S_{\text{ад}}^2/S_{\text{відтв}}^2 \leq F_{1-p}(f_{\text{ад}}, f_{\text{відтв}}), \quad (13)$$

де $F_{1-p}(f_{\text{ад}}, f_{\text{відтв}})$ – табличне значення критерію

Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів вільності $f_{\text{ад}} = N - l$, $f_{\text{відтв}} = N(m - 1)$. Оскільки вищенаведена умова за критерієм Фішера виконується для всіх одержаних рівнянь регресії, зроблено висновок про їх адекватність експериментальним результатам.

У результаті дослідження одержаних моделей побудовано графіки функцій: $P_x(\alpha, s)$, $P_y(\alpha, s)$, $P(\alpha, s)$ і $P_x(h_s, s)$, $P_y(h_s, s)$, $P(h_s, s)$ (рис. 10–11).

Як бачимо з графіків на рис. 10, характер змінювання сили різання, її складових визначається впливом взаємодії 2 факторів – кута нахилу і подачі інструмента, що проявляється таким чином. З одночасним пропорційним зростанням факторів, що розглядаються, значення функцій $P_x(\alpha, s)$, $P_y(\alpha, s)$, $P(\alpha, s)$ є нижчими (у разі складової P_x) або перевищують (в інших випадках) ті, що відповідають закону зростання чи зниження з незмінним коефіцієнтом пропорційності, і тому поверхня змінювання зазначених функцій стає вигнутою (див. рис. 10 а–в). Якщо у функції $P_x(\alpha, s)$ спостерігається відставання її значень від закону зростання з незмінним коефіцієнтом пропорційності, то у функції $P_y(\alpha, s)$, від якої більшою мірою залежить глибина тріщинуватого шару, загальною тенденцією змінювання є поступовий перехід від зменшення своєї величини зі збільшенням кута нахилу інструмента на малих подачах до зростання P_y зі збільшенням кута нахилу при збільшенні подачі інструмента. При цьому темп такого зростання P_y навіть перевищує той, що обумовлений збільшенням лише подачі інструмента (рис. 10 б).

Як бачимо з графіків на рис. 11, істотного впливу взаємодії факторів глибини різання, подачі інструмента як при куті нахилу останнього 15° , так і 75° не спостерігається – вихідні функції близькі до площини.

У той самий час зростання параметра Rt шорсткості обробленої поверхні зі збільшенням кута нахилу інструмента на малій глибині різання практично не залежить від збільшення подачі інструмента, однак істотно залежить від останнього на більшій глибині різання за відсутності впливу взаємодії факторів кута нахилу й подачі інструмента (рис. 12 а), чого не можна сказати про вплив взаємодії факторів глибини різання й подачі інструмента (рис. 12 б). Як бачимо з графіка на рис. 12 б, значення параметра

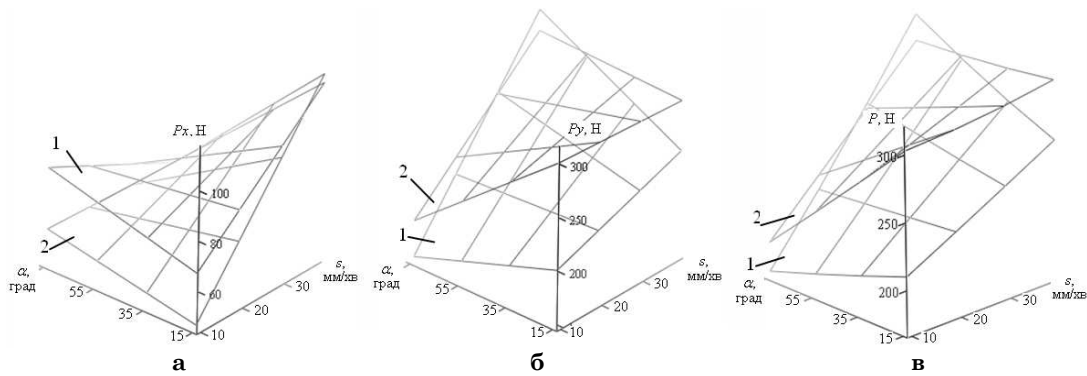


Рисунок 10 – Залежності складових сили різання ($P_x - a$, $P_y - б$), власне сили різання ($P - в$) від кута нахилу й подачі інструмента при глибині різання 0,05 мм (1) і 0,1 мм (2)

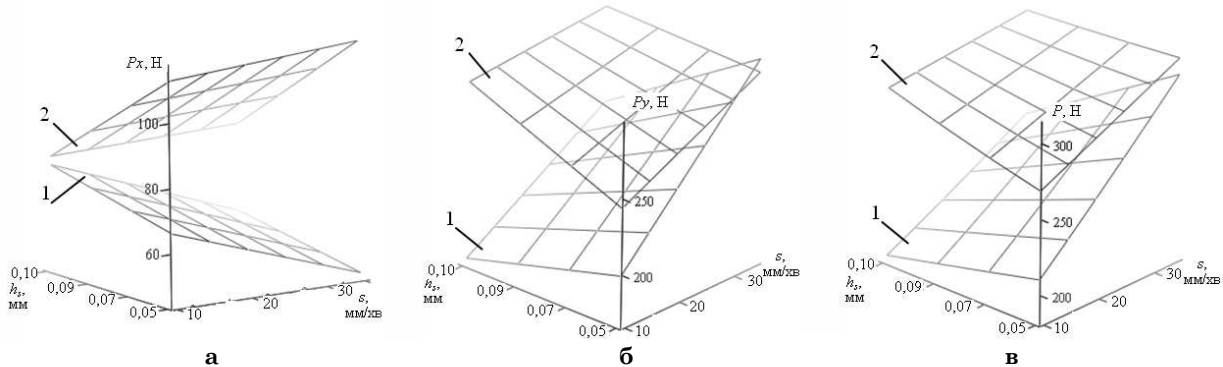


Рисунок 11 – Залежності складових сили різання ($P_x - a$, $P_y - б$), власне сили різання ($P - в$) від глибини різання й подачі інструмента при кутах його нахилу 15° (1) і 75° (2)

Rt сильно залежить від кута нахилу інструмента: при $\alpha = 15^\circ$ його значення коливається у межах 2,27–2,54 мкм, а при $\alpha = 75^\circ$ – у межах 2,71–2,90 мкм.

Оскільки на малих глибинах різання параметр Rt мало залежить від зменшення подачі інструмента, щоб зменшити цей параметр на більш високих подачах інструмента і тим самим зменшити товщину поверхневого шару, геометричну структуру якого характеризує Rt , доцільним буде зменшити глибину різання як для менших, так і для більших кутів нахилу інструмента. Що ж до тріщинуватого припо-

верхнього шару, то зменшення його товщини необхідно очікувати зі зменшенням сили різання P (і зокрема її складової P_x) до рівня, який виникає в області більших кутів нахилу інструмента і на мінімальних подачах останнього, за рахунок зменшення (одночасного або кожного параметра процесу окремо) глибини різання й подачі інструмента. При цьому в області більших кутів нахилу і подачі інструмента така стратегія управління процесом шліфування є найбільш ефективною.

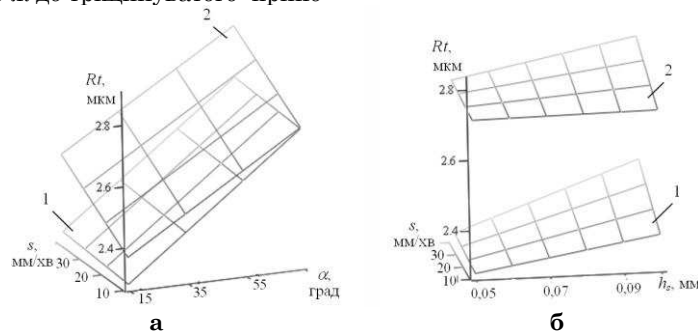


Рисунок 12 – Залежності параметра Rt шорсткості обробленої поверхні від факторів, що варіюються: кута нахилу й подачі інструмента (а) при глибині різання 0,05 мм (1) і 0,1 мм (2); глибини різання й подачі інструмента (б) при кутах нахилу 15° (1) і 75° (2)

3. ВИСНОВКИ

У результаті експериментального дослідження впливу кута нахилу інструмента, режимів оброблення на силові характеристики процесу шліфування, шорсткість обробленої поверхні встановлена найбільш ефективна з точки зору зменшення товщини тріщинуватого приповерхневого шару сапфіру стратегія управління процесом шліфування, що полягає у зменшенні до необхідного рівня сили різання за

рахунок зменшення (одночасного або кожного параметра) глибини різання та подачі інструмента.

Якщо до того ж необхідно стабілізувати товщину поверхневого шару, геометричну структуру якого характеризує, наприклад, параметр Rt , необхідно надавати перевагу зменшенню глибини різання як для менших, так і для більших кутів нахилу інструмента.

Experimental simulation of diamond grinding of internal sphere in sapphire

Sokhan', S. V.¹⁾, Melnik-Kagliak, N. O.²⁾, Kireev, V. E.³⁾

^{1), 2)} *Bakul Institute for Superhard Materials, 2, Avtozavodska Str., 04074, Kyiv, Ukraine;*

³⁾ *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Peremogy Av., 05036, Kyiv, Ukraine*

Insufficient crack growth resistance and durability of sapphire or ceramic materials are essential short coming which complicates their application in total human arthroplasty. One possible approach of elimination of this complicating is realized in a design of hybrid metal-bulk/ceramic-surface femoral head. In this context an actual problem appears. It is in machining without cracking in surface layer an internal surface in sapphire or ceramics spherical casing through the hole, which diameter is twice smaller diameter of processed sphere. The article represents the experimental investigation of diamond grinding of internal sphere in sapphire. It shows the effect of tool inclination angle and grinding conditions on both forces and roughness of machined surface. The conditions of low cracking in surface layer are identified.

Keywords: hybrid metal-bulk/ceramic-surface femoral head of human, spherical casing, internal sphere, diamond grinding, experimental simulation, tool inclination angle, grinding conditions, forces, surface roughness.

Експериментальне моделювання процесу алмазного шліфування внутрішньої сфери в сапфіре

С. В. Сохань¹⁾, Н. А. Мельник-Кагляр²⁾, В. Е. Киреев³⁾

^{1), 2)} *Інститут сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля, ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина;*

³⁾ *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоя Сикорского», пр-т Победы, 39, 03056, Киев, Украина*

Существенным недостатком, затрудняющим применение сапфира или керамических материалов в артропластике суставов человека, является их недостаточная трещиностойкость и прочность. Один из способов устранения этого недостатка реализован в конструкции гибридных протезов бедренных головок, имеющих внешнюю оболочку из указанных материалов и сердцевину из металла. В этом контексте актуальной является проблема механической обработки внутренней поверхности сферической оболочки из сапфира или керамики через отверстие, диаметр которого вдвое меньший диаметра обрабатываемой сферы, без растрескивания поверхностного слоя. Приведены результаты исследования влияния угла наклона инструмента, режима обработки на силовые характеристики процесса, шероховатость обработанной поверхности при экспериментальном моделировании процесса алмазного шлифования внутренней сферы в сапфире. Выявлены условия, способствующие уменьшению трещин в поверхностном слое.

Ключевые слова: гибридный протез бедренной головки человека, сферическая оболочка, внутренняя сфера, алмазное шлифование, экспериментальное моделирование, угол наклона инструмента, режим обработки, силовые характеристики, шероховатость поверхности.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корж Н. А. Состояние и проблемные вопросы эндопротезирования суставов в Украине (исполнение решений XV съезда ортопедов-травматологов Украины) / Н. А. Корж, Г. В. Гайко, В. А. Филиппенко, С. Герасименко, В. А. Танькут // Ортопед., травматол. и протезир. – 2014, № 1. – С. 81–86.
2. Rajaei, S. S. National Trends in Primary Total Hip Arthroplasty in Extremely Young Patients: A Focus on Bearing Surface Usage / S. S. Rajaei et al. // J. Arthropl., Vol. 27, Issue 10 (2012) 132–138.
3. Pezzotti, G. Artificial hip joints: The biomaterials challenge / G. Pezzotti, K. Yamamoto // J. Mech. Behav. Biomed. Mat. 3 1 (2014) 3–20.
4. Affatato, S. Advanced biomaterials in hip joint arthroplasty. A review on polymer and ceramics composites as alternative bearings / S. Affatato et al. // Composites B 83 (2015) 276–283.
5. Hothan, A. The influence of component design, bearing clearance and axial load on the squeaking characteristics of ceramic hip articulations / A. Hothan et al. // J. Biomech, Vol. 44 (2011) 837–841.
6. Rahaman, M. N. In vitro testing of Al₂O₃-Nb composite for femoral head applications in total hip arthroplasty / M. N. Rahaman et al. // Acta Biomaterialia 6 (2010) 708–714.
7. Пат. 95382 Україна МПК А61F 2/32 (2006.01) Головка ендопротеза кульшового суглоба / В. В. Волков, О. В. Коваленко, М. І. Калінін та ін. – № 201004198 ; заявл. 12.04.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14. – 3 с.
8. Пат. 105064 U Україна МПК А61F2/32 (2006.1) Спосіб виготовлення головки ендопротеза кульшового суглобу / С. В. Сохань, Л. Ф. Головкин, Н. О. Мельник-Кагляр – № 201503079 ; заявл. 03.04.2015 ; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. – 3 с.
9. Пат. US 2013/0216420 A1 США U.S. Cl. B22F 7/02 (2013.01) Manufacturing method of a multilayer shell-core composite structural component / Li Yadong, Li Yajun – № 13/878,233 ; заявл. 29.06.2011 ; опубл. 22.08.2013. – 6 с.
10. Криворучко Д. В. Аналіз напружено-деформованого стану двохшарової головки ендопротезу кульшового суглобу людини / Д. В. Криворучко, С. В. Сохань, С. П. Холявка, С. С. Ємельяненко, Н. О. Мельник-Кагляр // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук.праць. – Вип. 11, 2016. – Харків : НТУ «ХПІ». – С. 122–136.
11. Гусев В. В. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики : монография / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова. – Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с.
12. Морозов Е. М. Контактные задачи механики разрушения / Е. М. Морозов, М. В. Зернин – Москва: Машиностроение, 1999. – 544 с.
13. Добровинская Е. Р. Энциклопедия сапфира / Е. Р. Добровинская, Л. А. Литвинов, В. В. Пищик. – Харьков : Ин-т монокристаллов, 2004. – 508 с.
14. Каталог измерительного инструмента ОАО «КАЛИБР» [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://iskra.atomprom.ru/getfile.php?id=42>. – Дата звернення : 11.09.2016. – Назва з екрана.

REFERENCES

1. Korzh, N. A., Gayko, G. V., Filippenko, V. A., Gerasimenko, S., Tankut, V. A. (2014). Sostoyanie i problemnyye voprosy endoprotezirovaniya sustavov v Ukraine [The state and the problematic issues of arthroplasty in Ukraine]. *Ortopedia, travmatologia i protezirovaniye*, 1, 81–86 [in Russian].
2. Rajaei, S. S. et al. (2012). National Trends in Primary Total Hip Arthroplasty in Extremely Young Patients: A Focus on Bearing Surface Usage, *J. Arthropl.*, Vol. 27, Issue 10, 132–138.
3. Pezzotti, G., Yamamoto, K. (2014). Artificial hip joints: The biomaterials challenge. *J. Mech. Behav. Biomed. Mat.*, Vol. 3, Issue 1, 3–20.
4. Affatato, S. et al. (2015). Advanced biomaterials in hip joint arthroplasty. A review on polymer and ceramics composites as alternative bearings. *Composites B.*, Vol. 83, 276–283.
5. Hothan, A. et al. (2011). The influence of component design, bearing clearance and axial load on the squeaking characteristics of ceramic hip articulations. *J. Biomech.*, Vol. 44, 837–841.
6. Rahaman, M. N. et al. (2010). In vitro testing of Al₂O₃-Nb composite for femoral head applications in total hip arthroplasty. *Acta Biomaterialia*, Vol. 6, 708–714.
7. Volkov, V. V., Kovalenko, O. V., Kalinin, M. I. et al. (2011). Golovka endoproteza kulshovogo sugloba [The head of hip joint]. Patent No. 95382 Ukraine. IPC A61F2/32 (2006.01), No. 201004198. Bulletin No. 14 [in Ukrainian].
8. Sokhan', S. V., Golovko, L. F., Melnyk-Kagliak, N. O. (2016). Sposib vygotovlennia golovky endoproteza kulshovogo suglobu [A method for manufacturing the head hip joint]. Patent No. 105064 Ukraine. IPC A61F2/32 (2006.1), No. 201503079. Bulletin No. 5 [in Ukrainian].
9. Manufacturing method of a multilayer shell-core composite structural component: пат. US 2013/0216420 A1 США U.S. Cl. B22F 7/02 (2013.01) / Li Yadong, Li Yajun – № 13/878,233; заявл. 29.06.2011; опубл. 22.08.2013. – 6 с.
10. Kryvoruchko, D. V., Sokhan' S. V., Kholiavka S. P. et al. (2016). Analiz napruzhenno-deformovanogo stanu dvosharvoi golovky endoprotezu kulshovogo suglobu lyudyny [Analysis of deflected mode of the bilayer-head human hip joint]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni, Kharkiv, NTU "KhPI"*, Vol. 11, 122–136 [in Ukrainian].
11. Gusev, V. V., Kalafatova, L. P. (2012). Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva obrabotki izdelii iz tehniceskoy keramiki [Technological maintenance for quality of products during machining of technical ceramics]: Monograph, Donetsk, "DonNTU" [in Russian].
12. Morozov, E. M., Zernin, M. V. (1999)/ Kontaknyie zadachi mehaniki razrusheniya [Contact problems of fracture mechanics]. Moscow, Mashinostrieniye [in Russian].
13. Dobrovinskaya, E. R., Litvinov, L. A., Pishchik, V. V. (2004). Enciklopedia sapfira [Encyclopedia of sapphire]. Kharkov, Institute of Monocrystals [in Russian].
14. Katalog izmeritelnogo instrumenta "Kalibr" Ltd. [Electronic source]: <http://iskra.atomprom.ru/getfile.php?id=42>.