МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-2(43)-5-15

ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОЇ ПЛОЩІ СУХОГО АКУСТИЧНОГО КОНТАКТУ В СИСТЕМІ «ПЕРЕТВОРЮВАЧ–ВИРІБ» У НИЗЬКОЧАСТОТНІЙ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

О. Г. Бондаренко

Інститут електрозварювання ім.Є. О. Патона НАН України
03650, Київ-150, вул. К. Малевича, 11, e-mail: usndt@ukr.net

Умови випромінювання акустичної енергії в середовище трубопроводу та приймання відбитих сигналів від несуцільностей при сухому акустичному контакті обумовлюють певні розміри фактичної площі контакту між перетворювачами та поверхнею труби. Сформульовано основні підходи до визначення фактичної площі сухого акустичного контакту між поверхнями п'єзоперетворювача та труби під дією постійної статичної сили притискання поверхонь у низькочастотній дефектоскопії з використанням ультразвукових спрямованих хвиль. Запропоновано вирази для визначення площі фактичного акустичного контакту для одиночного та чисельних мікровиступів поверхні труби. Описано принцип контролю якості балансування п'єзоперетворювачів акустичних антенн у сучасних системах низькочастотної діагностики технічного стану протяжних трубопроводів ультразвуковими спрямованими хвилями. Виявлено, що після проведення правильного балансування усіх п‘єзоперетворювачів акустичної антени зображення стовпчиків на екрані дисплея не з‘являється і математичне забезпечення системи буде автоматично виконувати збирання даних про технічний стан діагностуємої дільниці трубопроводу, результати якого виводяться на екран дисплея. Встановлено, що фактична площа сухого акустичного контакту в системі «п’єзоперетворювач-виріб» у низькочастотній дефектоскопії залежить від величини статичної сили притискання поверхні п'єзоперетворювачів до поверхні виробу. Виявлено, що деформація мікровиступів поверхні виробу під дією статичної сили притискання відбувається нерівномірно, що не дозволяє здійснювати у повній мірі розрахунок фактичної площі сухого контакту математичними методами. Показано, що у сучасних системах низькочастотного ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями контроль якості сухого контакту поверхні п'єзоперетворювачів з поверхнею труби здійснюється шляхом балансування акустичних антенн з використанням спеціальних тестових програм.

Ключові слова: сухий контакт, площа контакту, поверхня контакту, одиночний мікровиступ, форма мікровиступів.

Условия излучения акустической энергии в среду трубопровода и приема отраженных сигналов от несплошностей при сухом акустическом контакте обусловливают определенные размеры фактической площади контакта между преобразователями и поверхностью трубы. Сформулированы основные подходы к определению фактической площади сухого акустического контакта между поверхностями Пьезопреобразователи и трубы под действием постоянной статической силы прижима поверхностей в низкочастотной дефектоскопии с использованием ультразвуковых направленных волн. Предложено выражения для определения площади фактического акустического контакта для одиночного и многочисленных микровыступов поверхности трубы. Описаны принцип контроля качества балансировки пьезопреобразователей акустических антенн в современных системах низкочастотной диагностики технического состояния протяженных трубопроводов ультразвуковыми волнами. Выявлено, что после проведения правильного балансирования всех пьезопреобразователей акустической антенны изображение колонок на экране дисплея не появляется и математическое обеспечение системы будет автоматически выполнять сбор данных о техническом состоянии диагностируемого участка трубопровода, результаты которого выводятся на экран дисплея. Установлено, что фактическая площадь сухого акустического контакта в системе «Пьезопреобразователи-изделие» в низкочастотной дефектоскопии зависит от величины статической силы прижима поверхности пьезопреобразователей к поверхности изделия. Выявлено, что

деформация микровыступов поверхности изделия под действием статической силы прижима происходит неравномерно, что не позволяет осуществлять в полной мере расчет фактической площади сухого контакта математическими методами. Показано, что в современных системах низкочастотного ультразвукового диагностирования протяженных трубопроводов волнами контроль качества сухого контакта поверхности пьезопреобразователей с поверхностью трубы осуществляется путем балансирования акустических антенн с использованием специальных тестовых программ.

Ключевые слова: сухой контакт, площадь контакта поверхность контакта, одиночный микровыступов, форма микровыступов.

The conditions for the emission of acoustic energy into the pipeline environment and the reception of reflected signals from inconsistencies in dry acoustic contact cause certain dimensions of the actual contact area between the transducers and the pipe surface. The basic approaches to the determination of the actual area of dry acoustic contact between the surfaces of the piezoelectric transducer and the pipe are formulated under the influence of constant static force of pressing the surfaces in low-frequency flaw detection using ultrasonic directional waves. Expressions have been proposed to determine the area of actual acoustic contact for single and numerical micro projections of the pipe surface. The principle of quality control of balancing of acoustic antenna piezoelectric transducers in modern systems of low-frequency diagnostics of the technical state of longitudinal pipelines by ultrasonic directed waves is described. It is revealed that after correct balancing of all the acoustic antenna piezoelectric transducers, the column image does not appear on the display screen and the mathematical support of the system will automatically collect the technical status of the diagnosed section of the pipeline, the results of which are displayed on the display screen. It is established that the actual area of dry acoustic contact in the "piezoelectric product" system in low-frequency defectoscopy depends on the magnitude of the static force of pressing the surface of the piezoelectric transducer to the surface of the product. It is revealed that the deformation of the micro protrusions of the surface of the product under the action of static clamping force is uneven, which does not allow to fully calculate the actual area of dry contact by mathematical methods. It is shown that in modern systems of low-frequency ultrasonic diagnostics of extended pipelines, directional waves control the quality of dry contact of the surface of the piezoelectric transducer with the surface of the pipe by balancing acoustic antennas with the use of special test programs.

Keywords: dry contact, contact area, contact surface, single micro protrusion, shape of micro protrusions.

Вступ.

У роботі [1] наведено аналіз впливу основних факторів контактуючих поверхонь при сухому акустичному контакті в системі «перетворювач-виріб» у низькочастотній дефектоскопії, виконана оцінка номінальної і контурної площин зони контакту на прикладі контактуючих поверхонь перетворювача та труби й подано спосіб оцінки геометричних характеристик контактуючих поверхонь. Нижче будуть розглянуті особливості визначення фактичної площі сухого акустичного контакту між поверхнями перетворювача та труби у низькочастотній дефектоскопії.

Чинники, що впливають на величину площі фактичного контакту. Умови випромінювання акустичної енергії в середовище трубопроводу та приймання відбитих сигналів від несуцільностей при сухому акустичному контакті обумовлюють певні розміри фактичної площі контакту між перетворювачами та поверхнею труби. Чинники, які визначають величину фактичної площі контакту при стиканні поверхонь перетворювача та труби під дією постійної сили F_0, можна розділити на дві групи: геометричні та фізико-механічні. До геометричних чинників відносяться шорсткість, хвилястість та макровідхилення поверхні труби, величина зближення та площа контакту. До фізико-механічних чинників відносяться пружність, пластичність та твердість матеріалу труби.

Характер процесів, що відбуваються в зоні стискання перетворювача з трубою при сухому акустичному контакті у значній мірі визначається цими чинниками. Очевидно, що при формуванні контакту між перетворювачем та трубою під дією постійної сили F_0 параметри обох груп факторів взаємно пов‘язані й визначити вплив якого-небудь одного із них на величину площі фактичного контакту без знання інших неможливо. Так, величина фактичної площі контакту, яка залежить від геометричних факторів поверхонь перетворювача та труби, з одного боку визначає питомий тиск між ними під дією постійної сили F_0, а з іншого боку розміри та розподілення

елементарних площадок контакту при відповідних значеннях фізико-механічних властивостей матеріалів перетворювача і труби обумовлюють умови передачі акустичної енергії в системі «перетворювач – труба». У загальному випадку фактична площа акустичного контакту перетворювача з трубою під дією постійної сили F_0 залежить від величини зближення α цих поверхонь. Величина зближення α буде визначатися деформаціями нерівностей контактуючих поверхонь: макронерівностей, хвилястостей та мікронерівностей (шорсткості). Величину зближення α поверхонь в цьому випадку можна представити у вигляді:

$$\alpha = \alpha_м + \alpha_х + \alpha_ш,$$

де $\alpha_м$, $\alpha_х$, $\alpha_ш$ - відповідно зближення поверхонь перетворювача та труби за рахунок макронерівностей, хвилястостей та шорсткості.

Отже, для визначення фактичної площі контакту між перетворювачами та трубою необхідно встановити зв‘язок величини зближення $\alpha(\alpha_м, \alpha_х, \alpha_ш)$ їх поверхонь під дією постійної сили F_0 з урахуванням фізико-механічних властивостей контактуючих поверхонь. Враховуючи, що деформації макронерівностей матеріалу відбуваються тільки при значних навантаженнях, то для спрощення задачі визначення фактичної площі контакту деформації макронерівностей та величину зближення $\alpha_м$ враховувати не будемо.

Проведені експериментальні дослідження поверхні труби показали, що при контакті поверхонь перетворювача і труби мають значення хвилястість та шорсткість труби [2]. Хвилястість труби, яка характеризується формою та ступенем, впливає на область та густоту розподілення зон фактичного контакту та, відповідно, на розміри контурної площі контакту. Тому при подальшому розгляді фактичної площі контакту між перетворювачем та трубою величину зближення $\alpha_х$ між ними за рахунок хвилястості враховувати також не будемо.

Розрахунок фактичної площі сухого контакту між поверхнями перетворювача і труби виконаємо для умов статичного стискання шорсткостей труби під дією постійної статичної сили F_0.

Задачу визначення фактичної площі акустичного контакту між поверхнями перетворювача та труби будемо розглядати у припущенні, що поверхня перетворювача є гладкою та абсолютно шорсткою, а поверхня труби – пружною та шорсткою. При цьому будемо враховувати, що форма мікровиступів шорсткої поверхні труби може бути різнобічною та далекою від геометрично правильної. У машинобудуванні в процесі розрахунку деформації шорстких поверхонь мікровиступи модулюють набором тіл геометрично правильної форми. В якості моделей поодиноких мікровиступів використовують клин, піраміду, стрижень, конус, сферу, еліпсоїд тощо [3].

Для визначення фактичної площі акустичного контакту поверхні перетворювача з поверхнею труби будемо вважати, що шорсткість поверхні труби має точкове розподілення, окремі мікровиступи якої можна моделювати у вигляді конуса зі сферою при вершині. В цьому випадку важливою геометричною характеристикою таких мікронерівностей є радіус закруглення вершин мікровиступів, який будемо вважати однаковим для сфери при вершині мікровиступу. Це пов‘язано з тим, що для визначення величини деформації одиночного мікровиступа в процесі стискання перетворювача з трубою під дією статичної сили F_0, його необхідно представити у вигляді геометрично правильного тіла через те, що тільки для таких тіл на даний час вирішено контактні задачі теорії пружності.

Визначення площі контакту поверхні перетворювача з одиночним мікровиступом поверхні труби. Для визначення площі фактичного контакту перетворювача з одиночним мікровиступом поверхні труби у вигляді конуса зі сферою при вершині скористуємося принципом зближення виступу з площиною, наведеним у роботі [4]. Схема на рис. 1 ілюструє принцип стискання виступу поверхні труби у вигляді конуса зі сферою при вершині з площиною п’єзопластини перетворювача під дією статичної сили F_0, де r - радіус закруглення вершини мікровиступу у

вигляді сфери; a - радіус площадки контакту після зближення поверхонь; α_i - величина зближення поверхні перетворювача з *i*-им мікровиступом труби під дією сили F_0.

Враховуючи, що згідно рис. 1 сила F_0 притиснення одиночного виступу поверхні труби до поверхні перетворювача діє в одній точці *B*, то будемо вважати цю силу F_0 зосередженою, а контакт точковим. Під дією зосередженої сили F_0 відбувається деформація мікровиступу у вигляді сфери, в результаті якої площина перетворювача із положення 0-0 переміститься на деяку малу відстань α_i (зближення). Враховуючи , що вершина мікровиступу має форму сфери, то площа фактичного контакту між перетворювачем та мікровиступом буде відповідати колу з радіусом α.

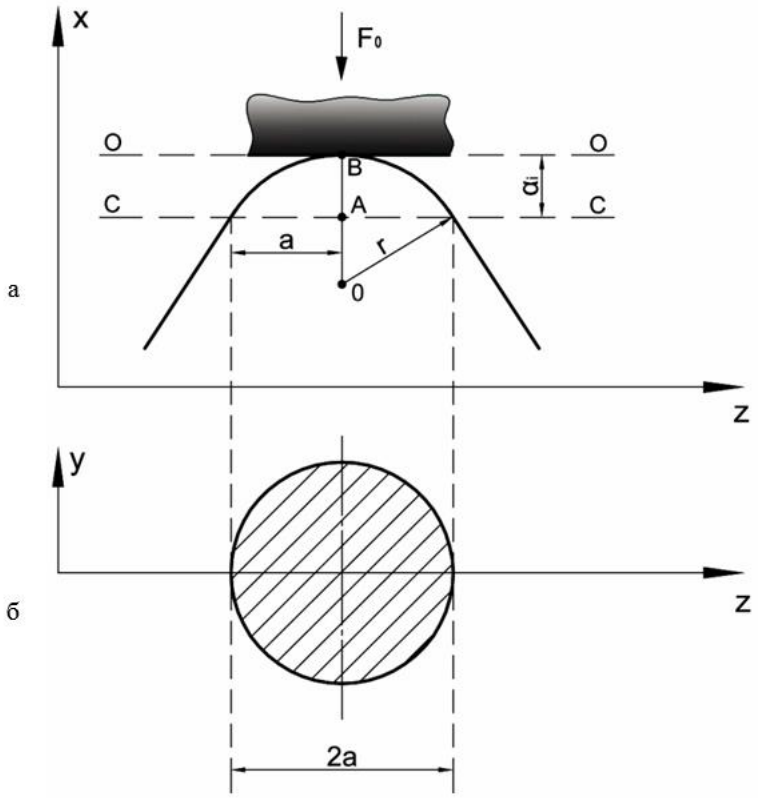

Рисунок 1. – Схема стискання мікровиступу труби під дією статичної сили F_0 (а) та площадка контакту після зближення поверхонь (б):
0-0 – початкове положення площини перетворювача (точка В) до стискання мікровиступу;
С-С – положення площини перетворювача після стискання мікровиступу силою F_0.

Визначимо значення величини зближення α_i. Виходячи із схеми рис. 1, запишемо два рівняння:

$$OA^2 = r^2 - a^2, \qquad OA^2 = (r - \alpha_i)^2. \tag{1}$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (1), отримаємо:

$$(r - \alpha_i)^2 = r^2 - a^2. \tag{2}$$

Розв‘язуючи рівняння (2), маємо:

$$\alpha_i^2 - 2r\alpha_i + \alpha^2 = 0. \tag{3}$$

Якщо відкинути у рівнянні (3) α_i^2 як малу величину другого порядку, то вираз для

визначення значення величини зближення буде мати вигляд:

$$\alpha_i = \frac{a^2}{2r}. \quad (4)$$

Із виразу (4) значення радіуса a фактичної площі $S_{\phi i}$ контакту перетворювача з одиночним мікровиступом поверхні труби у вигляді сфери має вид:

$$a = \sqrt{2r\alpha_i}. \quad (5)$$

Виходячи з умови, що зона контакту перетворювача з одиночним виступом труби у вигляді сфери має форму кола, то фактична площа $S_{\phi i}$ контакту буде визначатися формулою:

$$S_{\phi i} = \pi a^2 = 2\pi r\alpha_i. \quad (6)$$

У вираз (6) входять дві невідомі величини: зближення α_i поверхонь перетворювача та труби під дією постійної сили F_0 та радіус r закруглення мікровиступу поверхні труби у вигляді сфери при її вершині.

Величина зближення α_i поверхонь перетворювача та труби залежить від постійної сили F_0 та фізико-механічних характеристик контактуючих поверхонь.

Для визначення величини зближення α_i мікровиступу поверхні труби у вигляді сфери із площиною перетворювача скористуємося формулою для зближення двох сфер [5], записавши їх у вигляді:

$$\alpha_i = \sqrt[3]{F_0^2 D^2 \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r^1}\right)} \quad (7)$$

де r та r^1 - радіуси сфер.

Враховуючи, що радіус площини дорівнює нескінченності, то прийнявши у виразі (7), наприклад, відношення $1/r^1 = 0$, ми отримуємо формулу для визначення зближення α_i між площиною та сферою від дією зосередженої сили F_0 у вигляді

$$\alpha_i = \sqrt[3]{\frac{F_0^2 D^2}{r}}, \quad (8)$$

де

$$D = \frac{3\pi}{4} \cdot \frac{(1-\mu^2)}{E}. \quad (9)$$

У виразі (9) μ - коефіцієнт Пуассона, E - модуль Юнга матеріалу труби.

Співвідношення (8) визначає залежність між зосередженою силою F_0 притискання перетворювача до поверхні труби при сухому акустичному контакті та з причиняючим нею зближенням α_i між ними. При цьому треба відзначити, що величина зближення α_i пропорційна силі F_0 в степені 2/3.

Підставивши вираз (8) у формулу (6), отримаємо вираз для визначення площі $S_{\phi i}$ фактичного контакту для одного мікровиступу поверхні труби з поверхнею перетворювача:

$$S_{\phi i} = 2\pi r \sqrt[3]{\frac{F_0^2 D^2}{r}}. \quad (10)$$

Упростивши вираз (10), маємо:

$$S_{\phi i} = 2\pi \sqrt[3]{r^2 F_0^2 D^2}. \quad (11)$$

Із виразу (11) випливає, що величина фактичної площі $S_{\phi i}$ контакту перетворювача з однозначним мікровиступом труби є функцією трьох змінних: відомих постійної сили F_0 притискання поверхні перетворювача до поверхні труби та фізико-механічних характеристик D матеріалу труби й невідомого значення величини радіуса r закруглення вершини мікровиступу поверхні труби у вигляді сфери. Тому для визначення фактичної площі контакту навіть одиночного мікровиступу поверхні труби необхідно хоч приблизно мати значення радіусу r мікровиступів необроблених поверхонь 1…3 класів чистоти обробки для труб.

Величина радіуса r закруглення мікронерівностей у вершині залежить від форми тих мікронерівностей, що виникають на поверхні труби в результаті технології при її виготовленні. Форма цих мікронерівностей вельми різнобічна й залежить як від характеру застосування технологій при виготовленні труб, так і від фізико-механічних властивостей матеріалу, із якого виготовляється труба. Тому при вивченні форми нерівностей поверхні труб

бажано мати дані про межі зміни форм нерівностей та радіусів r закруглення вершин мікронерівностей.

Найбільш повні дані про радіуси закруглення вершин мікровиступів отримані в машинобудуванні для металічних поверхонь, що піддані механічній обробці. В машинобудуванні форму мікронерівностей зазвичай вивчають на основі профілограм з однаковим вертикальним та горизонтальним підсиленням. Так для оброблених поверхонь виробів за класами чистоти від 6 до 12 (шліфування, точіння, фрезування, стругання, полірування) радіус r вершин нерівностей при обробці поверхні в поперечному напрямку знаходиться в межах 4…1000 мк, а в продольному напрямку – від 100 до 1000 мк [3].

Визначення площі фактичного контакту зони стискання перетворювача з поверхнею труби. Повна площа фактичного контакту перетворювача з поверхнею труби буде складатися із окремих плям контактів, тобто буде мати дискретну структуру. Величина площі кожної із цих плям буде визначатися формою мікровиступів, їх деформацією під дією постійної сили F_0 притискання поверхонь перетворювача та труби, характеру розподілення виступів по висоті.

Визначимо площу фактичного контакту перетворювача з мікровиступами труби, розміщеними по прямій уздовж твірної труби по координаті z для двох випадків. В першому випадку будемо вважати, що на поверхні труби розміщені у великій кількості мікровиступи у вигляді конуса зі сферою при вершині одного радіусу та однієї висоти й розташовані з постійною щільністю. На рис. 2 наведена схема стискання мікровиступів труби однієї висоти під дією статистичної сили F_0.

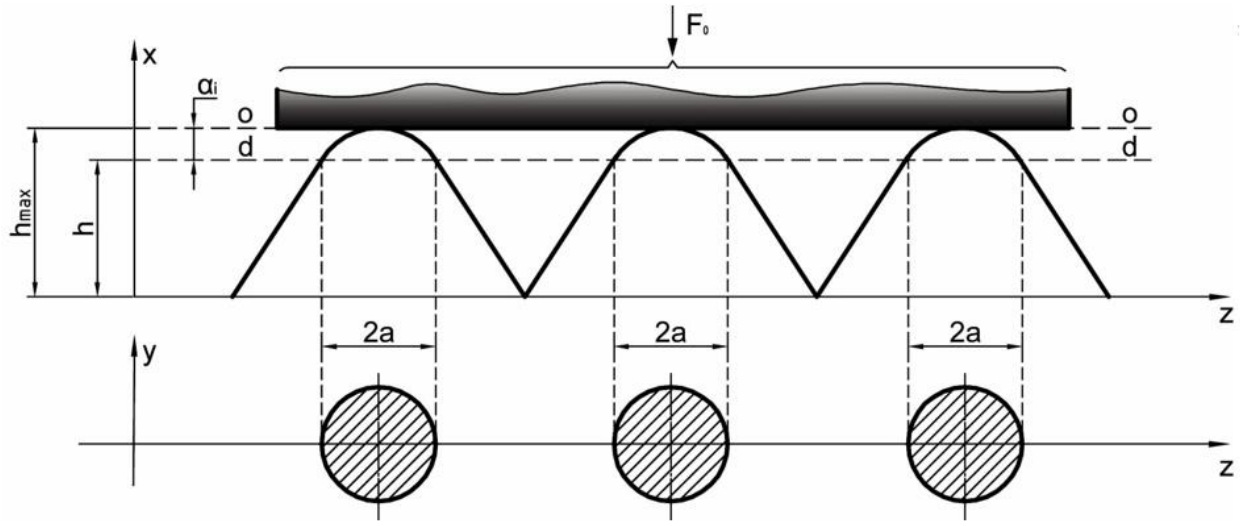

Рисунок 2 – Схема стискання мікровиступів труби однієї висоти під дією статистичної сили F_0 (а) та площадки контакту після зближення поверхонь (б):
h_{max} – максимальна висота виступів; h – висота виступів після стискання.

Згідно рис. 2 контакт перетворювача з поверхнею труби здійснюється по всім мікровиступам висоти h_{max} тому статичну силу F_0 притискання будемо розглядати як розподілену. По мірі збільшення сили F_0 всі виступи будуть деформуватися однаково до висоти h (рис. 2,а), а площа контакту кожного виступу буде мати форму кола діаметром $2a$ (рис. 2,б). В цьому випадку площа фактичного контакту між перетворювачем та поверхнею труби може буди визначена за формулою

$$S_{ф} = \sum_{i=1}^{n} S_{фi} = \sum_{i=1}^{n} 2\pi \sqrt[3]{r^2 F_0^2 D^2}\,, \qquad (12)$$

де n - кількість мікровиступів в контактній зоні.

Розглянемо тепер випадок формування контакту перетворювача з поверхнею труби, коли виступи у вигляді сфери розміщені з однаковою щільністю, мають однаковий радіус r закруглення вершин, але висоти мікровиступів змінюються від нуля до h_{max}. На рис. 3 наведена схема стискання мікровиступів труби різної висоти під дією статичної сили F_0.

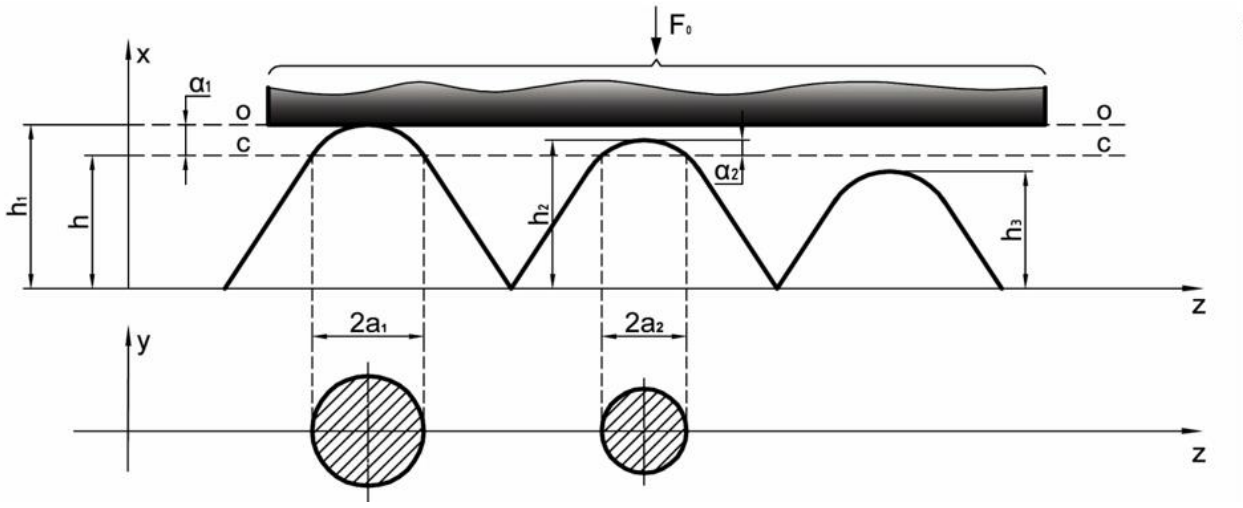

Рисунок 3 – Схема стискання мікровиступів труби різної висоти під дією статичної сили F_0 (а) та площадки контакту після зближення поверхонь (б).

При стисканні поверхонь перетворювача та труби первісний контакт відбувається по найбільш високим h_{max} виступам поверхні труби (рис. 3,а). По мірі зближення поверхонь при збільшенні сили F_0 в контакт вступає все більше число менш високих виступів. Найбільшу площу контакту (рис. 3,б) мають ті виступи, які зазнають найбільшої деформації. Із-за різної висоти (h_1, h_2) виступів поверхні труби вони будуть зазнавати різної деформації під дією статичної сили F_0, що буде приводити до різної величини зближення (α_1, α_2) на окремих виступах. Це означає, що на мікровиступи різної висоти відповідно буде діяти і менша статистична сила F_0 (F_{01}, F_{02}). Виступи меншої висоти взагалі не будуть зазнавати деформації. Із-за дії на виступи різної висоти відповідних статичних сил площі плям контакту окремих виступів будуть мати різний радіус (α_1, α_2 на рис. 3,б).

Якщо прийняти, що на поверхні труби розміщуються мікровиступи різної висоти, то на основі формули (11) згідно рис. 3.а можна записати вирази для визначення площі фактичного контакту одного мікровиступу різної висоти:

$$S_{ф1} = 2\pi\sqrt[3]{D^2}\cdot\sqrt[3]{r_1^2 F_{01}^2};$$

$$S_{ф2} = 2\pi\sqrt[3]{D^2}\cdot\sqrt[3]{r_2^2 F_{02}^2}; \qquad (13)$$

……

$$S_{фк} = 2\pi\sqrt[3]{D^2}\cdot\sqrt[3]{r_{0к}^2 F_{0к}^2}.$$

При наявності великої кількості однакових мікровиступів різної висоти повна площа фактичного контакту перетворювача з поверхнею труби може бути визначена за формулою:

$$S_{\phi} = 2\pi\sqrt[3]{D^2}\cdot\left[\sum^{n}\sqrt[3]{r_1^2F_{01}^2}+\sum^{m}\sqrt[3]{r_2^2F_{02}^2}+...\sum^{l}\sqrt[3]{r_{\kappa}^2F_{0\kappa}^2}\right], \quad (14)$$

де n, m, …, l - кількість деформованих мікровиступів поверхні труби однакової висоти під дією відповідних статичних сил F_{01}, F_{02}, …, $F_{0\kappa}$.

Вище ми розглянули ідеалізований випадок визначення площі фактичного контакту між перетворювачем та поверхнею труби, прийнявши поверхню перетворювача ідеально гладкою, а труби – шорсткою, на поверхні якої знаходяться мікровиступи конусної форми із вершиною у вигляді сфер однакового радіусу, що розміщені по прямій уздовж твірної труби, а їх висоти вибрані різного відомого рівня.

Із даних, отриманих у машинобудуванні, можна вважати, що в більшості випадків для необроблених механічним шляхом поверхонь виробів розподілення нерівностей по висоті відповідає нормальному закону розподілення (закону Гауса). Використовуючи цей закон розподілення висот нерівностей, площу фактичного контакту всіх мікронерівностей у вигляді сфер при зближенні до величини h (рис. 3,а) можна визначити по формулі [4]:

$$S_{\phi} = \frac{2\pi rn}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{h}^{h_{\max}} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}}(x-h)dx, \quad (15)$$

де r - радіус сфери при вершині мікровиступу;

n - кількість контактних мікровиступів;

X - середня висота виступів;

x - вихідна висота виступу;

$(h_{\max}-h)$ - зближення контактуючих поверхонь під дією постійної сили F_0;

σ - середнє квадратичне відхилення.

В цьому випадку одержується складна залежність, яка не виражається в елементарних функціях. Тут зміна числа виступів зі зміною їх висоти прийнята вже не по прямій, а взята реальна поверхня, на якій мікронерівності розподілені рівномірно по усім напрямкам, паралельним поверхні труби, а розподілення виступів по висоті підпорядковується закону нормального розподілення.

На рис. 4 наведена одна із можливих моделей розглянутої поверхні, мікровиступи якої містять форму конуса із закругленнями їх вершин, близькими до сфери [6]. У наведеної моделі горизонтальне збільшення мікровиступів прийнято набагато більшим за вертикальне.

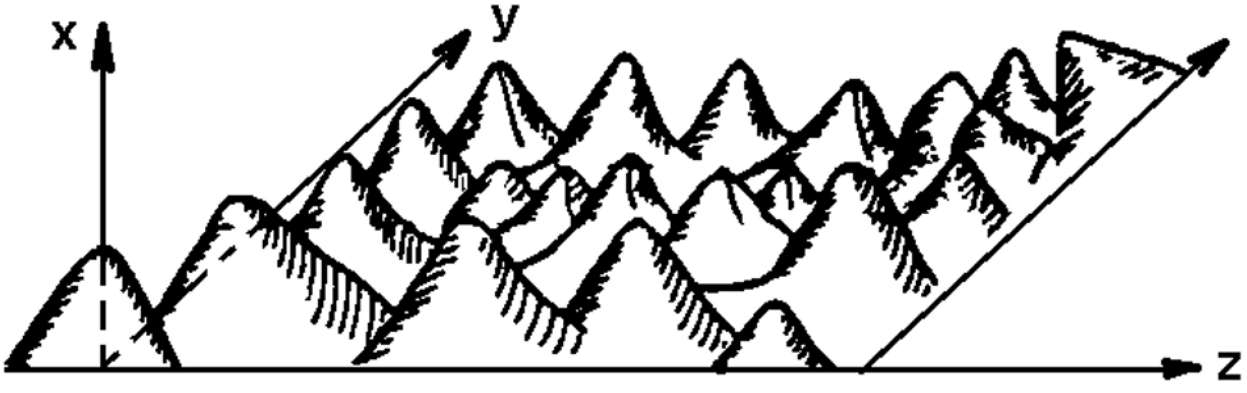

Рисунок 4 – Модель поверхні, виступи якої мають форму у вигляді конуса

Як писалося, форми мікровиступів шорсткої поверхні виробів можуть бути різнобічними та далекими від геометрично правильної. У машинобудуванні для розрахунку фактичних площ контактів деталей розроблені інші теоретичні методи, в яких в якості моделей застосовуються мікровиступи у формі клину, піраміди, стрижня, конуса, еліпсоїда тощо [3]. При цьому плями контакту можуть мати різнобічну форму, далеку від форми кола.

У машинобудуванні для визначення розмірів плям контакту застосовуються також експериментальні методи, одним із яких є метод вугільних плівок. У більшості випадків проведені в машинобудуванні дослідження підтверджують, що криві розподілення плям контактів для металевих поверхонь із сталі, міді та бронзи, оброблених фрезуванням, шліфуванням та поліруванням, підпорядковуються нормальному закону розподілення [3]. Найбільш ймовірний діаметр плями зростає зі зменшеннями твердості матеріалу. Так для досліджувальних сталевих поверхонь при тиску q = 6 н/мм^2 діаметр плями знаходився в межах 3…6 мк. При контактуванні металевих поверхонь, оброблених з чистотою 3…5 класів, зона деформації одиночних мікровиступів має діаметр в декілька десятків мікрон. Але це відбувається при великих значеннях тиску.

В той же час в машинобудуванні також помічено, що для оброблених деталей фактична площа контакту росте головним чином у результаті збільшення кількості плям контакту, а площа окремої плями залишається приблизно постійною. При притисканні деталей кількість плям зростає значно швидше, чим площа одиночної плями. Але, незважаючи на це, площа фактичного контакту завжди буде менше контурної площі контакту поверхонь деталей навіть в тому випадку, коли застосовуються звичайні методи механічної обробки деталей (точіння, фрезування тощо).

На основі проведених в машинобудуванні експериментальних досліджень з визначення фактичної площі контакту поверхонь оброблених механічним шляхом деталей встановлено [3], що величина цієї площі складає усього 20–30 % від контурної площі контакту.

Дії щодо забезпечення сухого акустичного контакту в сучасних низькочастотних системах контролю трубопроводів. Наведений аналіз визначення фактичної площі контакту перетворювача з поверхнею труби в низькочастотній дефектоскопії з використанням сухого контакту підтверджує складність вирішення цієї задачі із-за великої кількості взаємопов‘язаних факторів, що визначають величину фактичної площі контакту.

Очевидно подальші зусилля в першу чергу треба направити на визначення основних факторів, від яких в значній мірі залежить площа фактичного контакту між перетворювачем та поверхнею труби в низькочастотній дефектоскопії з використанням ультразвукових спрямованих хвиль.

На наш погляд основним із цих факторів є вихідна мікрогеометрія поверхні труби, тобто форма її мікровиступів в зоні контакту, які визначають величину фактичної площі контакту. Необхідно також знати, як проходять процеси деформування індивідуальних мікронерівностей та який сумарний вплив деформацій мікровиступів шорсткості поверхні на процес утворення площі фактичного контакту між поверхнями перетворювача та труби в низькочастотній дефектоскопії.

При проведенні робіт з діагностики технічного стану трубопровідних систем, що знаходяться в експлуатації, ця задача ще більше ускладнюється у зв‘язку з наявністю на поверхні труби можливого навіть незначного корозійного ураження, залишків захисного покриття труби на місці установлення перетворювачів акустичної антени. Це може привести до виникнення в місці установлення акустичної антени таких нерівностей поверхні труби як хвилястість та макровідхилення, врахувати вплив яких на фактичну площу контакту буде практично неможливо.

Тому, при установленні перетворювачів на поверхню труби, неможливо гарантувати отримання вичерпної відповіді, що в кожному конкретному випадку є основною геометричною характеристикою поверхні труби, яка визначає величину фактичної площі контакту між ними при наявності, наприклад, корозії на поверхні труби. Крім того, ми не можемо знати яким чином будуть притискатися поверхні кожного п‘єзоперетворювача багатоелементної акустичної антени до поверхні труби та як будуть деформуватися під ними нерівності поверхні труби під дією статичної розподіленої сили F_0 величиною до 20 кГ. Важливо також знати сумарний вплив деформацій достатньо значної кількості нерівностей поверхні труби на процес формування площі фактичного контакту між перетворювачем та поверхнею труби при сухому акустичному контакті в низькочастотній дефектоскопії. На ці питання практично відсутні

відповіді в науково-технічних джерелах, що стосуються визначення фактичної площі контакту при сухому акустичному контакті між поверхнями перетворювача та труби або інших протяжних об‘єктів у низькочастотній акустичній дефектоскопії.

У сучасних іноземних системах контролю протяжних трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями (Teletest, Wavemaker) передбачено спеціальний режим нормалізації кілець акустичної антени шляхом балансування п‘єзоперетворювачів, яке здійснюється автоматично за допомогою математичного забезпечення системи. Процес нормалізації кілець п‘єзоперетворювачів акустичної антени виконується перед процедурою збирання даних про технічний стан трубопроводу після установлення антени на трубу. В цьому режимі перевіряються якість сухого акустичного контакту між п‘єзоперетворювачами та поверхнею труби, тобто працездатність акустичної антени.

Якщо акустична антена після установлення на трубу не збалансована, тобто є проблема з нормальним контактуванням п‘єзоперетворювачів з поверхнею труби, на екрані дисплея з‘являється зображення амплітуд сигналів у вигляді восьми стовпчиків, які показують ступінь контакту між поверхнями 8-ми п‘єзоперетворювачів і труби. При наявності доброго контакту стовпчики на екрані дисплея перевищують допустимий рівень (ДР) по амплітуді і мають зелений колір. Якщо стовпчики по амплітуді не досягають допустимого рівня, то вони мають червоний колір. Це означає, що в цих місцях контакт між перетворювачем та поверхнею труби не достатній із-за зменшення фактичної площі контакту, що приводить до зменшення чутливості системи по цих каналах.

На рис. 5 наведено принцип контролю балансування п‘єзоперетворювачів акустичної антени.

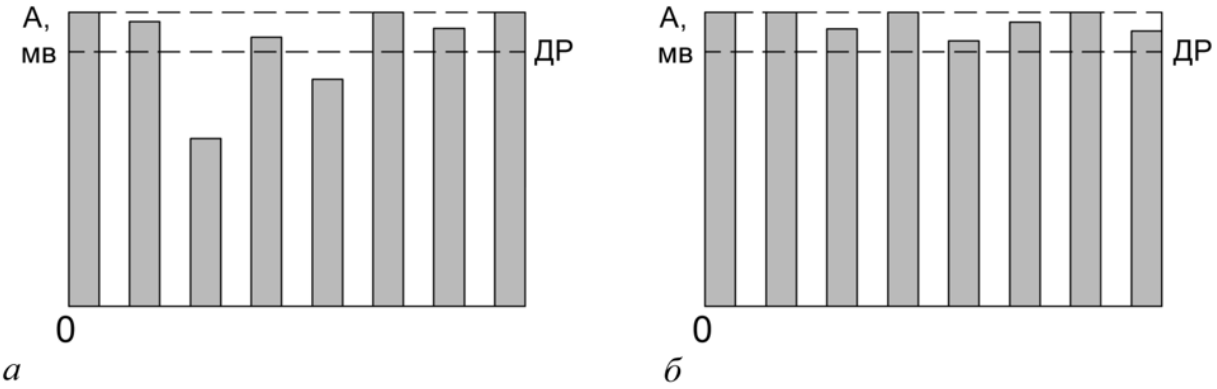

Рисунок 5 – Принцип контролю балансування п‘єзоперетворювачів акустичної антени: а) незбалансована антена; б) збалансована антена.

У разі виникнення проблеми з балансуванням перетворювачів треба перш за все перевірити справність п‘єзоперетворювачів. Якщо всі п‘єзоперетворювачі справні і залишаються незбалансованими, то спочатку підіймають тиск у пневматичному кільці акустичної антени, збільшуючи силу F_0 притискання п‘єзоперетворювачів до поверхні труби. Якщо при цьому площа контакту між ними не збільшується, то проводять повторне балансування антени на цьому місці, або переставляють її на нове місце труби. Після проведення правильного балансування усіх п‘єзоперетворювачів акустичної антени зображення стовпчиків на екрані дисплея не з‘являється і математичне забезпечення системи буде автоматично виконувати збирання даних про технічний стан діагностуємої дільниці трубопроводу, результати якого виводяться на екран дисплея.

В процесі проведення діагностування технічного стану трубопроводів може бути випадок, коли неможливо забезпечити балансування антени. Тоді можна провести збирання даних про технічний стан трубопроводу, але дефектоскопіст повинен

зробити у звіті відмітку, що результати були отримані при незбалансованій акустичній антені.

У сучасних іноземних системах для діагностування протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями збирання даних про технічний стан трубопроводу здійснюється на декількох частотах, які до цього вирахувані автоматично виходячи із кривих дисперсії та вихідної потужності збудження сигналів, яка залежить від вибраної відстані контролю.

Висновки.

1. Фактична площа сухого акустичного контакту в системі «п'єзоперетворювач-виріб» у низькочастотній дефектоскопії залежить від величини статичної сили притискання поверхні п'єзоперетворювачів до поверхні виробу.

2. Деформація мікровиступів поверхні виробу під дією статичної сили притискання відбувається нерівномірно, що не дозволяє здійснювати у повній мірі розрахунок фактичної площі сухого контакту математичними методами.

3. У сучасних системах низькочастотного ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями контроль якості сухого контакту поверхні п'єзоперетворювачів з поверхнею труби здійснюється шляхом балансування акустичних антенн з використанням спеціальних тестових програм.

Список використаних джерел

1. Бондаренко О.Г. Вплив факторів контактуючих поверхонь на чутливість системи «п'єзоперетворювач-виріб» у низькочастотній дефектоскопії // Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». – Київ: УТ НКТД, 22-24 листопада 2016. – С. 292-298.

2. Бондаренко О.Г., Стахнів М.Є. Експериментальні дослідження геометричних характеристик нерівностей поверхні труби // Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». – Київ: УТ НКТД, 22-24 листопада 2016. – С. 299-301.

3. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. – М.: Изд-во «Наука», 1970. – 226 с.

4. Рыжов Э.В. Основы расчета стыковых поверхностей деталей машин на контактную жесткость. – М.: Машгиз, 1962. – 143 с.

5. Ландау Л.Б., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1968. – 204 с.

6. Андреев Г.А. Построение кривой «опорной площади» поверхности /Сб. «Качество поверхности деталей машин. Труды семинара по качеству поверхности». № 5. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 170-175.

References

1. Bondarenko O.H. Vplyv faktoriv kontaktuiuchykh poverkhon na chutlyvist systemy «piezoperetvoriuvach-vyrib» u nyzkochastotnii defektoskopii // Materialy 8-yi Natsionalnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Neruinivnyi kontrol ta tekhnichna diahnostyka». Kyiv: UT NKTD, 22-24 lystopada 2016. P. 292-298.

2. Bondarenko O.H., Stakhniv M.Ie. Eksperymentalni doslidzhennia heometrychnykh kharakterystyk perivnostei poverkhni truby // Materialy 8-yi Natsionalnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Neruinivnyi kontrol ta tekhnichna diahnostyka». Kyiv: UT NKTD, 22-24 lystopada 2016. P. 299-301.

3. Demkyn N.B. Kontaktyrovanye sherokhovatikh poverkhnostei. M.: Nauka, 1970. 226 p.

4. Rizhov E.V. Osnovu rascheta stykovukh poverkhnostei detalei mashyn na kontaktnuiu zhestkost. M.: Mashhyz, 1962. 143 p.

5. Landau L.B., Lyfshyts E.M. Teoryia upruhosty. M.: Nauka, 1968. 204 p.

6. Andreev H.A. Postroenye kryvoi «opornoi ploshchady» poverkhnosty /Sb. «Kachestvo poverkhnosty detalei mashyn. Trud semynara po kachestvu poverkhnosty». No 5. M.:Yzd-vo AN SSSR, 1961. P. 170-175.