

УДК 621.9.06

Сергій Струтинський, канд. техн. наук;
Андрій Гуржій, канд. техн. наук

НТУУ «Київський політехнічний інститут»

ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБЛЕННЯ ІННОВАЦІЙНОЇ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ У ВИГЛЯДІ СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ ПРОСТОРОВИХ СИСТЕМ ПРИВОДІВ

Резюме. Розроблено технологічний процес виготовлення ефективних сферичних шарнірів просторових систем приводів. Він базується на формуванні сферичних поверхонь шарніра з металполімерного композиту. Процес апробовано при виготовленні дослідного зразка шарніра. Досліджено геометрію та хімічний склад виготовлених сферичних поверхонь. Визначено кількісні характеристики мікропрофілю та побудовано його математичну модель у вигляді двовірного ряду Фур'є. Встановлені статистичні характеристики мікропрофілю обробленої поверхні. За результатами досліджень розроблено оригінальну конструкцію аеростатичного шарніра з магнітним силовим зв'язком.

Ключові слова: сферичний шарнір, метал полімер, технологія, поверхня, мікропрофіль, конструкція шарніра.

S. Strutynsky, A. Gurzhij

TECHNOLOGY IN DEVELOPING THE INNOVATIVE ELEMENT BASE IN THE FORM OF SPHERICAL HINGES FOR THE SPATIAL DRIVES SYSTEM

Summary. The technological process of manufacturing the effective spherical joints of the spatial drive systems was developed. It is based on the formation of spherical surfaces of the hinge using the polymer-metal composite. The hinge has a body in the form of a ring magnet with an inlet pipe for the air. The spherical surfaces of the body are formed using the polymer-metal composite, which is applied to the surface of the sphere in the state of a paste which contacts with the edge spacers of magnet through the spacer. After the composite is hardened, the second spherical surface is formed. On the generated spherical surfaces the pockets and the grooves for the aerostatic support are formed. The process was tested during the manufacturing of a hinge prototype. The high quality of manufactured spherical surfaces of the hinge was confirmed. The geometry and the chemical composition of the manufactured spherical surfaces were studied. The quantitative microprofile characteristics were identified and its mathematical model was built in the form of two-dimensional Fourier series. The statistical microprofile characteristics of the surface were established. That is, the shape and the size of microprotrusions on the polymer-metal composite surface were defined. The high quality performance of the surfaces and their efficiency while working in the liquid friction pairs was confirmed. Based on the results of the research the original aerostatic hinge design with a magnetic power connection was developed.

The hinge has a wide range of transverse angular movements (240° and above). The magnetic power connection is provided by the means of the circular and the cylindrical magnets the end faces of which interact with ferromagnetic sphere floating hinge through the layer of polymer-metal composite.

Key words: spherical hinge, polymer-metal, technology, surface, microprofile, the hinge design.

Вступ. Просторі системи приводів включають комплектні приводи, з'єднані шарнірами. Традиційно застосовуються карданні шарніри на опорах кочення. Вони мають низьку демпфуючу здатність та недостатню довговічність. Альтернативним варіантом є застосування безконтактних сферичних шарнірів – гідростатичних або аеростатичних. При цьому суттєво підвищується точність і довговічність шарнірів.

Шарнір набуває здатності демпфувати високочастотні коливання в системі приводів. Таким чином, розроблення сферичних шарнірів рідинного тертя є актуальним.

Проблема в загальному вигляді полягає у вирішенні питань технологічного забезпечення розроблення шарнірів зі сферичними поверхнями високої точності.

В останніх дослідженнях і публікаціях [1, 2] наведені схемні рішення сферичних шарнірів рідинного тертя. Вказано, що основні технологічні труднощі пов'язані з виготовленням охоплюючих сферичних поверхонь [3]. Найвні конструктивні рішення не дозволяють реалізувати шарніри з необхідними діаметральними зазорами сферичних поверхонь [4]. Тому зроблено висновок, що в рамках існуючих технологічних можливостей реалізувати ефективний сферичний шарнір неможливо [5].

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка сферичних шарнірів на основі запропонованих новітніх технологій.

Мета досліджень – розроблення ефективної технології виготовлення високоточних сферичних шарнірів рідинного тертя, які є інноваційною елементною базою просторових систем приводів. Для досягнення даної мети поставлені й вирішені завдання розроблення та практичної реалізації на дослідних зразках технології виготовлення сферичного шарніра з металполімерного композиту й дослідження особливостей виготовлення сферичних поверхонь із визначенням їх характеристик.

Виклад основного матеріалу досліджень. Розроблена інноваційна елементна база просторових систем приводів включає сферичні шарніри рідинного тертя. Вони створені на основі новітніх технологій, зокрема технології формування точних сферичних поверхонь із металполімерного композиту [6]. Розроблений дослідний зразок шарніра включає корпус у вигляді кільцевого постійного магніта 1, порожнина якого заповнена металполімерним композитом 2 (рис. 1 а).

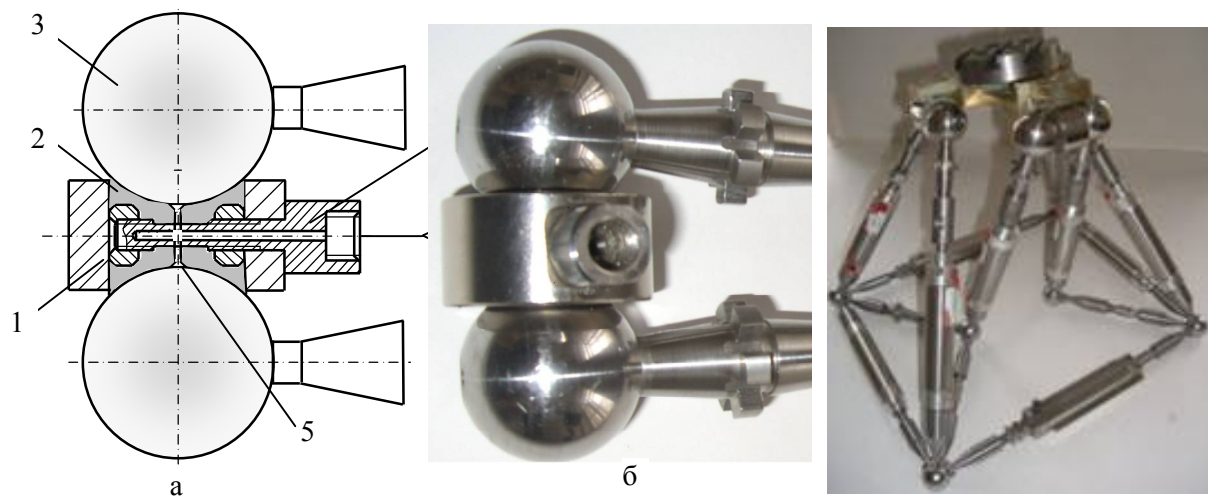


Рисунок 1. Схема комплектного подвійного аеростатичного магнітного шарніра (а) та виготовлений дослідний зразок шарніра (б) й система приводів із розробленими шарнірами (в)

Figure 1. The scheme of the bundled double aero static magnetic hinge (a) and the manufactured hinge prototype (б) and the drive system with the developed hinges (в)

Із першою I та другою II сферичними поверхнями композита взаємодіють феромагнітні сфери 3 із хвостовиками, що з'єднані з приводами. В боковій стінці корпусу шарніра виконано отвір, в який вміщено патрубок 4. Він служить для підведення повітря до аеростатичних опор шарніра, які мають дросельні отвори 5.

Шарніри виготовлено в якості дослідних зразків (рис. 1 б) і використано в просторовій системі приводів (рис. 1 в).

Розроблено спеціальну технологію виготовлення шарніра із застосуванням розробленої оснастки. Технологія включає кілька етапів, зокрема: формування першої сферичної поверхні шарніра I; механічну обробку дросельного отвору; формування другої сферичної поверхні II; доводочну операцію (притирання) отриманих сферичних поверхонь; механічну обробку сферичних поверхонь для формування порожнин і каналів аеростатичних опор на сферичних поверхнях.

Для формування першої сферичної поверхні I на корпус шарніра М із патрубком встановлюється проставка П із немагнітного матеріалу (латунь) (рис. 2 а).

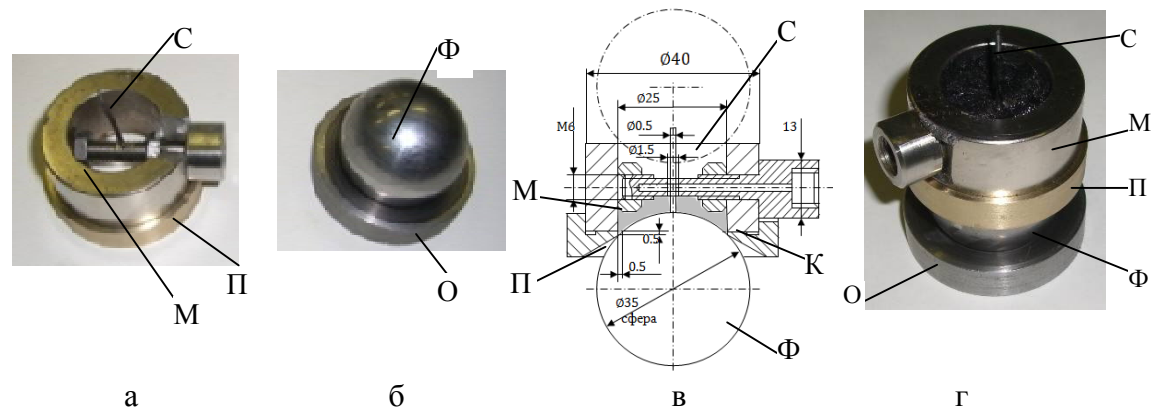


Рисунок 2. Технологічні операції з формування першої сферичної поверхні шарніра: а – встановлення проставки П на корпус шарніра та стрижня С в отвір патрубка; б – точна куля, по якій формується сферична поверхня I; в – геометричні розміри, що визначають розташування шарніра і кулі; г – нанесення металополімера в отвір магніта, який встановлено на кулі

Figure 2. The technological operations to form the first spherical surface of the hinge: a – the installation of spacer П on the hinge body and the rod С in the pipe hole; b - the precise ball on which the spherical surface I is formed; c - geometric dimensions that determine the location of the hinge and the ball; d – applying the polymer-metal into the hole of magnet which is set on the ball

В отвір патрубка вміщується калібрований стрижень С, який призначений для формування отвору в композиті. В подальшому корпус і проставка встановлюються на точній кулі Ф [7] (рис. 2 б). Куля має відхилення від сферичності в межах 1мкм і розміщується на кільцевій основі О. Геометричні розміри елементів шарніра й оснастки вибрані таким чином, щоб забезпечити формування ділянки сферичної поверхні в порожнині корпусу М і виключити механічний контакт корпусу і кулі (рис. 2 в).

Для формування сферичної поверхні I проводиться підготовка поверхонь корпусу і кулі. Дані поверхні очищаються і знежирюються. Поверхня кулі змащується спеціальною рідиною (розділювачем) з метою запобігання адгезії металополімеру і поверхні кулі.

Металполімерний композит у пастоподібному стані наноситься на поверхню кулі в області отвору корпусу. Заповнюється близько 45% об'єму отвору корпусу до рівня патрубка (рис. 2 г). При цьому стрижень С знаходиться в об'ємі композиту і контактує з поверхнею кулі. Після застигання композиту в отворі корпусу утворюється поверхня, яка з високою точністю повторює вихідну сферичну поверхню. Куля Ф відділяється від заготовки шарніра, видаляється стрижень С і знімається проставка П.

Другим етапом технологічного процесу є механічна обробка дросельного отвору в сформованій деталі. В результаті свердлувальної операції формується чорнова поверхня дросельного отвору діаметром $0,5 \pm 0,05$ мм.

Наступним третім етапом технологічного процесу (в разі необхідності) є формування другої II сферичної поверхні шарніра. Для цього в оброблений дросельний отвір $\varnothing 0,5$ мм встановлюється калібрований стрижень, який виступає за межі сформованої сферичної поверхні. На корпус з боку, протилежному уже сформованій сферичній поверхні I, встановлюється проставка П.

В заглибину корпусу вміщується необхідна кількість пастоподібного металполімерного композиту. Попередньо очищена й оброблена спеціальною рідиною (розділювачем) куля з основою (див. рис. 2 б) вводиться в отвір корпусу, витісняючи зайвий об'єм композиту до моменту контакту кулі з проставкою. Стрижень С при цьому контактує із поверхнею кулі. Після цього заготовка перевертається і корпус шарніра навантажується для забезпечення надійного притискання проставки до поверхні кулі. Після застигання композиту куля Ф відділяється від сформованої сферичної поверхні (рис. 3 а).

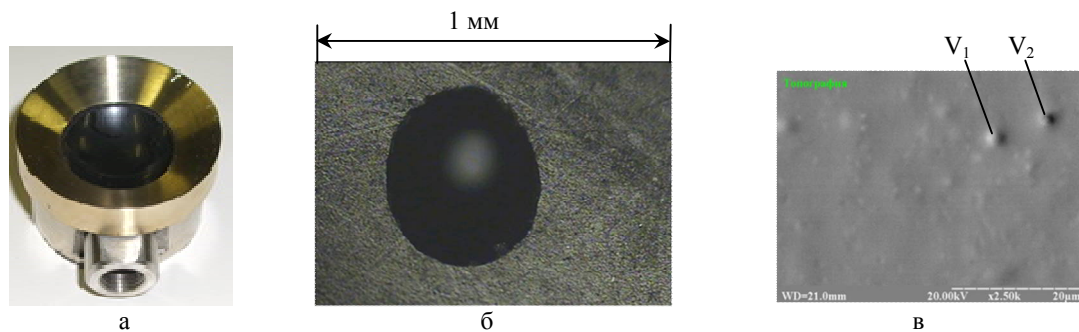


Рисунок 3. Сформована сферична поверхня шарніра (а), збільшене фото раковини, яка утворилася на сформованій сферичній поверхні (б), та електронна мікрофотографія поверхні з ізольованими мікровиступами V₁, V₂ (в)

Figure 3. Spherical joint surface which was formed (a) and the larger photo of shell that is formed on the spherical surface (б) and electronic micrograph of the surface with the isolated microprotrusions V₁, V₂ (в)

Проставка П знімається із корпусу, а стрижень С видаляється. Проводиться огляд отриманих сферичних поверхонь. Знімаються нерівні краї по контуру поверхні, при необхідності проводиться ліквідація дефектів і раковин. Раковини утворюються в незначній кількості, але можуть сягати розмірів 0,4 – 0,5 мм і більше (рис. 3 б).

Після шпаклювання раковин проводиться їх механічна обробка шляхом притирання. Для цього використовується куля, що застосована при формуванні поверхні. Операція притирання також ліквідує можливі мікродефекти поверхні, які мають вигляд ізольованих мікровиступів V₁, V₂ діаметром 2..3 мкм (рис. 3 в).

Металполімер легко піддається механічній обробці. Відповідно на сферичних поверхнях I і II шарніра виконуються отвори, заглибини і канавки, необхідні для реалізації аеростатичних опор (рис. 4).

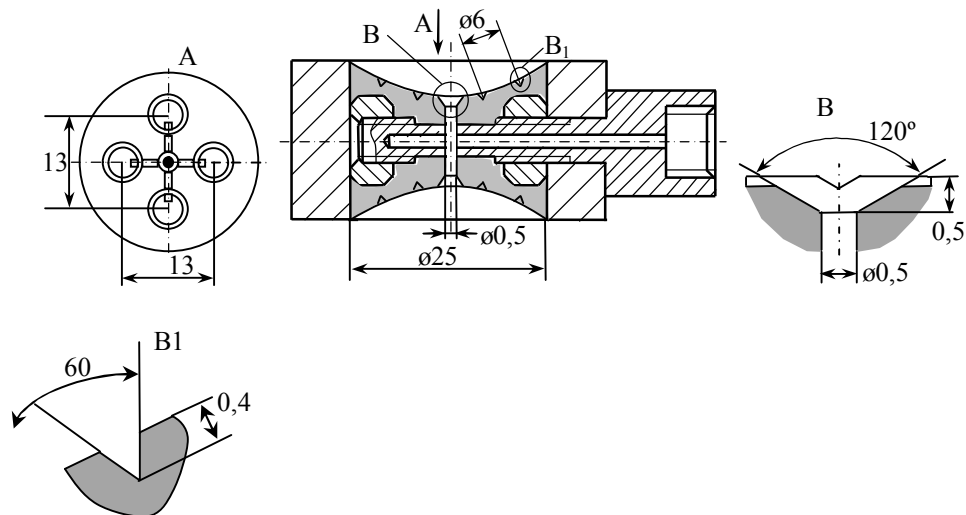


Рисунок 4. Отвори, заглибини і канавки, які виконуються на сформованій сферичній поверхні з металполімера при механічній обробці

Figure 4. Holes, depressions and grooves made on the formed spherical polymer-metal surface when machining

Механічна обробка отворів і канавок здійснюється традиційними методами технології машинобудування [8]. Фінішна механічна обробка поверхонь є завершальним етапом технологічного процесу. Вона включає остаточне притирання сферичних поверхонь з використанням точної кулі.

Проведено виготовлення дослідного зразка шарніра (див. рис. 1). Підтверджена ефективність запропонованої технології.

Сферичні поверхні з металполімерного композиту досліджені з використанням електронної мікроскопії. Композит має полімерну основу з включенням значної кількості кульок із заліза. Проведені дослідження поверхневого шару композиту (рис. 5).

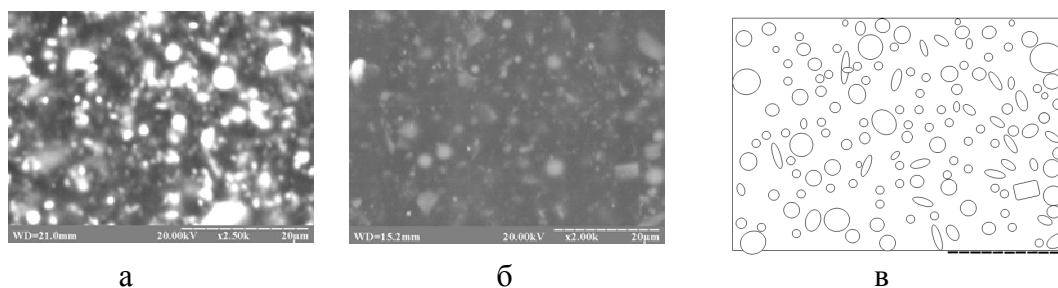


Рисунок 5. Електронні мікрофотографії сферичної поверхні композиту та визначення числа і розмірів металевих включень у поверхневому шарі: а – фото у прямих променях; б – фото у відбитих променях; в – калькування контурів металевих включень для визначення їх розмірів

Figure 5. The electron micrograph of the spherical surface of composite and determining the number and the size of metallic inclusions in the surface layer: a - photo in straight rays; b – photo in the reflected rays; c – tracing the contours of metallic inclusions to determine their size

Проведено статистичне опрацювання результатів вимірів і визначено гістограму частоти та закон розподілу по розмірах [9] металевих включень в поверхневому шарі сферичної ділянки поверхні (рис. 6 а).

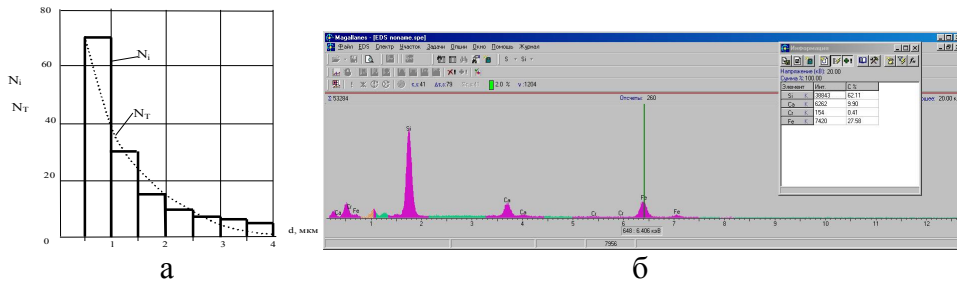


Рисунок 6. Результати статистичної обробки розподілу числа металевих включень по розмірах у поверхневому шарі композиту (а) та визначення хімічного складу композиту в характерній області поверхні (б)

Figure 6. The results of statistical analysis of the number of metallic inclusions on distribution sizes in the surface layer of the composite (a) and the determination of the chemical composition of in the typical composite surface area (б)

Встановлено, що закон розподілу числа металевих включень по розмірах достатньо точно відповідає експоненціальному закону $N_T = ae^{-b(d-d_m)}$, де $a=75..100$ 1/мм², $b=1,8..2,2$ 1/мкм, $d_m=0.4..0.5$ мкм.

Проведено визначення хімічного складу композиту на поверхні (рис. 6 б).

Встановлена наявність значного вмісту кремнію 30...70 % та заліза 20...50%. Проведені виміри мікропрофілю поверхні з композиту (рис. 7).

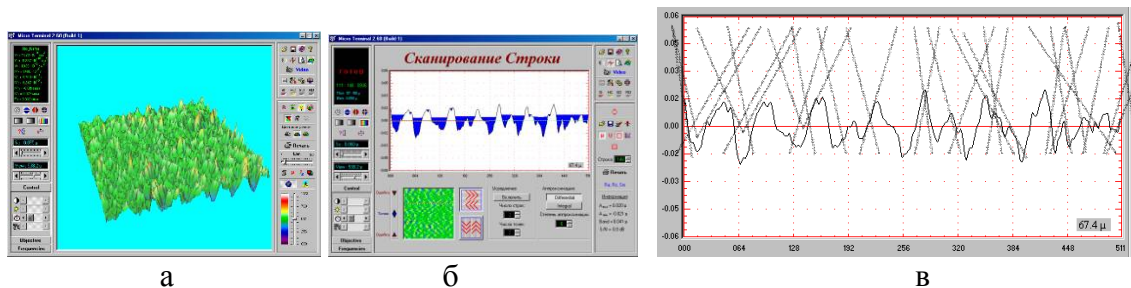


Рисунок 7. Експериментально виміряна топограма мікропрофілю сферичної поверхні шарніра із металополімерного композиту (а), характерний перетин мікропрофілю на якому показані дотичні до контура мікропрофілю по вершинах (б) та мастилоємність мікропрофілю (в)

Figure 7. Experimentally measured microprofile topogram of the spherical surface of the hinge made of metal polymer composite (a) and the microprofile typical cross section, where the tangent to the profile along the edges of the microprofile is shown (b) and oil capacity of the microprofile (c)

Експериментально визначена топограма мікропрофілю з композиту, описана аналітичним виразом у вигляді відрізка двомірного ряду Фурє

$$y(x, y) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=0}^{N_x} \sum_{m=0}^{N_y} a_{km} \cos(k\omega_x x + m\omega_y y) + b_{km} \sin(k\omega_x x + m\omega_y y).$$

Коефіцієнти ряду a_{km} , b_{km} – визначено на основі результатів вимірів. Для цього застосована спеціальна методика [10].

Для характерних перетинів мікропрофілю визначено його геометричні параметри. Зокрема, визначено мастилоємність мікропрофілю (рис. 7 б). Доведено, що

кількість мастила, яка знаходиться у мікровпадинах, складає 2...5% загального об'єму щілини між сферичними поверхнями. Відповідно рекомендовано здійснювати попереднє змащення поверхонь із металополімерного композиту при їх використанні в аеростатичних шарнірах.

Встановлено, що на сформованій поверхні наявна регулярна система мікровиступів (рис. 7 в). Це позитивно впливає на процес рідинного або газового змащення сферичних поверхонь тертя. Важливе значення при використанні поверхонь у шарнірах рідинного тертя мають статистичні характеристики випадкових кутів нахилу дотичних та відстань між виступами (рис. 8 а і б).

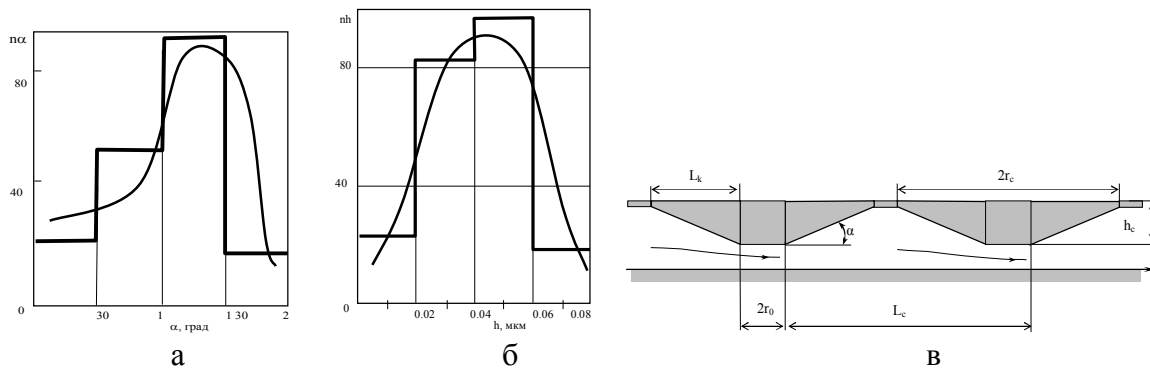


Рисунок 8. Гістограма розподілу кутів нахилу дотичних мікровиступів профілю (а) та розмаху мікровиступів (б) й ідеалізована схема осереднених мікровиступів на поверхні щілини сферичного шарніра з металополімерного композиту (в)

Figure 8. The angles tangential microprotrusions of the profile distribution histogram (a) and the microprotrusions spreading (b) and the idealized scheme of the averaged microprotrusions on the crack surface of the spherical hinge made of polymer-metal composite (c)

У результаті обробки гістограм визначено, що середній нахил дотичних складає $\alpha_c = 1^\circ 20'$, а середня висота мікровиступа $h_c = 0,05$ мкм. В результаті обґрунтовані розміри осереднених мікровиступів (рис. 8 в). Встановлено, що середній крок мікровиступів складає $L_c = 12...14$ мкм.

Результати проведених досліджень послужили основою для розроблення інноваційної конструкції магнітного шарніра рідинного тертя (рис. 9).

Сферичний шарнір містить корпус 1, в якому встановлена напіввісь 2 та рухома штанга 3 зі сферичною головкою 4, яка спряжена зі сферичною поверхнею торця напівосі. На спряженій зі сферою поверхні торця напівосі виконані розвантажувальні кармани 5, а на протилежному торці напівосі виконано компенсуючі кармани 6. Кількість карманів залежить від регламентованого навантаження на шарнір і складає три, чотири, п'ять, шість або більше. Розвантажувальні кармани 5 розташовані рівномірно по поверхні торця напівосі (рис. 9 б).

Порожнини відповідних розвантажувальних і компенсуючих карманів з'єднані між собою через дроселі у вигляді отворів 7 (рис. 9 а). Порожнини всіх компенсуючих карманів через дроселі у вигляді отворів 8 з'єднані з джерелом стисненого робочого середовища 9 (рідини або газу). Корпус має кришку 10, на яку спирається торець напівосі.

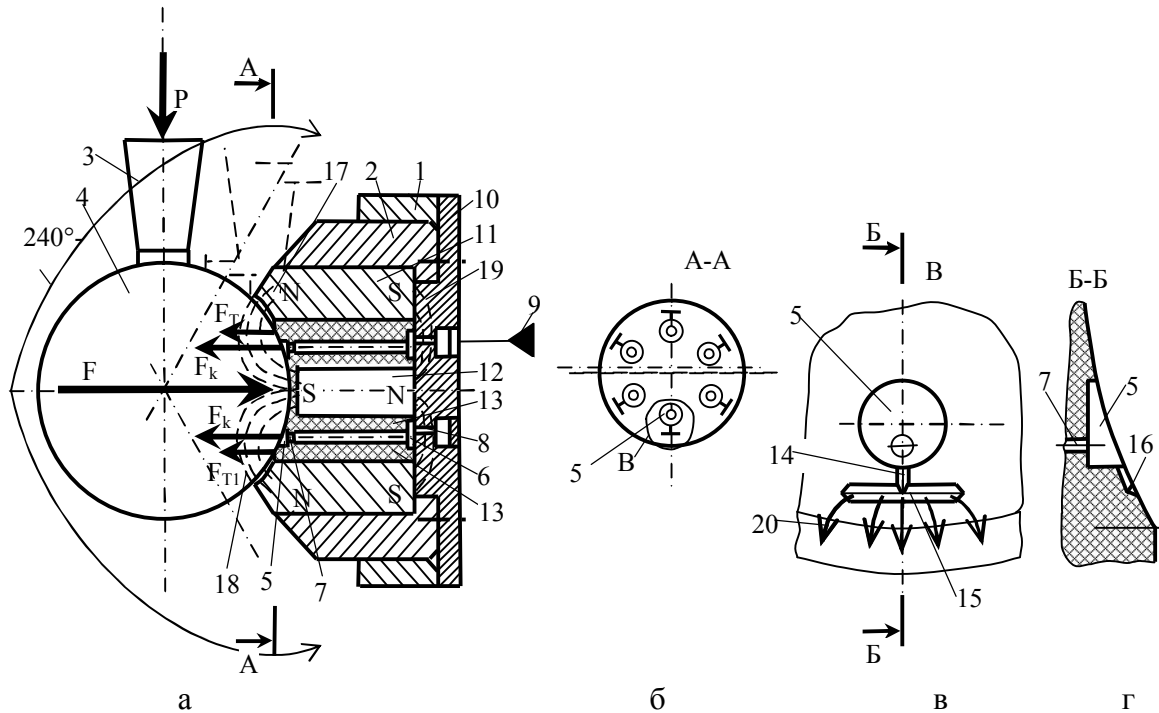


Рисунок 9. Розроблена конструкція аеростатичного шарніра з магнітним силовим зв'язком: а – перетин шарніра; б – розташування карманів для розвантаження опорної поверхні; в – форма окремого кармана; г – перетин кармана

Figure 9. The designed aerostatic hinge with a magnetic power connection: a – hinge cross section; b – disposition of pockets for unloading the bearing surface; c – shape of a separate pocket; d – posket cross section

Напіввісь виконана у вигляді двох концентрично розташованих магнітів кільцевого 11 та циліндричного 12, причому полюси магнітів N і S знаходяться на торцях магнітів та розташовані протилежно по довжині напівосі.

Кільцевий проміжок 13 між кільцевим і циліндричним магнітами заповнено немагнітним матеріалом, який утворює робочу поверхню торця напівосі. В якості немагнітного матеріалу застосовано полімерний композит із антифрикційними властивостями. Полімерний композит у пастоподібному стані вводиться в проміжок між магнітами і сферичною головкою. Після затвердіння полімерного композиту утворюється напіввісь у вигляді однієї деталі, в яку включено кільцевий і циліндричний магніти. Сферична поверхня торця напівосі формується по поверхні сферичної головки шарніра і має високу точність. Відхилення від сферичності поверхні торця напівосі складає 2 – 4 мкм. Після затвердіння полімерний композит обробляється. На поверхнях торця напівосі виконуються розвантажувальні та компенсуючі кармани, а в об'ємі напівосі виконуються необхідні отвори та канавки.

На сферичній поверхні торця напівосі виконано канавки у вигляді 2-х перехресних по Т-подібній схемі рисок, а саме: риски основи 14 та перпендикулярна їй риска 15 (рис. 9 в). Основа Т-подібної риски 14 з'єднана із розвантажувальним карманом 5, а риска 15 орієнтована в тангенціальному напрямку відносно напівосі. Форма перетину риски, як правило, трикутна 16 (рис. 9 г). Розміри рисок складають 0,5 – 0,8 мм. Торець кільцевого магніта 11 (рис. 9 а) з боку сферичної головки 4 штанги має сферичну поверхню 17, яка з гарантованим зазором взаємодіє із поверхнею сфери 4.

Кришка корпуса 10 виконана із феромагнітного матеріалу й одночасно контактує із торцями циліндричного 12 та кільцевого 11 магнітів.

Сферичний шарнір працює наступним чином. Корпус шарніра 1 закріплений нерухомо, а на рухомому штангу 3 діє навантаження P . У магнітах напівосі виникає магнітне поле із замкненими силовими лініями, які проходять через сферу 4 (силові лінії 18) та через кришку 10 (силові лінії 19). При цьому на сферу діє магнітна сила F , яка притискає її до торця напівосі. При підведенні стисненого робочого середовища (рідини або газу) від джерела 9 до компенсуючих карманів 6 та розвантажувальних карманів 5, у порожнинах вказаних карманів встановлюється тиск робочого середовища. Тиск середовища в компенсуючих карманах 5 створює сили тиску F_k на сферу 4, компенсуючи дію магнітної сили F і знижуючи контактне навантаження на сферичну поверхню торця напівосі.

Робоче середовище під тиском із кармана 5 через перетин риски 14 проходить в об'єм риски 15 і через зазор між сферою і поверхнею торця напівосі витікає назовні. Потік робочого середовища показано стрілками 20. При цьому на поверхні сфери в околиці риски 15 утворюється область підвищеного тиску, яка створює додаткову компенсуючу силу F_{T1} (рис. 9 а). Додаткова компенсуюча сила F_{T1} залежить від величини зазору між сферою 4 та сферичним торцем напівосі. При дію корисного навантаження P сфера зміщується в напрямку дії сили P_0 . Відповідно зазор між сферою і сферичним торцем напівосі в області кармана 5 зменшується, а збільшується зазор між сферою і торцем з протилежного боку. Тому сила F_{T1} буде більшою сили F_{T2} . Цим забезпечується ефективно сприйняття діючого навантаження P .

Розвантажувальні кармани 5 і дроселі 7 утворюють з поверхнею сфери 4 сферичну гідростатичну або аеростатичну опору. Компенсуючі кармани 6 призначені для компенсації зусиль, що діють на напіввісь 2. Площі карманів 5 і 6 підібрані таким чином, що при збільшенні навантаження на сферу 4 зусилля на піввісь з боку компенсуючих карманів 6 росте більш інтенсивно, ніж з боку розвантажувальних карманів 5. Це забезпечує необхідну жорсткість сферичного шарніра.

Висновки. Обґрунтовано й підтверджено можливість виготовлення деталей сферичного шарніра із металполімерного композиту шляхом формування сферичних поверхонь по точній кулі.

В поверхневому шарі поверхні з металполімерного композиту наявні сферичні металеві включення діаметром до 5 мкм, число яких залежно від діаметра розподілені по закону, близькому до експоненціального.

На топограмі поверхні з металполімерного композиту наявні регулярні мікроступи, близькі до зрізаних конусів, висота яких складає 2...3 мкм, а кут нахилу дотичної 2...3°. Це забезпечує формування раціональних умов змащення в сферичному шарнірі.

На основі проведених досліджень розроблено конструкцію аеростатичного магнітного сферичного шарніра, який має підвищений діапазон можливих поперечно-кутових положень, що складає 240° і вище й рекомендується в якості елементної бази просторових систем приводів.

Conclusions. The possibility of manufacturing parts of spherical hinge made from metalpolymer composite by forming spherical surfaces using accurate sphere was confirmed and grounded.

There are spherical metallic inclusions to 5 microns in diameter in the surface layer of the surface made from metalpolymer composite, the number of which depend on the diameter is approximately divided by the exponential law.

There are regular micro roughness on the surface topogram of the metalpolymer composite, the shape of which is close to the truncated cones whose height is 2...3 mkm and the angle of the tangent is 2...3°. It provides the formation of the rational conditions of lubrication in the spherical hinge.

Basing on the studies the construction of aerostatic spherical magnetic joint was developed, that has increased range of possible corner provisions, which is 240° and more and can be recommended as a component of spatial drives systems.

Дискусійні питання

Просторові системи приводів працюють у жорстких динамічних режимах. Найвний широкий частотний спектр вібрацій окремих елементів системи. Амплітуди високочастотних коливань, як правило, незначні. Розробники наявних конструкцій просторових систем приводів високочастотні вібрації вважають несуттєвими.

На нашу думку, високочастотні вібрації в просторових системах приводів є небажаними. Вони знижують динамічну точність систем, створюють умови для виникнення резонансних явищ, а відповідно знижують довговічність систем приводів. Знизити інтенсивність високочастотних вібраційних процесів можна, застосувавши в системах приводів безконтактні шарніри рідинного тертя, зокрема розроблені в рамках даного дослідження. Дискусійним питанням є доцільність застосування даних шарнірів у просторових системах приводів.

Список використаної літератури

1. Бушуев, В.В. Практика конструирования машин: справочник [Текст] / В.В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
2. Cammarata, A., Condorelli, D. & Sinatra, R. (2013). An algorithm to study the elastodynamics of parallel kinematic machines with lower kinematic pairs. ASME Transactions Journal of Mechanisms and Robotics, 5 (1)
3. Heisel U. Development of controllable spherical fluid friction hinges for exact spatial mechanisms / U. Heisel, S. Strutinskiy, V. Sidorko, Yu. Filatov, M. Storchak // Production Engineering – 2011 – Vol. 5. P. 241 – 250.
4. Подураев, Ю.В. Мехатроника. Основы, методы, применение. – 2-изд., перераб и доп. [Текст] / Ю.В. Подураев. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.
5. Струтинський, С.В. Просторові системи приводів: монографія [Текст] / С.В. Струтинський, А.А. Гуржій. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с.
6. Ищенко, А.А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами: учебное пособие. [Текст] / А.А. Ищенко. – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – 250 с.
7. Технология изготовления керамических шаров для применения в агрессивных средах // Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов [Текст] / А.А. Шепелев, В.Г. Сороченко, Б.Б. Гржибовский, Е.П. Поладько. – 2010. № 6 (131). – 64 – 65 с.
8. Кабаков, М.Г. Технология производства гидроприводов [Текст] / М.Г. Кабаков, С.П. Стесин. – М.: Машиностроение, 1974. – 192 с.
9. Пугачев, В.С. Введение в теорию вероятностей [Текст] / В.С. Пугачев. – М.: Наука, 1968. – 368 с.
10. Струтинський, В.Б. Тензорні характеристики мікропрофілю поверхонь, отриманих в результаті вібраційної обробки [Текст] / В.Б. Струтинський, І.В. Перфілов // Укр. міжвідомчий наук.-техн. збірник «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні» – 2011. – № 45 – С. 359 – 368.

Отримано 18.11.2015