

УДК 621:620.179.14

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.6.113298

Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, Т.Р. Клочко\*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**МОДЕЛЬ СТРУКТУРИ АКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ АБСТРАКТНОГО БІОТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТА**

**Background.** The article deals with the current problem of monitoring the metrological parameters of technological equipment with computer numerical control through the development of methods and means of express certification of the technological equipment coordinate system, which, in contrast to the existing, will be more economical and not inferior to the accuracy of the laboratory.

**Objective.** The aim of the paper is to create a method of compensation for the detected errors, which requires models of elementary forms that determine the formation of various types of the object surface structure regularity, in particular, modeling the object active surface formation in interaction with other objects.

**Methods.** The elementary volume form model of any abstract object and the energy processes that occur in it is proposed. It's proposed to choose to such extent the thickness of the surface layer, which determines the active properties of the surface.

**Results.** It was shown that the depth of the active surface determines the real size of the area and the minimum active volume of the abstract object active area. In considering all these processes, the difference between fluid deterioration and current destruction under the influence of external forces (environment) is determined. The interaction between the environment flow and the abstract object is quite a relative situation.

**Conclusions.** The primary classification of abstract biotechnical object surface elementary structures was created. A model of surface structure based on elementary forms that form the biotechnical object active area is proposed. This approach provides the opportunity to create the most sensitive area of object interaction.

**Keywords:** abstract object; models of elementary forms; surface structure; active area.

**Вступ**

Сучасні методи контролю технологічного обладнання з числовим програмним керуванням (ЧПК) або є недостатньо точними, або вимагають використання вартісного вимірювального обладнання. Крім того, вони дають змогу проводити лише вибракування обладнання за заданими параметрами. Тому актуальною є проблема забезпечення моніторингу метрологічних параметрів технологічного обладнання з ЧПК за допомогою розробки методів і засобів експрес-атестації координатної системи технологічного обладнання, які, на відміну від існуючих, будуть більш економічними та не поступатимуться у точності лабораторним. Наразі вирішення цієї проблеми не може бути реалізоване через відсутність елементарних фізичних понять про процес вимірювання координати. Рішення цієї проблеми дасть змогу продовжити ресурс обладнання з огляду на дотримання точності в межах його технологічних параметрів. Вимоги до нового діагностичного обладнання повинні враховувати особливості форми структур технічних і біологічних об'єктів (БО), які мають великий вплив на точність вимірювання та визначення координати об'єкта.

Наразі проблеми утворення активної поверхні об'єкта не досліджені достеменно [1–5], отже, необхідним є моделювання цієї поверхні для обґрунтування взаємодії з іншими біотехнічними об'єктами. Під активною частиною поверхні будь-якого об'єкта незалежно від його фізичного стану розуміємо елементарну частку об'єму, яка є повним еквівалентом загальної поверхні за своїми фізико-технічними та біологічними властивостями.

У [6, 7] авторами розглянуто низку властивостей поверхні під час визначення координат торкання різних абстрактних об'єктів (АО). Наразі було з'ясовано, що для кожного з відчутників АО існує критичний розмір  $S$  відстані між ними. Але поняття активної частини поверхні більш широкі, ніж просте розміщення відчутників для визначення розміру відстані між ними. Зазвичай поверхня, як вже згадувалося в [6], виконує функцію захисту, поглинання та відбиття енергії зовнішнього середовища [8]. У такому випадку первинною є проблема утворення форми поверхні певного АО. Саме на мікрорівні, що визначає шорсткість поверхні, виникає низка ефектів, пов'язаних з ефективністю використання мікропанданної зони об'єктів [6], які необхідно визначити для утворення

\* corresponding author: t.klochko@kpi.ua

структури площі відчутника з найбільшою чутливістю до вхідних параметрів торкання з іншими об'єктами.

### Постановка задачі

Метою досліджень є розробка методів і створення засобів введення корекції для компенсації виявлених похибок відтворення реальної поверхні, на відміну від уявної, для чого потрібними є моделі елементарних форм, які визначають утворення різного типу регулярності структури поверхні об'єктів.

### Методика дослідження поверхні абстрактного об'єкта

Розглянемо процес утворення активної площі поверхні АО, використовуючи ту ж саму методику, що і при дослідженні в [9]. Для цього виділяємо таку частину активної поверхні об'єкта, що її площа відповідає квадрату розміру товщини панданної зони. Вибір таких розмірів пояснюється тим, що всі активні процеси відбуваються саме в межах товщини поверхні, як це було показано в [6].

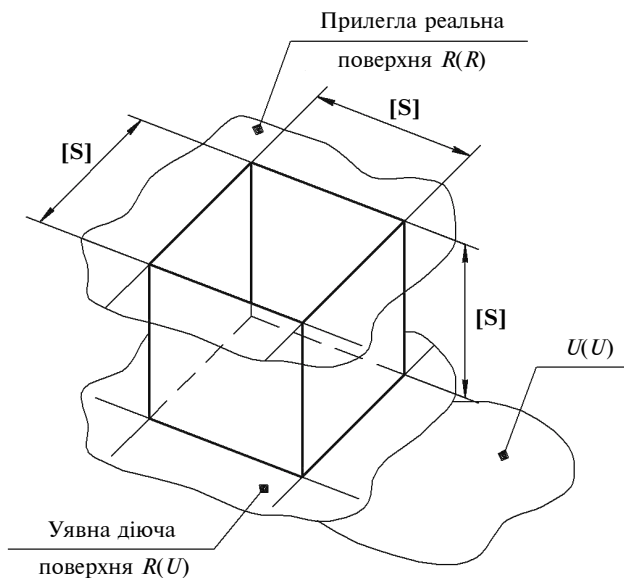


Рис. 1. Модель обмеження елемента панданної зони

Вважається, що поверхня АО повинна бути ідеально гладкою, тобто діюча поверхня буде складатися з дзеркально чистих елементів розміром  $[S]^2$  (рис. 1). Проте це досить-таки уявне явище, яке вкрай рідко трапляється серед відомих АО.

Більш поширені АО із шорсткими поверхнями, форма яких є наслідком або взаємодії у навколишньому середовищі, або необхідності пристосовуватися до нього [8]. Так, наприклад, у техніці найбільш чистими є поверхні плиток Йогансона або оптичних виробів, де в обох випадках необхідно мати високоякісні засоби взаємодії з навколишніми об'єктами. Але навіть тут іноді потрібно мати поверхню з регулярною шорсткістю, як, наприклад, лінзи Френеля. Абразивний інструмент теж вимагає чіткої поверхні за визначеною шорсткістю, інакше він просто не виконуватиме своїх функцій. Для БО цей показник є ще більш критичним. Покриття поверхні БО слизом вказує на те, що за певних обставин існування йому це необхідно, тоді як сама поверхня тіла покрита порами, які виділяють слиз. Вся поверхня тіла БО зазвичай вкрита порами, які мають подвійні властивості. З одного боку, вони поглинають корисні речовини з навколишнього середовища, які потрібні для існування, а з іншого, викидають назовні шкідливі продукти існування БО. Здавалося б, така частина БО, як око, повинна була б мати прозору монолітну оболонку (склеру), але вона теж має певну шпаруватість і сльозові залози, рідина з яких постійно змочує поверхню. Як наслідок, сили поверхневого натягу рідини допомагають склері мати добрі оптичні властивості та відповідну чистоту.

Отже, з цього скороченого розгляду можна зробити важливий висновок про те, що поверхня не обов'язково має бути ідеально рівною – вона має бути такою, як це потрібно для функціонування АО, тобто збігатися з формою технологічного фантому (ТФ). Відхилення форми ТФ призводить до скорочення ресурсу існування АО та її швидкої руйнації. Отже, для будь-якого АО дуже важливим є ефективне використання площі своєї поверхні. Поверхня як така є мірою витривалості ресурсу певного АО, тому її параметри є найбільш важливими з огляду на реальні умови існування об'єкта. Отже, оскільки ми за будь-якої ситуації маємо певну міру стосовно визначення фізичних параметрів об'єкта, то визначена постановка задачі вимагає від нас створення загальної системи вимірювання відносно параметрів поверхні АО. Наразі такою мірою може бути товщина поверхневого шару, яка обумовлює активні властивості поверхні. Як наслідок, глибина активної поверхні визначає реальний розмір площі та мінімального активного об'єму активної площі АО.

### Моделювання енергетичних процесів елементарного об'єму абстрактного об'єкта

Для реального простору існування АО ми вважаємо за доцільне створити модель елементарного об'єму у вигляді куба з ребром  $[S]$ , оскільки вона є оптимально наближеною до реальних фізичних процесів (див. рис. 1).

У цьому випадку виникають дві ситуації геометричного об'єму, який необхідно дослідити: ми маємо досліджувати площу та об'єм  $[S]^3$ . Водночас площа активного об'єму є плинною, залежною від вектора напрямку енергетичного струменя на визначену поверхню. Для того щоб оцінити ситуацію енергетичної віддачі та прийому інформаційного силового сигналу, скористаємося загальною теорією єдиного чутливого елемента [10], яка дає можливість розглядати поверхню як низку впорядковано розміщених відчутників.

Отже, як наслідок, маємо констатувати той факт, що в основі калібрування будь-якої визначеної поверхні АО можуть бути два параметри:

- площа поверхні  $[S]^2$  у межах об'єму  $[S]^3$ , яка визначається базовою стосовно енергетичного об'єму;
- об'єм елементарного об'єкта АО як одиниці граничної потужності сприймання зовнішнього потоку енергії випромінювання.

З урахуванням сказаного, маємо зорієнтуватися саме на ці параметри для подальшого фізико-математичного розгляду. Таким чином, орієнтуємося на опорну систему відліку з реакціями в  $[S]^2$  і  $[S]^3$ . Як уже згадувалося, поверхня будь-якого об'єкта утворюється таким чином, щоб бути максимально зорієнтованою відносно зовнішнього енергетичного потоку, тобто перпендикулярно нормальному вектору стосовно площини  $[S]^2$ . У такому випадку весь об'єм  $[S]^3$  буде зорієнтовано відносно цього вектора. Разом із цією ситуацією маємо два випадки, тобто: або енергетичний потік є паралельним нормальному вектору, або він має загальні розсіяння у просторі. За першого випадку зовнішню енергетику сприймає АО лише для форми куба (див. рис. 1).

За другого випадку все залежить від кута падіння енергетичного потоку на зовнішню поверхню ( $[S]^2$ ). Але за будь-якого випадку все буде обмежено площиною  $[S]^2$  та кутом її нахилу відносно вектора енергетичного потоку, тобто незалежно від форми поверхні всередині чарунки. Таким чином, за суворої векторної спрямованості енергетичного потоку ми маємо відносно низьку ефективність використання поверхні об'єкта, оскільки

ки в кубічній чарунці використовується лише частина внутрішньої поверхні.

Проте, наприклад для хімічних реакцій, дуже важливо мати велику площу поверхні в обмеженому просторі. Прикладом для техніки тут є акумулятори, а для тварин – легені або зябра у риб тощо. З огляду на це куб-чарунка (див. рис. 1) є ідеальною формою, внутрішня поверхня якої має площу  $[S]^2$ . Для інших форм поверхні це не є очевидним чинником, тому їх варто розглядати.

Отже, реальна діюча поверхня розміщується між прилеглою реальною поверхнею  $[R(R)]$  та уявною діючою поверхнею  $U(U)$  (див. рис. 1). Активна частина поверхні розміщується в межах від  $U(U)$  до  $R(R)$ . Відповідно до цього утворюється модель штучного об'єму  $[S]^3$ , де  $[S]$  – різниця між  $U(U)$  і  $R(R)$ .

Як вже зазначалось у [7], зовнішній енергетичний потік призводить до руйнування крайців АО до того рівня, який він вже не може здолати, тому необхідно згадати цю задачу відповідно конкретного випадку. Отже, якщо ми маємо окраєць АО товщиною  $[S]$ , яка відповідає товщині активної поверхні АО, то саме край цієї поверхні піддається дії інтенсивного руйнування. Тобто можемо уявити, що будь-яка умовна маса  $[m(U)]$  має руйнуватися під дією енергетичного потоку  $E_0$  до площини вздовж вектора його напрямку. Це критична поверхня, яка має можливість витримати навантаження такої енергії та не зруйнуватися. Ця ситуація є уявною, оскільки кожний АО виробляє таку форму своєї поверхні, яка огортається поверхневим шаром завтовшки  $[S]$ . Здебільшого всі замкнені поверхні АО мають здатність витримувати зовнішні енергетичні навантаження відповідно до умов середовища, в якому існує АО, а тому товщина поверхні має бути не менше  $[S]$ . Тобто ми розглядаємо цю ситуацію як суто уявну. Необхідно зауважити, що ситуація з прямокутною формою крайця є досить поширеною, однак це стосується несформованих форм. Гострі крайці є не більш ніж миттєвою формою об'єкта, оскільки час нашого суб'єктивного спостереження є занадто малим відносно впливу зовнішнього середовища. Як наслідок, окраєць кожного з АО має форму, обумовлену кутом потужності енергетичного потоку, особливо це стосується БО. Оскільки ця частина АО не витримує такого навантаження, то все поза енергетичною траєкторією буде зруйновано.

Розглянемо найпростішу задачу відносно кута падіння енергетичного потоку на окраєць поверхні деякого АО (рис. 2).

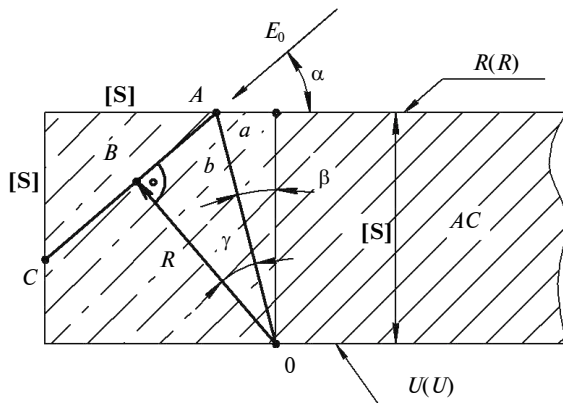


Рис. 2. Моделювання процесу розпаду крайця поверхні АО

Отже, як було обумовлено, товщина поверхні АО визначається як  $[S]$ . Саме ця величина товщини поверхні є найбільш стійкою до енергетичного потоку зовнішньої руйнації  $E_0$ . Водночас величина  $[S]$  є прямопропорційною величині  $E_0$ , тобто маємо залежність  $E_0 = \xi[S]$ , де  $\xi$  – коефіцієнт пропорційності.

У такому випадку наша задача стосовно моделювання перетворюється на суто геометричну задачу. Оскільки ми маємо справу з польовими структурами, то такий перехід є повністю законним.

Отже, в цьому випадку ми маємо вектор руйнації крайця об'єкта АО довжиною  $[S]$ , тобто за точками торкання А та С просувається вектор визначеної довжини. За визначеного маркування величин на рис. 2 маємо можливість визначитись із залежностями, за якими обчислюємо величину  $R$  (найкоротшу відстань від точки 0 до відтинку AC).

Величина (довжина) відтинку, яка нам потрібна в подальшому, визначається за теоремою подоби:

$$\frac{a}{[S]} = \operatorname{tg}\beta,$$

звідки

$$a = [S] \operatorname{tg}\beta.$$

З іншого боку, маємо залежність

$$\frac{[S] - a}{[S]} = \cos\alpha$$

і, як наслідок,

$$a = [S](1 - \cos\alpha). \quad (1)$$

З рис. 2 маємо можливість отримати функціональну залежність між величинами  $a$  і  $b$  та кутом  $\beta$ , тобто

$$\frac{a}{b} = \sin\beta, \text{ звідки } a = b \sin\beta. \quad (2)$$

За умови, що  $\gamma = \alpha - \beta$ , маємо можливість отримати величину  $R$ :

$$\frac{R}{b} = \cos\gamma, \text{ звідки } R = b \cos(\alpha - \beta). \quad (3)$$

Розв'язуємо задачу зв'язку між величинами  $b$  і  $[S]$ , користуючись залежностями (1), (2), тоді

$$b^2 = a^2 + [S]^2,$$

а після перетворень отримуємо

$$b^2(1 - \sin^2\beta) = [S]^2. \quad (4)$$

З виразу (4) маємо можливість визначитись із необхідним співвідношенням

$$b^2 = \frac{[S]^2}{\cos^2\beta}, \quad (5)$$

звідки слідує вираз

$$b = \frac{[S]}{\cos\beta}.$$

Отриману залежність (5) підставляємо у вираз (3) і отримуємо величину радіуса руйнування крайця окремого елемента поверхні:

$$R = \frac{[S]}{\cos\beta} \cdot \cos(\alpha - \beta).$$

Користуючись залежністю

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \sin\beta,$$

а також виразом

$$R = [S](\cos\alpha + \sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta),$$

після низки перетворень отримуємо кінцевий результат у вигляді

$$R = [S][\cos\alpha + \sin\alpha \cdot (1 - \cos\alpha)]. \quad (6)$$

Вираз (6) є приблизним, оскільки показує величину точкового впливу на можливі руйнації

об'єкта завершених розмірів. Проте функція (6) вказує на залежність міцності одиничного елемента від його товщини та кута падіння енергетичного потоку.

У випадку, який розглядається на рис. 2, ми маємо можливість визначитися з об'ємом панданної зони технологічного фантому одиничного елемента, тобто

$$[P]\Phi = R^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot f(x, y, z),$$

де  $f(x, y, z)$  – довжина окрайця руйнації.

Цей математичний розгляд можливої геометрії виступів і заглибин на поверхні АО доводить, що поверхня підлаштовується до зовнішньої енергетики і не має визначених гострих кутів. Тому всі гострі кути, які трапляються нам при різних розглядах поверхні, це не більш ніж ілюзія. За властивостями ТФ будь-яка геометрія зазнає впливу сторонніх сил, які принципово не дають можливості утворитися гострому куту в процесі формування АО.

Водночас дуже важливу роль відіграють енергетичні процеси формотворення поверхні. Наразі цими проблемами займається фізика тертя та зносу твердих матеріалів [1, 2]. Таких теорій розроблено доволі велику кількість, однак звернемо увагу на енергетичну модель процесу зносу поверхні [1].

Згідно з цією моделлю робота, яка витрачається на подолання сили тертя, визначається як

$$\mathbf{F}_{\text{тер}} \cdot \mathbf{s} = E_{\text{тер}},$$

де  $\mathbf{F}_{\text{тер}}$  – вектор сили тертя,  $\mathbf{s}$  – вектор шляху тертя.

Перший закон термодинаміки та закон збереження енергії [11] визначають

$$E_{\text{тер}} = E_{\text{мех}} = E_{\text{терм}} + E_{\text{хім}} + E_{\text{ел}} + E_i + E_{\text{мех}'}$$

У загальному випадку справджується нерівність

$$E_{\text{терм}} \gg E_{\text{хім}} + E_{\text{ел}} + E_i + E_{\text{мех}'},$$

де  $E_{\text{тер}}$  – загальна енергія тертя,  $E_{\text{мех}}$  – механічна енергія тертя,  $E_{\text{терм}}$  – термічна складова енергії,  $E_{\text{хім}}$  – хімічна складова енергії,  $E_i$  – енергія індентора тертя,  $E_{\text{мех}'}$  – енергія змашувального матеріалу.

Енергетична модель базується на понятті утворення частинок зносу та переносу речовини.

Якщо енергія, акумульована у відокремлених від поверхні частинках унаслідок пружної деформації  $E_{\text{пр}}$  більша за енергію  $E_q$ , з якою частинка утримується на поверхні силами адгезії, то утворюється вільна частинка зносу. Тут необхідно зробити одне зауваження: цей процес утворення твердотільних частинок є одним із варіантів формування твердотільної зони присутності, яка буде розглядатися та досліджуватися далі. Отже, для частинок напівсферичної форми запасена пружна енергія становитиме

$$E_{\text{пр}} = \frac{\mu^2 \varepsilon_s^2 E \pi d_L^3}{2 \cdot 12}.$$

Енергія адгезійного зв'язку для напівсферичної частинки визначається як

$$E_q = f_{1/2} \frac{\pi d_L^2}{4},$$

де  $f_{1/2} = g_1 + g_2 - g_{1/2}$  [1],  $g_1, g_2$  – сили поверхневого натягу та межі першого і другого тіл із зовнішнім середовищем відповідно;  $g_{1/2}$  – поверхневий натяг на межі розділу першого і другого тіла.

Звідси умова утворення частинки зносу  $E_{\text{пр}} \gg E_q$  дає змогу визначити їх характерний розмір  $d_L$ :

$$d_L \geq \frac{6 f_{1/2}}{(\mu_q \varepsilon_s)^2 E},$$

де  $\mu_q$  – коефіцієнт Пуассона,  $E$  – модуль пружності,  $\varepsilon_s = 3 \cdot 10^{-3}$  – відносне видовження.

Для металів це співвідношення можна записати у спрощеному вигляді:

$$d_L = 6 \cdot 10^4 \frac{f_{1/2}}{\sigma_T}.$$

Для переносу напівсферичних частинок діаметром  $d_L$  формулюється така умова: накопичена в об'ємі частинки пружна енергія  $E'_{\text{пр}}$  повинна бути більша за енергію утворення нових поверхонь  $E'_s$ . Якщо врахувати, що

$$E'_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon_m^2 E \pi (d'_L)^3}{2 \cdot 12},$$

а

$$E'_s = 2q_1 \frac{\pi (d'_L)^2}{2},$$

то для характерного розміру частинок переносу отримуємо

$$d'_L \geq \frac{24q_1}{E\varepsilon_m^2},$$

де  $\varepsilon_m$  – коефіцієнт молекулярного зносу частинки об'єкта.

Однак прийнята умова, згідно з якою енергія, витрачена на утворення нової поверхні, у кінцевому випадку витрачається тільки на пружну деформацію контртіла та не відповідає дійсності. Крім того, не враховується енергія дислокацій і мікросілин у поверхневих зонах тіл, які контактують, тобто, як підкреслюється в роботі [1], цю модель слід розглядати як вельми приближену.

Енергетичні дослідження механічного руйнування [12] дають змогу отримати емпіричну залежність такого вигляду:

$$t = t_0 \exp \frac{E_a}{kT},$$

де  $t$  – час до руйнування,  $t_0$  – параметр, пов'язаний із частотою теплових елементів коливання кристалічної ґратки,  $T$  – абсолютна температура,  $k$  – стала Больцмана,  $E_a$  – енергія активації процесу руйнування при механічному навантаженні:

$$E_a = E_{AO} - \rho_g \sigma,$$

де  $E_{AO}$  – енергія активації процесу руйнування за відсутності напруги розтягу, приблизно рівна енергії сублімації для металів чи енергії хімічного зв'язку для полімерів;  $\sigma$  – діюча напруга;  $\rho_g$  – коефіцієнт, залежний від природи та структури речовини.

Стосовно енергії, яка витрачається на руйнацію при терті, було з'ясовано, що ця енергія здебільшого витрачається на деформацію ділянок у межах тріщин, і лише мала частина цієї енергії йде на збільшення поверхневої енергії системи. Тож енергія руйнації переважає поверхневу енергію майже на три порядки [12].

Як наслідок, існує різниця між уявною та реальною поверхнею, тобто якщо АО намагається утворити поверхню, яка являє собою низку призм або ребер, то реальна поверхня являє собою низку злагоджених елементів. Водночас усі елементи мають яскраво окреслену геометрію, яка вказує на вектор дії сторонніх сил (наприклад, уся риба має однозначну гідродинамічну поверхню луски свого тіла, птахи мають однозначне розміщення пір'я на тілі). Тому всі класичні елементи поверхні мають двояке призначення, тобто будь-який зовнішньо опуклий елемент має свій антипод у вигляді чарунки. Як наслідок, маємо розглядати всі поверхневі елементи АО як низку

відмінностей від уявної поверхні в межах  $[S]$ . Це спостерігається в межах  $\pm[S]$ , як було показано в праці [6]. Отже, уявні класичні елементи поверхні, наведені в таблиці, є образами поверхні та їх дзеркального відображення відносно уявної площини АО.

Для того щоб оцінити ефект від використання поверхні та об'єму АО, введено відповідні коефіцієнти використання цих фізичних параметрів. Оскільки товщину поверхневого шару було визначено в [6] як  $[S]$ , то базовим елементам площі та об'єму відповідають величини  $[S]^2$  і  $[S]^3$ .

Для оцінки використання площі вводиться коефіцієнт

$$Q_S = \frac{S_e}{[S]^2}.$$

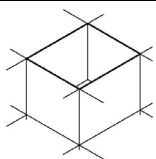
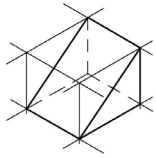
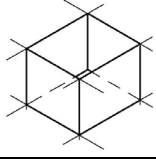
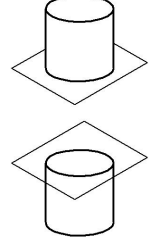
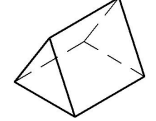
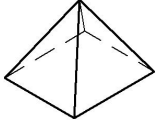
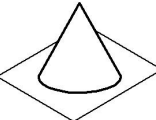
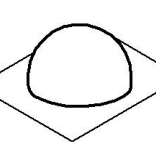
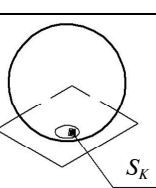
Для оцінки використання об'єму вводиться коефіцієнт

$$Q_V = \frac{V_e}{[S]^3}.$$

Наразі елементарні геометричні елементи, з яких формується геометрія поверхні (див. таблицю), можуть при складанні утворювати поверхні різних типів. Водночас необхідно пам'ятати, що будь-яка поверхня не може сформувати гострих кутів ані теоретично, ані практично, оскільки атомарна геометрія має закінчені форми, що не дають змоги утворювати кути, менші за діаметр атома. Тому таблиця дає уявлення про фантоми поверхні, а не про їх реалізацію.

Усі ці елементарні форми у тій чи іншій кількості використовуються не лише в природньому середовищі серед БО, а й у техніці. Тому розглянемо деякі з них і приклади їх застосування. По-перше, це елементарна площа № 1 (див. таблицю) з ефективною площею  $[S]^2$  і товщиною  $[S]$ . Хоча елемент і називається площиною, проте це є частина поверхні АО із товщиною  $[S]$ . Ця площа є закінченим елементом поверхні, якому притаманні параметри всієї поверхні. Так, наприклад, це будь-яке покриття об'єкта шаром фарби, шкіри тощо. Водночас мається на увазі, що властивості цієї площини зберігають властивості всієї поверхні – це основний принцип побудови моделі поверхні. У такий спосіб можна отримати лише геометрію всієї поверхні простим масштабуванням без зміни фізико-хімічних властивостей. При цьому максимально використовуються і площа, і об'єм елемента. Наразі це може бути цегла або тротуарна плитка у будівництві.

Таблиця. Моделі елементарних геометричних форм поверхні твердого тіла

№	Назва форми	Геометрія форми	Ефективна площа елемента	Коефіцієнт ефективності використання площі	Ефективний об'єм використання елемента	Коефіцієнт ефективності використання об'єму
1	Елементарна площинка		$[S]^2$	$Q_S = 1$	$V_e = [S]^3$	$Q_V = 1$
2	Клин		$3[S]^2 + \sqrt{2}[S]^2$	$Q_S = 3 + \sqrt{2}$	$V_e = \frac{1}{2}[S]^3$	$Q_V = \frac{1}{2}$
3	Кубічна комірка		$5[S]^2$	$Q_S = 5$	$V_e = [S]^3$	$Q_V = 1$
4	Циліндр Циліндрична комірка		$[S]^2(1 + \pi)$	$(1 + \pi)$	$V_e = \pi[S]^3$	$Q_V = \frac{\pi}{4}$
5	Призма		$\sqrt{5} \cdot [S]^2$	$\sqrt{5}$	$V_e = \frac{1}{2}[S]^3$	$Q_V = \frac{1}{2}$
6	Піраміда		$\sqrt{5} \cdot [S]^2$	$\sqrt{5}$	$V_e = \frac{1}{3}[S]^3$	$Q_V = \frac{1}{3}$
7	Конус		$[S]^2 \cdot \left[1 - \frac{\pi}{4}(1 - 2\sqrt{5})\right]$	$\left[1 - \frac{\pi}{4}(1 - 2\sqrt{5})\right]$	$V_e = \frac{1}{24}\pi[S]^3$	$Q_V = \frac{\pi}{12}$
8	Напівеліпсоїд		$[S]^2 \cdot \left[ \left(1 + \frac{3}{4}\pi\right) + \frac{\pi}{\sqrt{3}} \arcsin \frac{\sqrt{3}}{2} [S] \right]$	$\left[ \left(1 + \frac{3}{4}\pi\right) + \frac{\pi}{\sqrt{3}} \arcsin \frac{\sqrt{3}}{2} [S] \right]$	$V_e = \frac{4}{3}\pi[S]^3$	$Q_V = \frac{4}{3}\pi$
9	Куля		$[S]^2(1 + \pi) - 2S_k$	$(1 + \pi) - \frac{2S_k}{[S]^2}$	$V_e = \frac{\pi}{6}[S]^3$	$Q_V = \frac{\pi}{6}$

Наступною формою є клин № 2 з ефективною площею  $3[S]^2 + \sqrt{2}[S]^2$ , який являє собою куб, розсічений по діагоналі. Така фігура має значно більшу площу поверхні, яка характерна для об'єктів, що мають необхідність випромінювання залишкової енергії. Крім того, ця форма характерна для металообробного інструмента (наприклад, напилка), оскільки дає можливість створювати місцеві концентрації сили для руйнації протидіючого АО.

Кубічна комірка № 3 серед усіх цих елементарних форм має найбільшу площу ( $5[S]^2$ ) і є найбільш ефективною формою для накопичення енергії із зовнішнього середовища та її зберігання у поверхневому прошарку поверхні. У чистому вигляді комірка не зустрічається, а лише у комбінації з площиною № 1, яка слугує перегородкою між цими комірками (шахівниця).

Особливістю розглянутих вище форм елементарних поверхонь є те, що самі по собі вони не зустрічаються, оскільки потрібні одна одній для реалізації. Сам по собі може існувати лише варіант поверхні № 1, та й то не завжди. Особливо це характерно для БО. Зазвичай кожен із цих об'єктів є центральним на площині розміром  $3[S] + 3[S]$ .

Наступною формою є циліндр і його антипод – циліндрична комірка № 4 (див. таблицю). Наразі це варіант реалізації площини № 1 і комірки № 3, але у варіанті самостійного існування, коли їм не потрібні інші елементи. Може використовуватися у випадку необхідності значного тертя між АО чи енергетичного поглинання.

Призма № 5 є різновидом клиноподібного елемента, але такого, що може існувати самостійно. Використання подібної форми поверхні вкрай рідкісне через складність отримання. Піраміда № 6 є повністю самостійним елементом, який виконує функції або випромінювального, або захисного елемента. Конус № 7 є повністю самостійним елементом, який виконує функції захисного характеру для БО. Напівкуляста форма № 8 є повністю самостійним елементом і в техніці зустрічається вкрай рідко, хоча для БО це досить поширене явище. Куляста форма № 9 є повністю самостійним елементом, який не потребує сумісності з іншими елементами. Форма є характерною для техніки і БО.

Проілюструвати розглянуті вище форми можна за допомогою атомно-силового мікроскопа (АСМ) (рис. 3, 4) [13]. З фото дуже добре видно, що існує певне чергування у поверхневому шарі

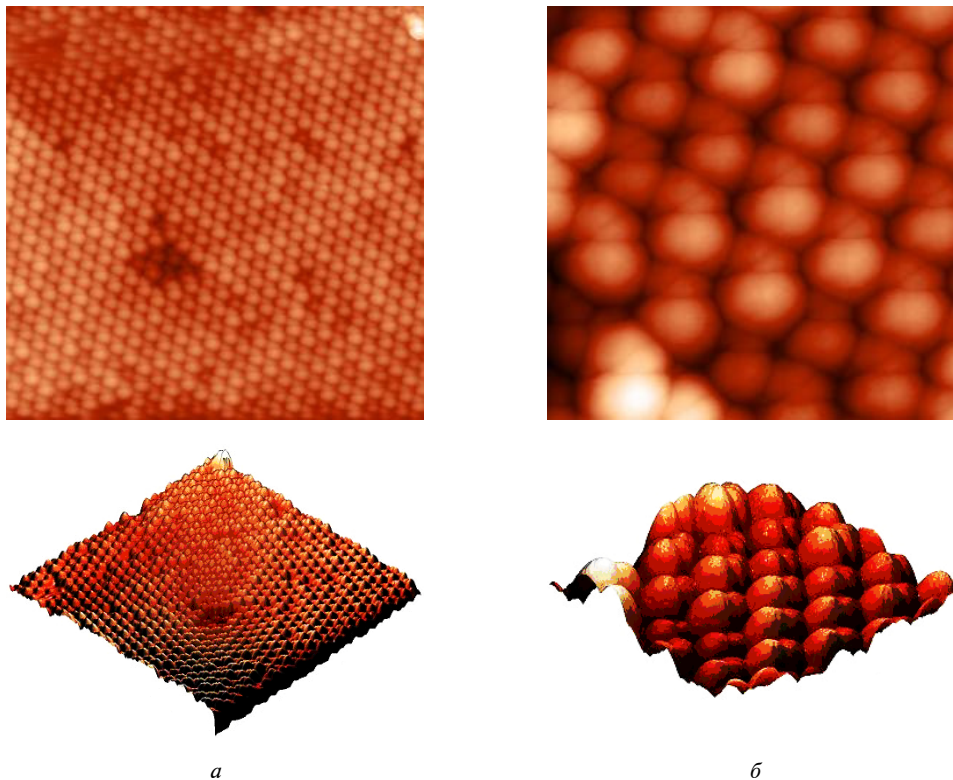


Рис. 3. АСМ-зображення поверхні фотонних кристалів на основі латексних сфер: *а* – розмір зображення  $5 \times 5$  мкм (з відповідним 3D-зображенням); *б* – розмір зображення  $1 \times 1$  мкм (з відповідним 3D-зображенням). Висота кристалів 40 нм, діаметр кристалів 190–200 нм [13]



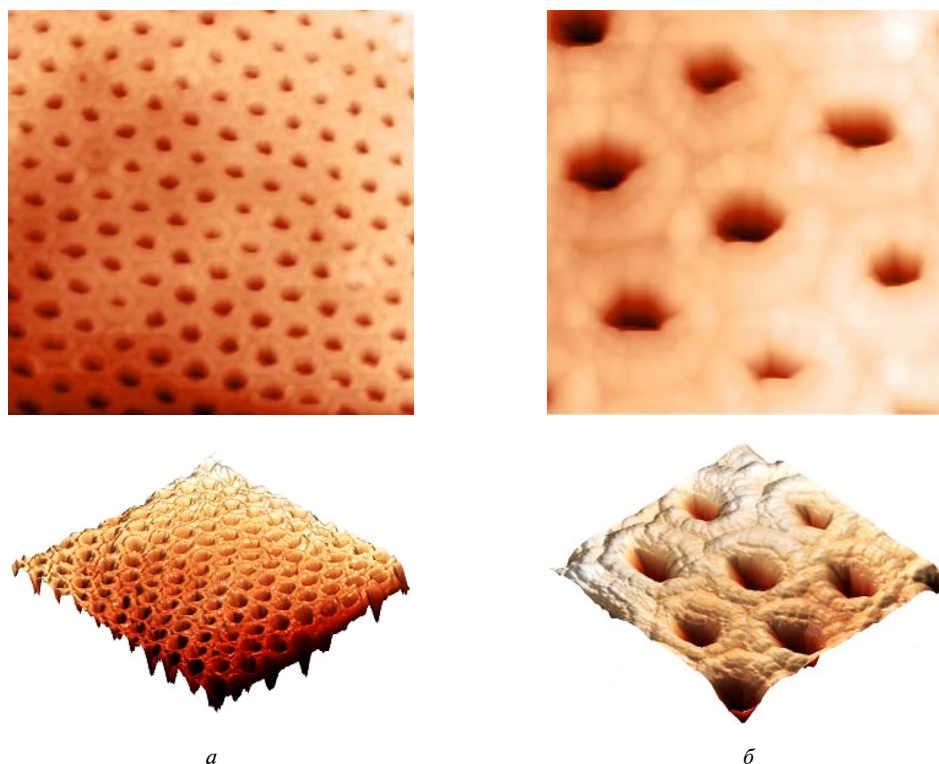


Рис. 4. АСМ-зображення поверхні інвертованих фотонних кристалів на основі  $\text{SnO}_2$ : *a* – розмір зображення  $4 \times 4$  мкм (з відповідним 3D-зображенням); *б* – розмір зображення  $1 \times 1$  мкм (з відповідним 3D-зображенням). Діаметр впорядкованих чарунок 185–195 нм, глибина 130–140 нм [13]

геометричних форм. Так, на рис. 3 це напівкулі зі щільним пакуванням, яке не передбачає можливості розміщення інших геометричних форм. При цьому поверхня має вигляд регулярно розміщених елементів поверхні. На рис. 4 [13] зображено поверхню у вигляді конусних чарунок. Наразі цю поверхню можна назвати комбінованою, оскільки її можна відтворити за допомогою конусів-антиподів № 7 та площин № 1. Як стверджується в [13], подовженість такої поверхні може сягати кількох сотень мікрометрів.

### Висновки

Проведені дослідження дали змогу запропонувати модель структури поверхні на основі елементарних форм, що утворюють активну площу БО. Такий підхід дає можливість сформувати найбільш чутливу площу взаємодії об'єктів.

При розгляді всіх цих процесів формотворення необхідно звернути увагу на різницю між плинним зносом і чинною руйнацією під дією зовнішніх сил (середовища). Наразі взаємодія між

потоків зовнішнього середовища й АО є досить відносним явищем. У загальному випадку вона зводиться до взаємодії двох потоків визначених щільності та потужності. Ця теза багаторазово доводиться як у класичних емпіричних залежностях, так і в реальних процесах, на яких базуються ці дослідження. Тобто в кінцевому випадку ми маємо ситуацію, коли інерційність процесів взаємодії призводить до кінцевого утворення форми. Отже, гострих кутів у межах АО не просто не має, їх просто принципово не може бути, оскільки існують обмеження на міжмолекулярному рівні.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на статистику поширення розглянутих вище форм елементарних об'єктів. Необхідно також дослідити енергетичну стійкість кожного запропонованого елемента поверхні.

### Фінансування

Дослідження виконано за рахунок проекту ДР 0117U004263 МОН України.

## Список літератури

1. Крагельский И. В. Трение и износ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. – 8th ed. – Wiley, 2004. – 704 p.
3. Femtosecond laser-induced periodic surface structures / I.J. Bonse, J. Krüger, S. Höhm, A. Rosenfeld // J. Laser Appl. – 2012. – 24, № 4.
4. Interwoven metal-organic framework on a periodic minimal surface with extra-large pores / B. Chen, M. Eddaoudi, S.T. Hyde et al. // Science. – 2001. – 291, iss. 5506. – P. 1021–1023.
5. Hwang T.Y., Guo C. Angular effects of nanostructure-covered femtosecond laser induced periodic surface structures on metals // J. Appl. Phys. – 2010. – 108. – P. 073523-1–073523-4.
6. Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Клочко Т.Р. Теорія біотехнічних об'єктів. Т. 1. Узагальнені властивості біотехнічного об'єкта. – К.: ВПК "Політехніка", 2016. – 274 с.
7. Скицюк В.І., Клочко Т.Р. Геометричні спотворення при визначенні просторових координат об'єкта // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2016. – Вип. 51. – С. 94–99.
8. Feynman R. The Character of Physical Law // A Series of Lectures Recorded by the BBC at Cornell University USA. – London: Cox and Wyman LTD, 1965.
9. Скицюк В.І., Діордіца І.М. Панданна зона шорсткості технологічного об'єкта // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2014. – Вип. 47. – С. 193–201.
10. Відчутники контрольно-вимірювальних систем / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб, Т.Р. Клочко. – К.: НТУУ "КПІ", 2008. – 240 с.
11. Die Mathematischen Hilfsmittel des Physikers. Von Erwin Madelung unter Mitarbeit von Karl Boehle und Siegfried Flügge. (Die Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften, Band IV.) 3. Vermehrte und Verbesserte Auflage. – Berlin: Verlag von Julius Springer, 1936. – 381 S.
12. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
13. Исследование фотонных кристаллов с помощью атомной силовой микроскопии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rusnor.org/pubs/articles/9061.htm>

## References

- [1] I.V. Cragelsky, *Friction and Wear*, 2nd ed. Moscow, SU: Mashinostroenie, 1968 (in Russian).
- [2] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 8th ed. New York: Wiley, 2004.
- [3] J. Bonse et al., "Femtosecond laser-induced periodic surface structures", *J. Laser Appl.*, vol. 24, no. 4, 2012. doi: 10.2351/1.4712658
- [4] B. Chen et al., "Interwoven metal-organic framework on a periodic minimal surface with extra-large pores", *Science*, vol. 291, no. 5506, pp. 1021–1023, 2001. doi: 10.1126/science.1056598
- [5] T.Y. Hwang and C. Guo, "Angular effects of nanostructure-covered femtosecond laser induced periodic surface structures on metals", *J. Appl. Phys.*, vol. 108, pp. 073523-1–073523-4, 2010. doi: 10.1063/1.3487934
- [6] G.S. Tymchik et al., *Theory of Biotechnical Objects*, vol. 1, *Generalized Properties of a Biotechnical Object*. Kyiv, Ukraine: VPK "Politekhnik", 2016 (in Ukrainian).
- [7] V.I. Skytsiuk and T.R. Klotchko, "Determinion of geometric distortions of the object's spatial coordinates", *Visnyk NTUU KPI. Ser. Pryladobuduvannya*, no. 51, pp. 94–99, 2016 (in Ukrainian).
- [8] R. Feynman, *The Character of Physical Law*, in *A Series of Lectures Recorded by the BBC at Cornell University USA*. London, UK: Cox and Wyman LTD, 1965.
- [9] V.I. Skytsiuk and I.M. Diorditsa, "Pandan zone of roughness of technological object", *Visnyk NTUU KPI. Ser. Pryladobuduvannya*, no. 47, pp. 193–201, 2014 (in Ukrainian).
- [10] G.S. Tymchik et al., *Sensors of Control and Measuring Systems*. Kyiv, Ukraine: VPK "Politekhnik", 2008 (in Ukrainian).
- [11] *Die Mathematischen Hilfsmittel des Physikers. Von Erwin Madelung unter Mitarbeit von Karl Boehle und Siegfried Flügge. (Die Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften, Band IV.) 3. Vermehrte und Verbesserte Auflage*. Berlin, Germany: Verlag von Julius Springer, 1936. doi: 10.1002/bbpc.19370430418
- [12] G. Polzer and F. Meissner, *Fundamentals of Friction and Wear*. Moscow, SU: Mashinostroyeniye, 1984 (in Russian).
- [13] *The Study of Photonic Crystals Using Atomic Force Microscopy* [Online]. Available: <http://www.rusnor.org/pubs/articles/9061.htm>

Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, Т.Р. Клочко

#### МОДЕЛЬ СТРУКТУРИ АКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ АБСТРАКТНОГО БІОТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТА

**Проблематика.** В статті розглядається актуальна проблема забезпечення моніторингу метрологічних параметрів технологічного обладнання з числовим програмним керуванням за допомогою розробки методів і засобів експрес-атестації координатної системи технологічного обладнання, які, на відміну від існуючих, будуть більш економічними та не поступатимуться в точності лабораторним.

**Мета дослідження.** Метою роботи є створення методу компенсації виявлених похибок, для чого потрібні моделі елементарних форм, які визначають утворення різного типу регулярності структури поверхні об'єктів, зокрема моделювання утворення активної поверхні об'єкта при взаємодії з іншими об'єктами.

**Методика реалізації.** Запропоновано модель форми елементарного об'єму будь-якого абстрактного об'єкта й енергетичних процесів, які в ньому виникають. Запропоновано такою мірою вибирати товщину поверхневого шару, що визначає активні властивості поверхні.

**Результати дослідження.** Доведено, що глибина активної поверхні визначає реальний розмір площі та мінімального активного об'єму активної площі абстрактного об'єкта. При розгляді всіх цих процесів визначено різницю між плинним зносом і чинною руйнацією під дією зовнішніх сил (середовища). Взаємодія між потоком зовнішнього середовища й абстрактного об'єкта є досить відносною ситуацією.

**Висновки.** Створено первинну класифікацію елементарних структур поверхні абстрактних біотехнічних об'єктів. Запропоновано модель структури поверхні на основі елементарних форм, що утворюють активну площу біотехнічного об'єкта. Такий підхід дає можливість утворити найбільш чутливу площу взаємодії об'єктів.

**Ключові слова:** абстрактний об'єкт; моделі елементарних форм; структура поверхні; активна площа.

Г.С. Тымчик, В.И. Скицюк, Т.Р. Клочко

#### МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ АКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ АБСТРАКТНОГО БИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

**Проблематика.** В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения мониторинга метрологических параметров технологического оборудования с числовым программным управлением посредством разработки методов и средств экспресс-аттестации координатной системы технологического оборудования, которые, в отличие от существующих, будут более экономичными и не будут уступать в точности лабораторным.

**Цель исследования.** Целью исследований является создание метода компенсации выявленных ошибок. Для этого необходимы модели элементарных форм, которые определяют образование разного типа регулярности структуры поверхности объектов, в частности моделирование образования активной поверхности объекта при взаимодействии с другими объектами.

**Методика реализации.** Предложена модель формы элементарного объема любого абстрактного объекта и энергетических процессов, которые в нем возникают. Предложено в качестве такой степени выбирать толщину поверхностного слоя, которая определяет активные свойства поверхности.

**Результаты исследования.** Доказано, что глубина активной поверхности определяет реальный размер площади и минимального активного объема активной площади абстрактного объекта. При рассмотрении всех этих процессов определена разница между текущим износом и действующим разрушением под действием внешних сил (среды). Взаимодействие между потоком внешней среды и абстрактного объекта является достаточно относительной ситуацией.

**Выводы.** Создана первичная классификация элементарных структур поверхности абстрактных биотехнических объектов. Предложена модель структуры поверхности на основе элементарных форм, образующих активную площадь биотехнического объекта. Такой подход предоставляет возможность создать наиболее чувствительную площадь взаимодействия объектов.

**Ключевые слова:** абстрактный объект; модели элементарных форм; структура поверхности; активная площадь.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
20 жовтня 2017 року