

УДК 621: 62-4

## МОДЕЛЮВАННЯ МІЛКОДИСПЕРСНОЇ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ЗОНИ ПРИСУТНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТУ РІЗНОЇ КРИВИЗНИ ПОВЕРХНІ

*Скицюк В. І., Клочко Т. Р.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: [t.klochko@kpi.ua](mailto:t.klochko@kpi.ua)*

*У статті йдеться про дослідження характеру розподілу дискретних елементів у зоні присутності абстрактного об'єкту за умови наявності забруднення поверхні технологічного об'єкту. Визначено основні типи кривизни технологічних поверхонь, а також причини розподілу твердих часток на поверхні, що впливає на точність вимірювань.*

*Для кращого опису процесів при дослідженні впливу наявності пилу як елементів дискретної твердотільної зони абстрактної сутності на метрологічні функції контрольно-вимірювальних приладів всі ці явища можна описати хвильовими рівняннями параболічного типу з відповідними крайовими обмеженнями, що є також подальшими дослідженнями проблеми підвищення точності вимірювань параметрів якості виготовлення деталей точних приладів, зокрема твердості та шорсткості поверхні об'єкту.*

**Ключові слова:** технологічний об'єкт, дискретні елементи, забруднення поверхні, твердість.

### **Вступ**

Сучасні технологічні процеси обробки матеріалів передбачають застосування контрольно-вимірювальної техніки, яка відповідає за функції контролю, спостереження, реєстрацію показників властивостей матеріалів деталей та їх обробку. Так, використовують матеріали різного хімічного складу для виготовлення деталей прецизійних приладів, що мають різні параметри, наприклад, параметри твердості, шорсткості поверхні тощо [1, 2]. Окрім того, кривизна поверхні як об'єкту вимірювання, так і метрологічного приладу також впливає на точність вимірювань [3].

Поверхневі процеси досліджено з огляду на фізико-хімічні властивості матеріалів, що взаємодіють [2, 4, 5], проте проблеми забруднення поверхні об'єкту мають свої особливості, які необхідно враховувати при вимірюванні параметрів якості деталі. Твердість матеріалу значною мірою впливає на зносостійкість деталі, тобто на її можливість виконувати функції в певних вузлах приладу, оскільки неузгодженість поєднання деталей із невизначеною твердістю та шорсткістю може призвести до їх швидкого зношування [6]. Тому актуальною проблемою підтримки ефективного технологічного процесу є створення умов прецизійних вимірювань якості деталі.

### **Постановка задачі**

Відомо, що будь-яка поверхня абстрактної сутності (АС) має властивість до забруднення, тобто покриття мілкими твердими часточками (пилом). Як наслідок, коли необхідно провести вимірювання певних параметрів, які визначають

властивості АС, необхідно очистити її поверхні від пилу, інакше результати вимірів будуть спотворені. Окрім того, існують поверхні об'єктів, для яких забруднення є вкрай небажаними. До таких поверхонь технологічних об'єктів, в першу чергу, необхідно віднести різного типу оптичні деталі приладів та систем.

Існує ціла низка технологічних процесів, де забруднення пилом поверхні об'єкту становить досить велику проблему. Окрім того, для поверхонь метрологічних приладів це явище взагалі недопустиме, а отже, вимагає постійної очистки. Для того, щоб проаналізувати характер часток пилу на поверхні АС для визначення його впливу на метрологічні функції приладів та уникнення можливих спотворень результатів вимірювання параметрів якості деталей, необхідно провести первинне моделювання зони присутності дискретних твердих частинок пилу та бруду, які формують зону їх присутності певного технологічного об'єкту. Особливо складного характеру набувають випадки, коли оброблюють криволінійні фасонні поверхні, оскільки це може підвищувати кількість накопичення твердих часток у різних ділянках об'єкту.

Отже, метою роботи є створення моделей первинної мілкодисперсної твердотільної зони присутності технологічного об'єкту різної кривизни поверхні.

### **Моделі твердотільних зон присутності об'єктів**

Розглянемо низку елементарних випадків. Оскільки ми розглядаємо пил, то необхідно обу-

мовитися, що саме може сприйматися як фізичний об'єкт. У [7] розглядалися різні варіанти руху АС у різних середовищах, серед яких найбільш дошкульними є ситуації, пов'язані з рухом твердих тіл, як найбільш впливових на процес вимірювання. Стосовно нашого дослідження середовища типу рідини, газу та вакууму практично не впливають на результати вимірювання. Оскільки бруд технічного та природного походження в процесі своєї життєдіяльності набуває форми, яка поступово наближається до форми кульки, то ми надалі будемо сприймати цю форму як ідеалізований об'єкт пилу. При дослідженні будемо вважати, що радіус кульки не впливає на наші дослідження з точності вимірювання, оскільки існує задача накопичення пилу.

Отже, необхідно дослідити, яким чином форма поверхні впливає на щільність розподілу пилу. Для цього приймаємо тезу, що основною діючою силою на пил є сила земного тяжіння  $F_g$ , яка відноситься до центральносиметричних польових структур. Одночасно усі інші сили, що діють на пил, будемо називати сторонніми  $F_{ст}$  незалежно від природи їх походження. Для початку виділимо низку типових форм поверхні технологічного об'єкту, на яких може знаходитися сукупність дискретних твердих часток.

У цьому переліку на першому місці є звичайна ідеалізована площина (рис. 1, а). Бруд на цій поверхні знаходиться у стані рівномірного прошакування. На другому місці знаходиться ламана поверхня (рис. 1, б, в, г), де бруд може знаходитися під різними кутами відносно сили тяжіння.

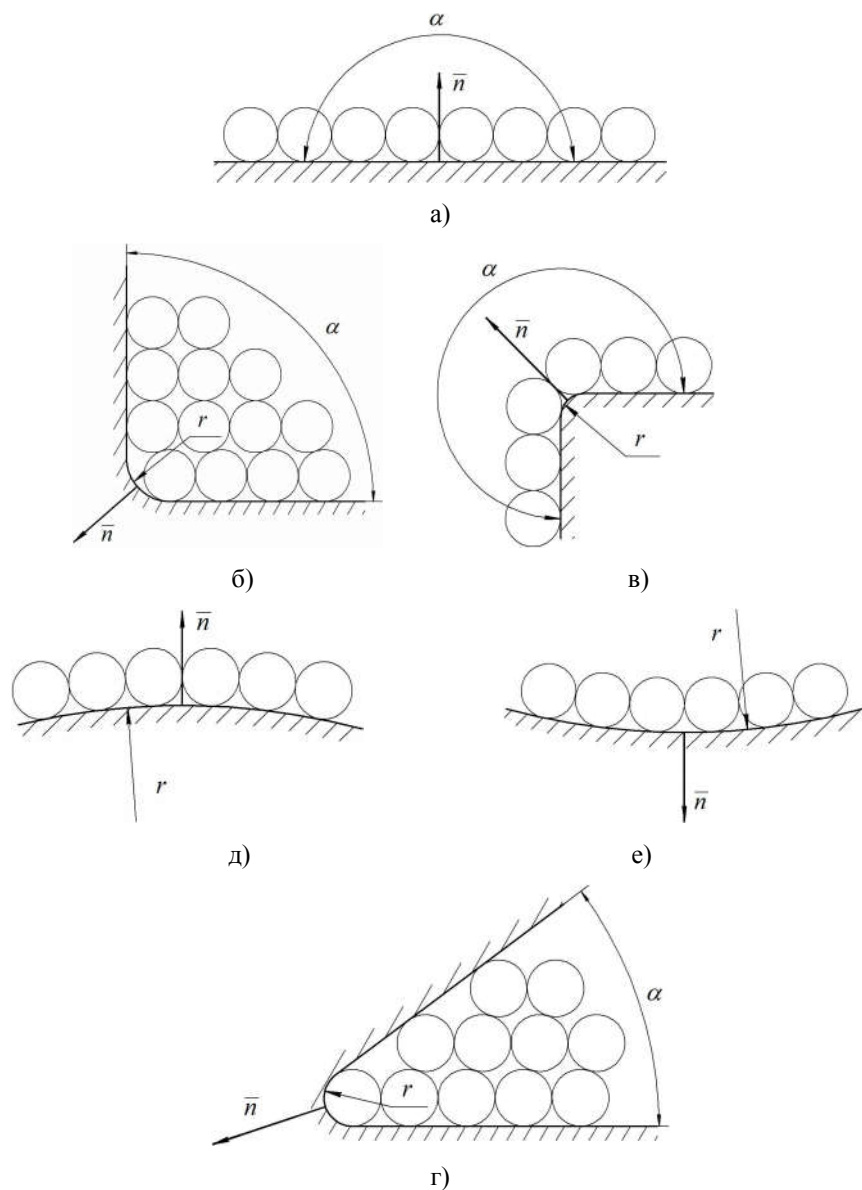


Рис. 1. Моделі розташування бруду на поверхні АС, де: а) ідеальна горизонтальна поверхня, б) внутрішній кут, в) зовнішній кут, г) гострий внутрішній кут, д) зовнішня вигнута поверхня, е) внутрішня вигнута поверхня

Третім видом поверхні є криволінійні, які утворюють увігнуті та вигнуті поверхні (рис. 1, д, е) [8, 9, 10].

Розглянемо ситуацію з технологічним об'єктом з пласкою поверхнею, коли її нормальний вектор є колінеарним з вектором земного тяжіння (рис. 1, а) та його модель на (рис. 2).

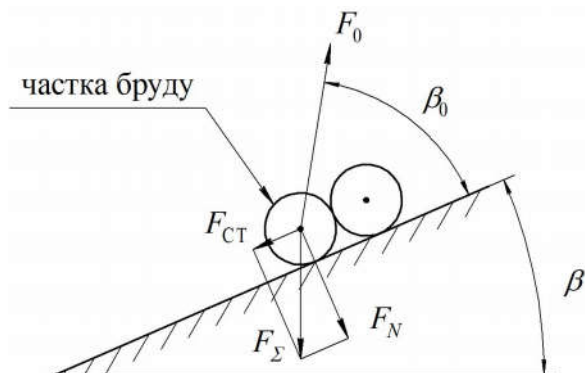


Рис. 2. Модель брудю на похилій поверхні об'єкту

Отже будь-яка АС знаходиться в стані спокою, коли сума проєкцій сил за обраним напрямком дорівнює нулю, тобто

$$\sum_{i=1}^n F_i \cos \beta_i = 0, \quad (1)$$

де  $n$  – число діючих сил,  $\beta_i$  – кут між силою  $F_i$  і довільно обраним напрямком.

Друга умова рівноваги, коли алгебраїчна сума моментів всіх сил дорівнює нулю, тобто

$$\sum_{i=1}^n F_i l_i = 0, \quad (2)$$

де  $l_i$  – плече сили  $F_i$ .

Стосовно нашого випадку (рис. 2) сила, яка зіштовхує елемент брудю з похилої площини, знаходиться під кутом до горизонту, визначається як

$$F_{cm} = F_N \operatorname{tg} \beta + F_0 \cos \beta_0. \quad (3)$$

Сторонні сили  $F_{CT}$  мають можливість змінювати свій напрямок відносно центру елемента брудю. Тому навіть відсутність кута нахилу не гарантує відсутності сили зсуву. Отже, можна дійти висновку: існують сили, які виводять елемент зі стану спокою. Водночас, сила  $F_0$  може мати будь який напрямок у просторі, оскільки є незалежною від кута нахилу поверхні стосовно об'єкту. Такі сили ( $F_0$ ) завжди існують при торканні двох тіл.

Найбільш простим прикладом є наявність сил тертя, які при деяких кутах взагалі призводять до неможливості об'єкту рухатися на поверхні. Тим не менш, саме ці сили призводять до руху брудю по поверхні технологічного об'єкту. Так наприклад, сторонні сили від сили тяжіння мають мож-

ливість утворюватися, навіть на абсолютно горизонтальній поверхні внаслідок неупорядкованості елементів брудю (рис. 3).

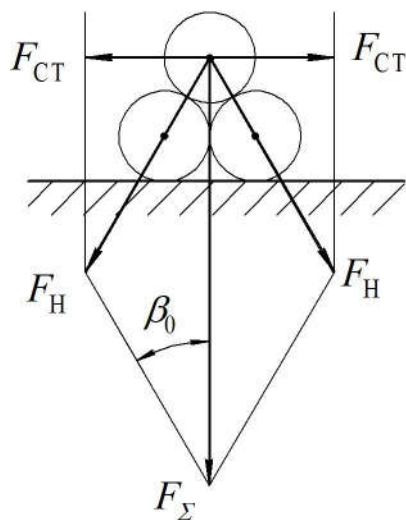


Рис. 3. Моделювання взаємодії елементарних часток брудю на чистій поверхні

За цього прикладу сторонні сили утворюються завдяки тиску верхнього елемента на два проміжні, які знаходяться під дією гравітаційної сили  $F_{\Sigma}$ . При цьому сили, які тиснуть на два інших елемента, тобто  $F_H$  визначаються як

$$F_H = \frac{F_{\Sigma}}{2 \sin \beta_0}. \quad (4)$$

При щільному змиканні кут  $\beta_0$  дорівнює  $\frac{\pi}{6}$ ,

а  $\sin \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ . Наразі це є мінімум, який мають нормальні сили, тобто

$$F_H^{\min} = \frac{F_{\Sigma}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Як наслідок, сторонні сили при цьому будуть мати теж мінімальну величину

$$F_{CT}^{\min} = F_N \sin \beta_0 = \frac{2F_{\Sigma}}{\cos \beta_0} \sin \beta_0 = 2F_{\Sigma} \operatorname{tg} \beta_0 \quad (6)$$

або при  $\operatorname{tg} \frac{\pi}{6} = \frac{1}{\sqrt{3}}$

$$F_{CT}^{\min} = \frac{2}{\sqrt{3}} F_{\Sigma}. \quad (7)$$

З виразу (6) досить легко побачити, що зі збільшенням кута сили значно зростають, так за кута  $\frac{\pi}{4}$  стороння сила стає рівною підсумковій, а при куті  $\frac{\pi}{3}$  перевищує його і стає рівною  $\sqrt{3}F_{\Sigma}$ .

Отже, звідсіля маємо зробити висновок, що бруд має можливість рівномірно розподілятися по поверхні під дією сторонніх сил. Спонукає до

цього різке зростання сторонніх сил  $F_{ct}$  майже до нескінченності. Тим не менш цей процес припиняється, коли сили тертя між елементами бруду різко зникають у разі поверхневого зсуву. У цьому випадку елементи бруду розповсюджуються по поверхні залежно від її кривизни.

Отже, ми розглянули поведінку бруду на плоскій поверхні. Тим не менш, таких поверхонь є переважуюча більшість на технічних об'єктах.

Як правило, накопичення бруду на таких поверхнях прямо залежить від їх кута розташування відносно сили земного тяжіння або іншої гравітаційної сили, що діє на частинки. Наразі це можуть бути електростатичні або магнетичні сили. У такому випадку концентрація пилу, який має електричні або магнетичні властивості підкорюються конфігурації цих полів. Безпосереднім концентратором частинок є ділянки поверхні, де напруженість поля максимальна, тобто безпосередньо пов'язана з кривизною поверхні, як це показано на рис. 1, в, г, д. Наразі кривизна поверхні визначається як [10]

$$K = \frac{1}{R} = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{ds^2}\right)^2}, \quad (8)$$

де  $s$  – натуральний параметр, а  $ds$  – його похідна і є відтинком кривої, яка проходить через викривлену частину поверхні технологічного об'єкту.

За наявності кутів на поверхні АС (рис. 1 а, б, в, г, д) бруд різним чином накопичується на кривих поверхнях. Наприклад, на ввігнутих поверхнях технологічного об'єкту його збирається більш, ніж на вигнутих, хоча здавалося б повинно було бути навпаки. Справа в тому, що за наявності додаткових сторонніх сил відбувається більш накопичення, оскільки вони складаються з основними. У цьому випадку сторонні сили діють у бік прогину поверхні, у той час, як на вигинах поверхні технологічного об'єкту напруженість полів більша.

Отже, будь-які спотворення поверхні створюють підґрунтя до накопичення бруду (дискретних твердих часточок) у тій, чи іншій кількості. Ці спотворення однозначно зв'язані з кривизною поверхні, яка повинна дорівнювати нулю. У такому разі похідні від функції поверхні повинні дорівнювати нулю у виразі (8). Водночас, маємо на увазі, що поверхня має ізотропні властивості, які не впливають на побудову зовнішньої польової структури АС [7], тобто її напруженості. Тим не менш, всі рівні умови ще не забезпечують умов для відсутності бруду навіть за відсутності зовнішніх сил. Залишаються лише сили гравітації, які притаманні будь-якій масі. Навіть за відсутності сили тяжіння Землі чи іншого об'єкту сам по собі АС завжди буде притягати до себе значно менші АС (порошинки), які будуть відкладатися рівним шаром по всій поверхні.

Водночас, за ідеальних умов АС буде створювати навколо себе твердотільну зону присутності, яка буде підкорятися законам гравітації, тобто це є невелика планетарна система.

Отже, за ідеальних умов ми маємо не менш ідеальний розподіл часток по всій поверхні АС (технологічного об'єкту). Первинний прошарок по поверхні є одношаровим навіть за деякої різниці у розмірах. Здавалося б, маючи часточки одного розміру, наприклад ідеалізованої кульки, ми мали отримати поверхню, вкриту ідеальним прошарком кульок, тим не менш, це не є так. Розташування кульок, які за своєї ідеальної форми є раціональним об'єктом, неможливо рівномірно розподілити на будь-якій поверхні, не зважаючи на те, раціональна вона чи ірраціональна.

Окрім того, існує явище крайового ефекту, коли елементи, які знаходяться на краю поверхні АС, створюють додатковий рух, оскільки при цьому відсутні сили стабілізації (спокою) (рис. 1, б, в). Існує можливість за певної ідеалізації об'єкту вважати елемент бруду часткою заряду, який рівномірно розташовується по поверхні об'єкту. Але стабільність розташування не є можливою, оскільки існують закони електростатики, які ми взяли за основу моделювання процесу накопичення бруду. Стабільність бруду буде неможливою, оскільки це є протиріччям однієї з фундаментальних теорем електрики, а саме теорема Ірншоу [11]. Згідно цієї теорема стверджується, що сукупність нерухомих часток, які взаємодіють між собою з силою, зворотно-пропорційною квадрату відстані (притягання або відштовхування), не може створювати стійкої рівноваги системи.

Це є загальний вираз теорема, який стосується основних польових структур. Але існує її застосування до електричних зарядів. Отже, будь-яка рівноважна конфігурація електричних точкових зарядів, які знаходяться у стані спокою нестійка, якщо на них, окрім кулонівських сил ніякі інші не діють.

Наразі існують кілька варіантів доведення цієї теорема, як для електричних, так і магнітних, гравітаційних полів тощо. Окрім того, є приклади, коли ця теорема не спрацьовує, але тут необхідно обумовитися, що за ці протиріччя приймаються варіанти за участю двох-трьох тіл АС, рух яких обмежено однією координатою. Тобто ці приклади мають досить сумнівний характер. Єдине, де ці приклади спрацьовують, це гравітаційне поле, коли дві частки притягаються аж до повного злиття (електричні заряди теж саме). Отже, стверджується, що рівноважних конфігурацій матеріальних крапок, які знаходяться під дією гравітаційних сил, не існує. З вище означеного можна зробити висновок, а саме рівняння (1) та (2) надають опис уявним властивостям АС, а теорема Ірншоу [11] є тією межею, за якою уявність втрачає свою дію. Тобто у реальності необхідно розглядати рівняння (1) та (2)

$$\sum_{i=1}^{\infty} F_i = [S], \sum_{i=1}^{\infty} M_i = [S], \quad (9)$$

де  $[S]$  – є вектор у 6D координатах, хоча це обмеження є досить умовним.

Другим вагомим висновком є те, що у твердотільній зоні присутності рівновага всіх сил та моментів неможлива. Тобто теорема Ірншоу має наслідок: якщо є невірноваженість просторового розташування об'єктів АС, то існує рух.

Попри всі ці розгляди фізичних доказів руху у зоні присутності існують сили взаємного зв'язку між мілкими об'єктами АС та тілу АС, якому притаманний цей бруд, тобто твердотільна зона присутності має нестійкий характер. Посереднім доказом такої ситуації є броунівський рух. Але, якщо броунівський рух вважається хаотичним, то твердотільна зона присутності є цілком цілеспрямованою. Причина подібної ситуації полягає у тому, що загальний рух у системі матеріальних тіл задає найбільша маса, до того ж абсолютно неважливо, більша її маса за масу зони присутності чи ні, тобто зберігається кінетичний момент усієї системи.

Посереднім доказом теореми Ірншоу може бути ще одна ситуація, яка може виникнути при аналізі розподілу бруду по поверхні, це проблема крайових сил. Сутність її полягає у тому, що, вирішуючи уявні задачі, ми користуємося методикою вирішення крайових задач, коли відсічна частина замінюється еквівалентними силами. Але це лише уявна ситуація, яка має низку обмежень, які лише імітують реальність. У реальній ситуації такого випадку взагалі не може бути, оскільки ми приймаємо, що поверхня або обмежена, або необмежена. Водночас, коли певна закінчена маса бруду, що потрапляє на цю поверхню, або розтікається до обмеженої площі, процес припиняється або не зупиняється взагалі у випадку необмеженості поверхні.

Таким чином, до зупинки процесу руху можуть призвести два фактори. По-перше, маса бруду повинна розподілятися рівним за висотою прошарком, тобто не товще за діаметр елементарної частки сміття. Для поверхні це означає, що повинні зникнути сили розштовхування, тобто відбувається процес встановлення рівноваги. Це можна спостерігати на прикладі виразу (6) та рис. 3. За логікою виразу (6) стороння сила має сягати нескінченності. Тим не менш, за умови рівності сил тертя верхня кулька просто впадає (рис. 3), і сили, яка розсуває усі інші кульки, не буде. Тим не менш, це є ілюзія уявної ситуації, оскільки імпульс руху, який передається на сусідні кульки, нікуди не зникає. Він передається на всі оточуючі елементи, отже, існує закон збереження імпульсу та енергії. Як наслідок, він буде розповсюджуватися, як концентрична хвиля, що супроводжується відповідним рухом елементарних об'єктів.

Друга вимога – це повна стабільність просторових сил та моментів на поверхні, тобто

$gradF_{\Sigma} = 0$ . Але це неможливо, оскільки обмежена поверхня має крайові переходи, де  $gradF_{\Sigma} \neq 0$ , і процес стабілізації неможливий.

У ситуації нескінченної за площею поверхні АС маємо два взаємно протилежні випадки.

Для нескінченної (необмеженої) поверхні АС необхідно мати необмежену масу дискретних твердотільних часток, тобто сміття, пилу. Мало того, його кількість повинна бути рівна не просто нескінченній масі, а подвійній. При цьому час, який необхідно витратити на його розповсюдження, дорівнюватиме нескінченності, тим більше, якщо ця маса вводиться з одної координати і неодноразово, процес руху буде відбуватися вічно. Навіть за обмеженої площі крайовий ефект буде де-стабілізувати розшарування бруду і, до того ж, більш інтенсивніше, ніж на нескінченній поверхні. Якщо на нескінченній поверхні буде розходитися одна концентрична хвиля, то на обмеженій поверхні отримаємо додатний ефект, коли до центру рухається хвиля, яка відбилася від краю обмеженої поверхні. Для кращого опису процесів при дослідженні впливу наявності пилу як елементів дискретної твердотільної зони АС на метрологічні функції контрольно-вимірювальних приладів всі ці явища можна описати хвильовими рівняннями параболічного типу з відповідними крайовими обмеженнями, що є також подальшими дослідженнями проблеми підвищення точності вимірювань параметрів якості виготовлення деталей точних приладів, зокрема твердості та шорсткості поверхні об'єкту.

### Висновки

Проведені дослідження показали, що дискретні елементи пилу на поверхні абстрактної сутності, зокрема технологічного об'єкту, накопичуються згідно потужності силового поля, яке притаманне цій абстрактній сутності, утворюючи дискретну твердотільну зону її присутності.

Моделювання твердотільної дискретної зони присутності об'єктів різних типів кривизни поверхні показало, що дискретні елементи зони рівномірно розподіляються по поверхні об'єкту пропорційно силам взаємодії між окремими дискретними частками.

Окрім того, показано, що сила злипання дискретних часток маси забрудненості абстрактної сутності, зокрема поверхні технологічного об'єкту, достатня для утримання їх на поверхні та розштовхування окремих елементів для встановлення силової рівноваги часток твердотільної зони присутності, що впливає на точність вимірювань параметрів поверхні об'єкту.

Також доцільно у подальших дослідженнях провести моделювання дискретної твердотільної зони присутності об'єкту, який є рідиною, оскільки наявність окремих твердих часток, наприклад, у

мастильних рідинах, впливає на якість поверхні технологічного об'єкту.

Дослідження виконано за рахунок коштів фінансування проекту ДР 0117U004263 МОН України.

#### Література

- [1] G. Herrmann, Modeling of Defects and Fracture Mechanics; edited by G. Herrmann; Standford University – Standford, Springer – Verlag Wien GMBH, 1993. 205 p. (Springer, May 4, 2014 – Science, 206 p.). <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2716-2>.
- [2] В. І. Копилов, І. В. Смирнов, *Поверхневі фізико-хімічні процеси: навч. посібн.* Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2012.
- [3] Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi, A. Nagakubo, “Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces”, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (2006).
- [4] H. Gleiter, Nanostructured materials: basic concepts and microstructure, *Acta Materialia*, Vol. 48, Issue 1, 1 January 2000, pp. 1-29. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2)
- [5] M. Giuliotti, M. M. Seckler, S. Derenzo, M. I. Ré and E. Cekinski, “Industrial crystallization and precipitation from solutions: state of the technique”, *Braz. J. Chem. Eng.*, vol.18, no. 4, São Paulo Dec. 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-66322001000400007>
- [6] G. Poltzer, and F. Meissner, *The Foundation of Friction and Wear* (in German), VEB Leipzig, Germany, 1983.
- [7] Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, Т. Р. Клочко, *Теорія біотехнічних об'єктів. Том 1. Узагальнені властивості біотехнічного об'єкта.* Київ, Україна: НТУУ"КПІ", ВПК "Політехніка", 2016.
- [8] D. R. Koehler, “Geometric-distortions and physical structure modeling”, *Indian J Phys* (2013) 87: 1029. <https://doi.org/10.1007/s12648-013-0321-5>.
- [9] A. Johnen, J.-F. Remacle and C. Geuzaine, “Geometrical Validity of Curvilinear Finite Elements”, *Journal of Computational Physics*, 2013 – Elsevier. [http://gmsh.info/doc/preprints/gmsh\\_curved\\_preprint.pdf](http://gmsh.info/doc/preprints/gmsh_curved_preprint.pdf)
- [10] Granino A. Korn, Theresa M. Korn. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review* (Dover Civil and Mechanical Engineering). 2 Revised Edition, (2000), 1152
- [11] Andre Angot, *COMPLEMENTS DE MATHÉMATIQUES à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications*, Paris, (1957), 778.

УДК 621: 62-4

**В. І. Скицюк, Т. Р. Клочко**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЗОНЫ ПРИСУТСТВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ

Статья посвящена исследованию характера распределения дискретных элементов в зоне присутствия абстрактного объекта при условии наличия загрязнения поверхности технологического объекта. Определены основные типы кривизны технологических поверхностей, а также причины распределения твердых частиц на поверхности, что влияет на точность измерений.

Проведенные исследования показали, что дискретные элементы пыли на поверхности абстрактной сущности, в частности технологического объекта, накапливаются согласно мощности силового поля, которое присуще этой абстрактной сущности, образуя дискретную твердотельную зону ее присутствия.

Моделирование твердотельной дискретной зоны присутствия объектов разных типов кривизны поверхности показало, что дискретные элементы зоны равномерно распределяются по поверхности объекта пропорционально силам взаимодействия между отдельными дискретными частицами.

Для лучшего описания процессов при исследовании влияния наличия пыли как элементов дискретной твердотельной зоны АС на метрологические функции контрольно-измерительных приборов все эти явления можно описать волновыми уравнениями параболического типа с соответствующими краевыми ограничениями, также представляют интерес в дальнейших исследованиях проблемы повышения точности измерений параметров качества изготовления деталей точных приборов, в частности твердости и шероховатости поверхности объекта.

**Ключевые слова:** технологический объект, дискретные элементы, загрязнение поверхности, твердость.

**Volodymyr Skytsiuok, Tatiana Klotchko**

#### MODELING OF MULTIPLE DISCRETE SOLID FIELD OF PRESENCE OF A TECHNOLOGICAL OBJECT OF DIFFERENT SURFACE CURVATURE

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

The article deals with the study of the nature and distribution of discrete elements in the presence of an abstract object, provided that there is a contamination of the surface of the technological object. The basic types of the curvature of technological surfaces, as well as the reasons for the distribution of solid particles on the surface, which influence the accuracy of measurements, are determined.

Studies have shown that discrete dust particles on the surface of an abstract entity (AE), in particular, a technological object, accumulate in accordance with the strength of the field, which is inherent in this abstract entity, forming a discrete solid state zone of its presence.

The modeling of the solid-state discrete zone of the presence of objects of various types of surface curvature showed that the discrete elements of the zone are evenly distributed along the surface of the object in proportion to the forces of interaction between individual discrete particles.

For a better description of the processes in the study of the influence of the presence of dust as elements of the discrete solid-state zone of the AE on the metrological functions of control and measuring devices, all these phenomena can be described by wave equations of a parabolic type with corresponding boundary constraints, which are also further research problems of increasing the accuracy of measurements quality parameters manufacturing precision parts devices, in particular the hardness and roughness of the surface of the object.

It is also advisable to conduct a simulation of a discrete solid state zone in the presence of an object that is a liquid in further research, since the presence of individual solids, for example, in lubricating fluids, affects the quality of the surface of the technological object.

**Keywords:** technological object, discrete elements, surface contamination, hardness.

*Надійшла до редакції  
09 жовтня 2018 року*

*Рецензовано  
17 жовтня 2018 року*