

УДК /621.923:621.921.34/:666

О. Л. Пузирьов, інж.

Институт надтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины, м. Київ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ДОВЕДЕННЯ СФЕРИЧНОЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ З КЕРАМІКИ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

The problem of effectiveness increase of process of diamond lapping of a precision spherical surface of a ceramic detail is surveyed on an instance of the head of hip joint prosthesis. This increase happens at the expense of use of the new way of machining to twirl of a detail around of two axes intersected in center of an orb, and equation of loading of a cutting region.

Ендопротезування тазостегнових суглобів є одним з найперспективніших методів у лікуванні травматичних та дегенеративно-дистрофічних захворювань суглобів [1–2]. Ендопротез суглоба є складною конструкцією із шарнірним з'єднанням, одним з основних елементів якого є ортопедична головка, що має зовнішню сферичну поверхню і виготовляється з металевих сплавів або кераміки. Найбільше розповсюдження отримали біоінертні кераміки на основі діоксиду цирконію (ZrO_2), які у порівнянні з металами мають більшу твердість, зносостійкість, корозійну стійкість і менший коефіцієнт тертя.

До прецизійної сферичної поверхні головки ендопротеза суглоба ставляться високі вимоги щодо точності форми та шорсткості поверхні. Так російський стандарт ГОСТ Р ИСО 7206-2–2005 висуває такі вимоги: шорсткість сферичної поверхні $Ra \leq 0,02$ мкм; відхилення від сферичності не більше 10 мкм. При цьому допуск на номінальний діаметр становить 0,02 мм. В той же час світові лідери виробництва головок ендопротезів суглобів – японська фірма «Kyocera» та французька фірма «FrancBall» – забезпечують точність форми сферичної поверхні на рівні 0,1 – 0,4 мкм і шорсткість сферичної поверхні 0,02 – 0,01 мкм.

В Інституті надтвердих матеріалів НАН України розроблено технологію алмазного доведення головок ендопротезів [3], яка ґрунтується на методі вільного притирання (рис. 1, а) та забезпечує відхилення форми сферичної поверхні на рівні 0,5 – 1,0 мкм і Ra 0,03 – 0,01 мкм. Ця технологія реалізується на універсальному обладнанні і є відносно дешевою, але вона не забезпечує показників якості сферичної поверхні, що відповідають показникам світових виробників. До того ж технологія має недоліки: нерівномірність зняття припуску по профілю деталі та нерівномірність показників шорсткості та некруглості у різних перетинах сферичної поверхні. Тому проблема розробки нової схеми обробки сферичної поверхні ортопедичної головки ендопротеза суглоба, що забезпечує шорсткість поверхні та сферичність, наближену до показників світових виробників, є актуальною.

В основі більшості відомих методик розрахунку зняття матеріалу з оброблюваної деталі або зносу інструменту лежить висунута в 1927 році Ф. Престоном гіпотеза про пропорційність швидкості зношування будь-якої ділянки кожного з взаємодіючих тіл витраченій роботі, тобто добутку тиску на швидкість відносного руху [4].

В подальшому ця гіпотеза знаходила неодноразове підтвердження. Так, згідно з Семибратовим і Проніковим об'єм ма-теріалу, що видаляється з поверхні заготовки, пропорційний роботі зовнішніх сил, які витра-чаються на знос матеріалу, та залежить від добутку швидкості ковзання тіл, що контактують, й нормального контактного тиску, з урахуванням поправочних коефіцієнтів [5, 6].

Таким чином, основними параметрами, що впливають на швидкість зняття матеріалу, є нормальний тиск, швидкість ковзання поверхонь та час контакту поверхні деталі і притиру.

Тому можливо припустити, що нерівномірність зняття припуску по профілю деталі і нерівномірність показників шорсткості та некруглості у різних перетинах сферичної поверхні обумовлені такими факторами: стабільність положення зони обробки відносно профілю деталі (рис. 1, а), нерівномірність нормального тиску (рис. 1 б), та нерівномірність швидкості ковзан-ня поверхонь (рис. 1, в) в зоні обробки [3].

Внаслідок нерівномірності зняття припуску по профілю деталі виникає необхідність збільшення припуску і, як наслідок, загального часу на обробку сферичної поверхні. Вирівняти швидкість зняття матеріалу на різних ділянках можливо за рахунок вирівнювання нор-мального тиску, швидкості ковзання поверхонь та часу контакту поверхонь деталі і притиру в зоні обробки як окремо кожного, так і їх комбінуванням.

На основі аналізу недоліків та переваг існуючих схем формоутворення сферичних по-верхонь та патентних матеріалів запропоновано новий спосіб алмазного доведення кераміч-них головок ендопротезів суглобів методом «вільного притирання». Цей спосіб спрямований на вирівнювання швидкості зняття матеріалу по профілю деталі за рахунок вирівнювання нормального тиску в зоні обробки та вирівнювання добутку швидкості ковзання і часу кон-такту поверхонь.

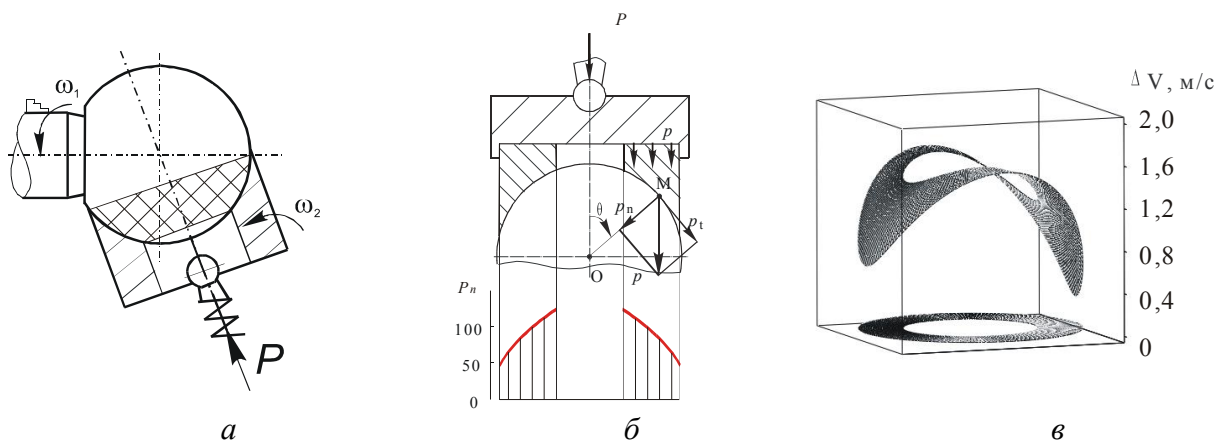


Рис. 1. Особливості технології алмазного доведення головок ендопротезів: по-ложення зони обробки (а); розподілення нормального тиску (б) та швидкості ковзання (в) в зоні обробки.

Для вирівнювання нормального тиску в зоні обробки, обумовленого кривизною оброблюваної деталі, створено нову конструкцію розрізного притиру – цанги, за допомогою якого нормальний тиск у порівнянні з використанням базового притира (рис. 1, б) в зоні обробки вирівнюється в 1,8 раза [7]. Для усунення нерівномірності швидкостей ковзання поверхонь в зоні обробки та стабільного положення зони обробки відносно профілю деталі (рис. 1, а і 1, в), запропоновано схему алмазного доведення [8–9] з обертанням деталі навколо двох осей, що перетинаються в центрі деталі. Це дозволить змінювати під час обробки положення зони контакту притиру відносно оброблюваної сферичної поверхні, що сприятиме зміні швидкостей ковзання поверхонь у різні фази обробки та зміні часу контакту робочої зони притиру з окремими ділянками сферичної поверхні деталі. Нова схема алмазного доведення реалізується спеціальним при строєм (рис. 2), який складається з таких елементів: 1 – оправка; 2 – додаткова вісь обертання деталі; 3 – головка ендопротеза; 4 – притир; 5 – шарнір; 6 – передатний механізм; ω_0 , ω_1 , ω_2 – кутові швидкості обертання відповідно оправки, деталі й притира; α та β – кути розташування осей обертання притира і деталі.

Для визначення значень кутів α та β і передатного відношення між швидкістю обертання осі оправки і швидкістю обертання осі деталі запропоновано математичну модель процесу алмазного доведення сферичної поверхні, яка дозволяє визначити швидкість зняття матеріалу по профілю деталі. При розробці математичної моделі враховували такі фактори: швидкість ковзання поверхонь та нормальний тиск у зоні контакту; час контакту притира і деталі.

В основу математичної моделі лягла емпірична залежність швидкості зняття матеріалу від нормального тиску та швидкості ковзання поверхонь. Для визначення цієї залежності

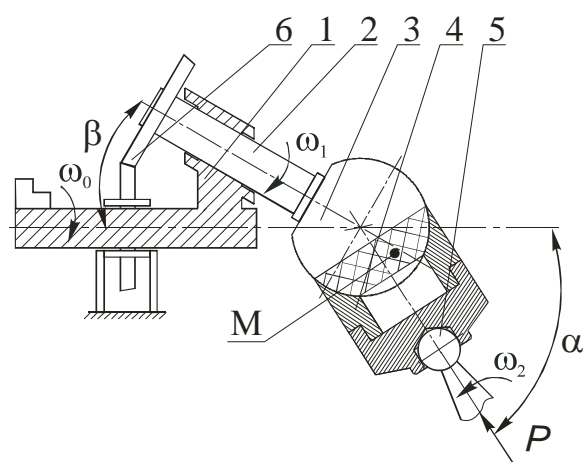


Рис. 2. Схема алмазного доведення з обертанням деталі навколо двох осей.

проведено експерименти з використанням рототабельного планування другого порядку на керамічних зразках циліндричної форми з ZrO_2 за методикою тертя торця диска зразка об торець диска притира з СЧ–25 [9]. При цьому параметри змінювались у таких межах: швидкість ковзання поверхонь $\Delta V = 0,08 - 1,92$ м/с та нормальний тиск у зоні контакту $P = 9,8 - 250$ кПа, а як параметр, що вимірюється, використали лінійний знос керамічного зразка. На основі розрахунку експериментальних даних визначено емпіричну залежність швидкості зняття матеріалу від нормального тиску та швидкості ковзання, а також побудовано графік (рис. 3).

$$Q_v = b_0 + b_1 \cdot \frac{P - 130}{85} + b_2 \cdot \frac{\Delta V - 1,0}{0,65} - b_{12} \cdot \frac{P - 130}{85} \cdot \frac{\Delta V - 1,0}{0,65} + b_{11} \cdot \left(\frac{P - 130}{85} \right)^2 - b_{22} \cdot \left(\frac{\Delta V - 1,0}{0,65} \right)^2 \frac{m}{xv}, \text{ де}$$

$$b_0 = 0,0000238002;$$

$$b_1 = 0,00000822349;$$

$$b_2 = 0,000000523834;$$

$$b_{12} = 0,0000006;$$

$$b_{11} = 0,00000182531;$$

$$b_{22} = 0,00000107557.$$

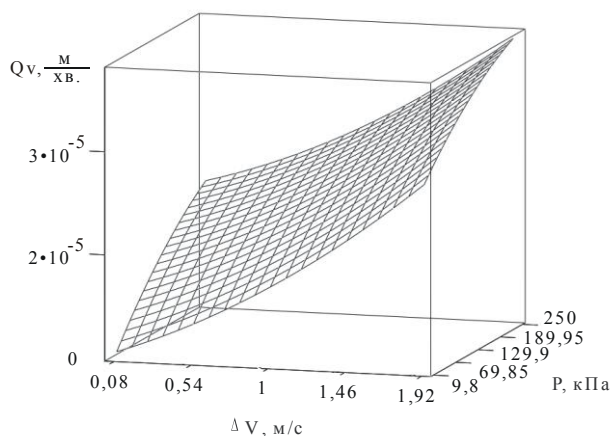


Рис. 3. Графік залежності швидкості зняття матеріалу від нормального тиску та швидкості ковзання.

Дана емпірична залежність лягла в основу математичної моделі, з її допомогою розраховано швидкість зняття матеріалу для кожної ділянки зони обробки. За результатами математичного моделювання було побудовано графік швидкості зношування матеріалу по профілю деталі (рис. 4) у разі обробки головки ендопротеза за базовою технологією (рис. 1, а).

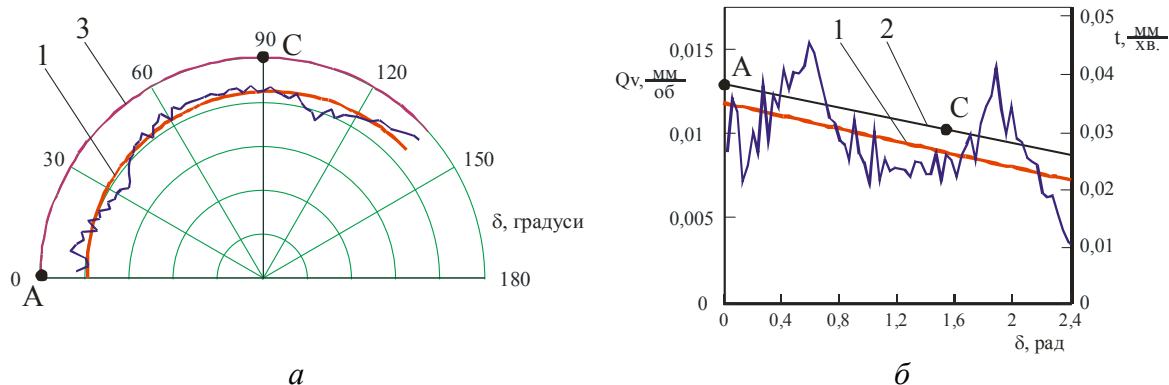


Рис. 4. Швидкість зняття матеріалу деталі при алмазному доведення для базового варіанту: в полярних (а) та лінійних (б) координатах.

Графік представлений на рис. 4, б представляє розгортку сферичного профілю деталі в лінію.

Лінія 2 відображає зняття матеріалу t головки ендопротеза по профілю деталі та побудована на основі експериментальних вимірів зняття матеріалу в точці А, що лежить на вершині, та точці С, що лежить на найбільшому радіусі, перпендикулярному до осі обертання сферичної поверхні. Лінія 1 представляє апроксимацію 1-го порядку теоретично розрахованої кривої зносу матеріалу головки ендопротеза по профілю деталі. Як видно, в обох випадках спостерігається однакова тенденція зняття припуску.

Лінія 3 на рис. 4, а представляє переріз ідеальної сферичної поверхні. Якщо порівняти відстань між лінією 1 і лінією 3 у точках А та С, то видно явну тенденцію до переважного зняття припуску на вершині деталі.

Для визначення оптимальних значень факторів, q , α , β , за яких вирівнюється швидкість зношування матеріалу по профілю деталі, проведено теоретичне дослідження математичної моделі.

Спочатку було визначено значення передатного відношення частоти обертання оправки та деталі q . Виходячи з умови, щоб під час обробки не з'являлися ділянки на сферичній поверхні деталі, які не були в контакт з притиром, встановлено значення $q = 1,7$.

Далі було визначено зону 1 – можливих значень кутів α та β (рис. 5), – зону, в якій можливе взаємне розташування осей деталі і притира. Якщо значення кутів α та β знаходяться вище зони 1, то в процесі обертання оправки край притиру буде перетинатися з віссю деталі; коли значення кутів α та β знаходяться нижче зони 1, на сферичній поверхні деталі з'являються зони, в яких немає контакту з притиром і тому вони не обробляються.

Для визначення оптимальних значень кутів α та β , зону 1 розбито сіткою таким чином, щоб крок кута β становив 4° , а значення кута α встановлювали, виходячи з умови, щоб крайні значення знаходилися на верхній й нижній лініях, а всередині зони вони були рівномірно розподілені і наближені до 4° . Далі в вузлових точках сітки було проведено експерименти за допомогою математичної моделі. При цьому визначали два параметри: коефіцієнт швидкості зняття матеріалу по профілю деталі K_Q , що характеризує відношення мінімальної швидкості зняття припуску до максимальної, та коефіцієнт рівномірності швидкості зняття матеріалу по профілю деталі Kr_Q , що характеризує відношення швидкості зняття матеріалу на вершині і периферії сферичної поверхні деталі. При цьому значення коефіцієнта Kr_Q має прямувати до 1, а значення коефіцієнта K_Q бути по можливості максимальним.

Результати дослідження, проведеного за допомогою математичної моделі, представлені на рис. 6, де пряма лінія відображає ізолінії значень коефіцієнта Kr_Q , а пунктирна лінія – значення коефіцієнта K_Q .

З рис. 6 видно, що для забезпечення еквідистантного зняття припуску, тоді коли оброблювана заготовка має форму, наближену до сферичної, або виражену яйцеподібну форму в напрямку, перпендикулярному осі обертання деталі, значення кутів α та β має відповідати лінії, при якій $Kr_Q = 1$. Щоб забезпечити переважне зняття припуску на периферії деталі, треба, щоб значення кутів α та β знаходились правіше лінії 1, тобто значення $Kr_Q < 1$. А для забезпечення зняття припуску переважно на вершині деталі треба, щоб значення кутів α та β перебували лівіше цієї лінії, тобто $Kr_Q > 1$, причому чим далі від лінії, тим інтенсивніше зняття припуску на вершині деталі.

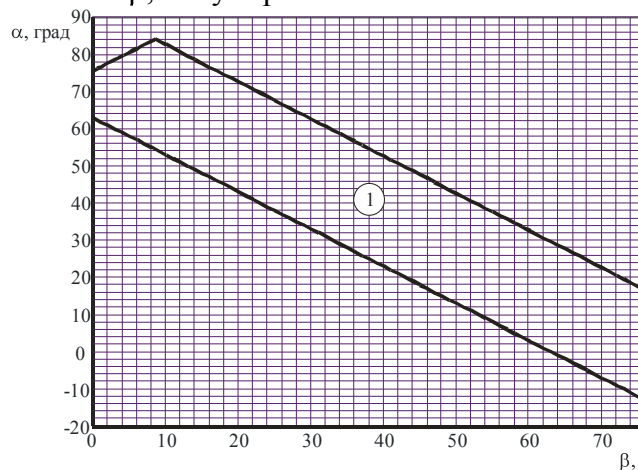


Рис. 5. Зона можливих значень кутів α та β

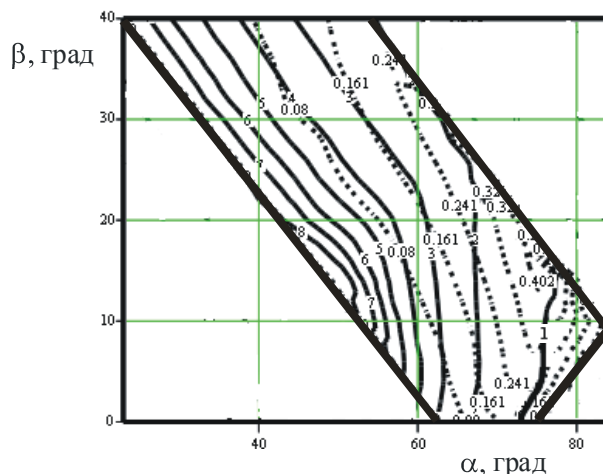


Рис. 6. Вплив розташування кутів α та β на характер зняття припуску.

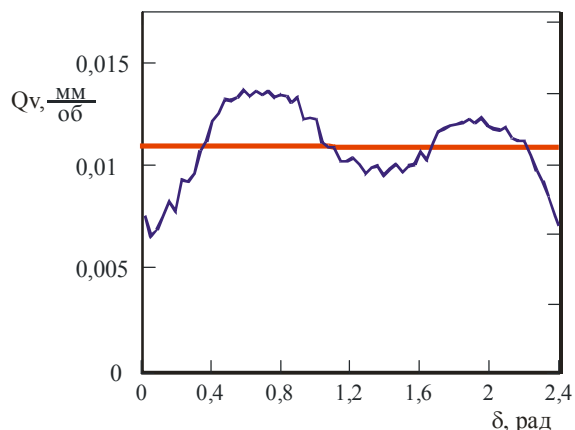


Рис. 7. Швидкість зняття матеріалу деталі при алмазному доведенні з обертанням деталі навколо двох осей.

За допомогою рис. 6 після зіставлення ізолінії коефіцієнтів Kr_Q та K_Q визначено значення $\alpha = 76,8^\circ$ та $\beta = 18,6^\circ$, за яких спостерігається тенденція вирівнювання швидкості зношування матеріалу по профілю деталі (рис. 7), а значення коефіцієнтів відповідно дорівнюють: $Kr_Q = 1$ і $K_Q = 0,482$. З рисунка видно, що в порівнянні з базовою технологією (рис. 4) має місце тенденція вирівнювання швидкості зняття матеріалу по профілю деталі. Це ми пов'яжемо з вирівнюванням контактного тиску в зоні обробки і перерозподілом швидкостей ковзання в зоні обробки по сферичній поверхні деталі.

Розподіл модуля швидкості ковзання поверхонь залежно від кута β змінюється в процесі обертання оправки. На рис. 8 представлені найхарактерніші їх значення через 1/8 оберту оправки (один цикл).

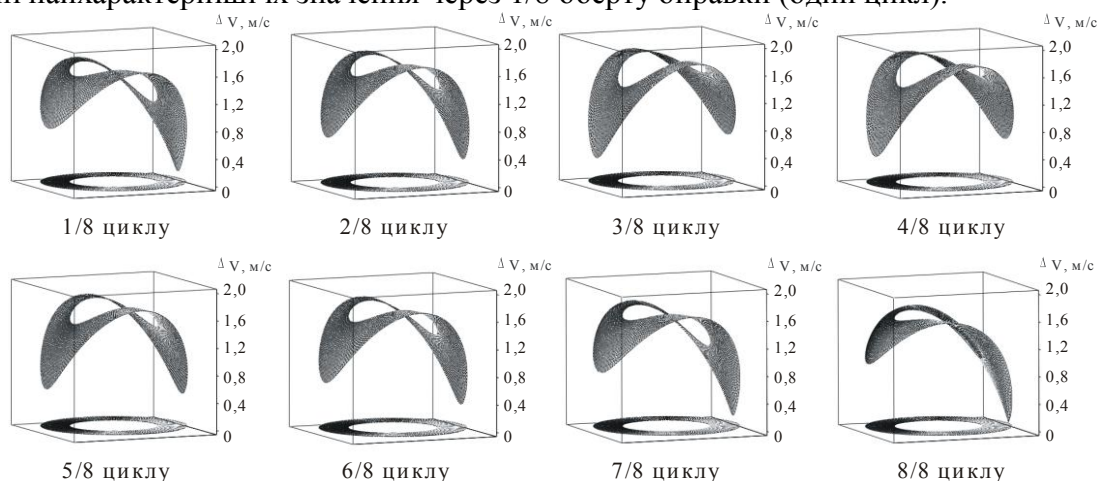


Рис. 8. Розподілення швидкості ковзання поверхонь в зоні обробки за один оберт оправки.

Як видно (рис. 1, в та рис. 8), має місце перерозподіл швидкостей ковзання по сферичній поверхні головки за рахунок як зміни положення мінімального значення швидкості ковзання відносно осі обертання деталі, так і зміни абсолютних значень.

У зв'язку з виготовленням ортопедичних головок ендопротезів з нових керамічних матеріалів медичного призначення виникає необхідність вивчення впливу матеріалу притиру і алмазної пасти на шорсткість обробленої поверхні та продуктивність обробки.

Дослідження залежності продуктивності доводки кераміки ZrO_2 від контактної тиску показало, що за низького тиску (27 кПа) продуктивність доводки цирконієвої кераміки практично не залежить від твердості притиру. Проте за збільшення тиску з 27 до 270 кПа продуктивність доводки зростає пропорційно твердості притира, причому чим вище нормальний тиск, тим вище продуктивність. В діапазоні тисків 180–270 кПа, що відповідає рівню тисків при доведенні керамічних головок ендопротезів, найвищу продуктивність доведення кераміки ZrO_2 показав притир із сірого чавуну марки СЧ–25 твердістю НВ 241.

В результаті дослідження залежності продуктивності обробки від швидкості ковзання поверхонь виявлено, що швидкість зношування матеріалу деталі має лінійну залежність від швидкості ковзання поверхонь. Зі збільшенням швидкості різання швидкість зношування матеріалу зростає. Причому для притирів, виготовлених із різних марок сірого чавуну, ця залеж-

ність різна. Для сірого чавуну СЧ–25 спостерігається найбільша тенденція зростання швидкості зношування матеріалу, а для сірого чавуну СЧ–10 – мінімальна. Також слід зазначити, що при швидкості різання близько 0,5 м/с різниці в продуктивності обробки деталі притирами із сірого чавуну різної твердості не спостерігається.

Вимірювання шорсткості обробленої поверхні показало, що найнижчу шорсткість обробленої поверхні забезпечує притир із сірого чавуну марки СЧ–10, причому спостерігається пропорційна тенденція збільшення шорсткості поверхні зі збільшенням твердості притиру. Експериментальні дані впливу зернистості алмазної пасти на шорсткість поверхні свідчать, що обробку слід закінчувати алмазною пастою зернистістю АСМ 2/1.

Таким чином встановлено, що мінімальна шорсткість обробленої поверхні забезпечується при використанні притиру з сірого чавуну СЧ–10 та алмазної пасти зернистості АСМ 2/1 [10].

Для дослідження можливості практичного застосування результатів роботи було оброблено пробну партію керамічних головок ендопротезів тазостегнового суглоба, для якої виміряні показники Ra шорсткості поверхні та сферичність.

Результати вимірів показали, що головки, оброблені з обертанням деталі навколо однієї осі, мають параметр Ra шорсткості поверхні, виміряний в напрямку, перпендикулярному до осі обертання деталі в межах 0,021 – 0,024 мкм, на вершині – у межах 0,037 – 0,059 мкм. Сферичність перебуває в межах 0,6 – 0,8 мкм для перетину, перпендикулярно осі обертання, і в межах 1,7 – 2,8 мкм, під кутом 45° до осі обертання головки.

Головки, оброблені за новим способом алмазного доведення з обертанням деталі навколо двох осей, мають наступні показники: параметр Ra шорсткості виміряний в напрямку перпендикулярному до осі обертання деталі перебуває в межах 0,013 – 0,020 мкм і в межах 0,014 – 0,019 мкм на вершині головки. Сферичність перебуває в межах 0,4 – 0,8 мкм для перетину, перпендикулярно до осі обертання, і в межах 0,7 – 0,9 мкм під кутом 45° до осі обертання головки.

Таким чином, у порівнянні з базовою технологією, новий спосіб обробки керамічних головок ендопротезів забезпечує підвищення якості обробки сферичної поверхні на 20 – 30 % і більш високу стабільність показників шорсткості й сферичності на всій сферичній поверхні головки ендопротеза.

Література

1. Эндопротезирование при заболеваниях и последствиях поврежденных тазобедренного сустава / А. А. Лобенко, А. Н. Поливода, А. М. Игнатъев и др. // Вісн. ортопед., травматол. та протезув. – 2000. – № 2. – С. 10 – 12.
2. Герасименко С. І. Ортопедичне лікування ревматоїдного артрита при ураженнях нижніх кінцівок. – К.: – Преса України, 2000. – 159 с.
3. Сохань С. В. О поле скорости резания при абразивной обработке деталей шарообразной формы // Сверхтв. материалы. – 1999. – № 5. – С. 49 – 56.
4. Цеснек Л. С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 263 с.
5. Орлов П. Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. – М.: Машиностроение, 1988. – 383 с.
6. Зубаков В. Г. Технология оптических деталей: Учебник / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель: Под ред. М. Н. Семибратова. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
7. Розенберг О. А., Сохань С. В., Пузырьов А. Л. Выравнивание съема припуска при алмазной доводке деталей типа усеченный шар из керамики // Вісник Сумського держ. унів. – 2005. – № 11 (83) – С. 136 – 141.
8. Деклараційний патент на корисну модель UA 11151 U, B24B11/10. Спосіб обробки сферичних поверхонь/ Розенберг О. О., Сохань С. В., Возний В. В., Пузырьов О. Л.; Ін-т надтв. матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України. – Заявл. 30.05.5005, Опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.

9. Деклараційний патент на корисну модель UA 11738 U, B24B11/10. Спосіб обробки сферичних поверхонь/ Розенберг О. О., Сохань С. В., Пузырьов О. Л.; Ін-т надтв. матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України. – Заявл. 30.05.5005; Опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1.
10. Розенберг О. А., Сохань С. В., Пузырёв А. Л. Влияние материала притира на производительность алмазной доводки керамических материалов медицинского назначения // Сверхтв. материалы.– 2005. – № 5. – С. 71 – 78.

Поступила 25.06.07.