



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 58680

(13) A

(51) 7 G01N3/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДВИДАЄТЬСЯ ПІД  
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ  
ВЛАСНИКА  
ПАТЕНТУ

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ ПОКРИТТЯ

1

2

(21) 2002064683

(22) 07 08 2002

(24) 15 08 2003

(46) 15 08 2003, Бюл. № 8, 2003 р.

(72) Колотилкін Олег Борисович, Шевченко Володимир Григорович, Трескунов Борис Олександрович, Бельчиков Едуард Анатолійович

(73) ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) Спосіб визначення модуля пружності покриття, який полягає в тому, що виконують вимірювання геометричних розмірів досліджуваного зразка до нанесення покриття, а потім збуджують резонансні згинальні коливання і вимірюють резонансну частоту, який відрізняється тим, що додатково перед збудженням резонансних згинальних коливань виконують шліфування і полірування зовнішнього шару нанесеного покриття, а потім вимірюють геометричні розміри

біметалевого з'єднання і, крім того, визначають положення головних центральних осей зразка з покриттям, жорсткість зразка і погонну масу зразка з покриттям, а модуль пружності покриття визначають із співвідношення

$$E_{\Pi} = \frac{4\pi^2 f^2 m^* \left(\frac{l}{\alpha}\right)^4 - E_0 J_0}{\sum J_{\Pi}},$$

де  $E_{\Pi}$  - модуль пружності покриття, $f$  - власна частота зразка з покриттям, $\alpha = 1,875 - \text{const}$ , $m^*$  - погонна маса зразка з покриттям, $l$  - довжина зразка, $J_0$  - момент інерції зразка без покриття, $\sum J_{\Pi}$  - сума моментів інерції покриття щодо поперечної головної центральної осі  $U$ 

Винахід відноситься до галузі техніки вимірювань, а саме до способу визначення модуля пружності покриття і може бути використаний в інженерних розрахунках практично в усіх галузях техніки

Відомий спосіб визначення модуля пружності матеріалів (Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов К. Наукова думка, 1988 -136с.)

Спосіб включає вимір геометричних розмірів циліндричного зразка (розрахункова довжина і діаметр) до і після розтягування, визначення напруження на ділянці пружної деформації, визначення деформації і визначення модуля пружності із співвідношення

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ тг } \alpha,$$

де  $\sigma = \frac{P}{F_0}$  - напруження, створюване при

розтягуванні зразка навантаженням

 $P$  на площі поперечного перерізу зразка  $F_0$ , $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  - відносна деформація зразка,  $\Delta l$  -подовження зразка,  $l_0$  - первісна довжина зразка

Однак відомий спосіб призначений для визначення модуля пружності тільки конструкційного матеріалу без захисного покриття і при одноосовому розтягуванні

Суттєвим недоліком відомого способу є те, що він зовсім не дозволяє визначати модуль пружності покриття в біметалевих з'єднаннях ні статичним, ні динамічним методом

Відомий також спосіб дослідження динамічних характеристик в'язко-пружних матеріалів (а с №557292 СССР, МПК G01N3/00 Спосіб дослідження динамічних характеристик в'язкопружних матеріалів/ Морозова

И.Н., Рибак С.А. (СССР) №2159011/28, Заявлено 25 07 75, Опубл. 05 05 77, Бюл. №17 -С 138-139), що найбільш близький до рішення, що заявляється і який прийнятий нами як прототип

Відомий спосіб полягає в тому, що в досліджуваному тришаровому зразку, товщина досліджуваного середнього шару якого повинна бути не більше 0,1 від товщини крайніх шарів, вимірюють геометричні розміри, збуджують резонансні згинні

(13) A

(11) 58680

(19) UA

коливання і вимірюють резонансну частоту. Потім збуджують резонансні згинні коливання однорідного зразка, що має ті ж геометричні параметри, що і тришаровий, і виконаний з того ж матеріалу, що і крайні шари тришарового зразка, і вимірюють резонансну частоту. Потім визначають хвильове число для однорідного зразка, а модуль пружності досліджуваного зразка визначають за форму-

$$\text{полю } G = \frac{B_1 h_2 k_2 (D_1 k^4 - m \omega_s^2)}{2} \cdot \frac{D_1 k^4 - m_1 \omega_s^2 + \frac{B_1 h_1^2 k^4}{4}}{4}$$

де

$\omega_s = \omega \sqrt{1 + \eta}$  - комплексна резонансна частота тришарового зразка,

$\omega$  - резонансна частота тришарового зразка, отримана з експерименту,

$\eta$  - коефіцієнт втрат тришарового зразка,

$k$  - хвильове число одношарового зразка,

$\eta_1$  - товщина крайнього шару тришарового зразка,

$\eta_2$  - товщина досліджуваного середнього шару тришарового зразка,

$Y_1 E_1 h_1$  - розмірний коефіцієнт,

$E_1$  - модуль Юнга матеріалу крайнього шару,

$$D_1 = \frac{E_1 h_1^3}{12} - \text{згинна жорсткість матеріалу край-$$

нього шару,

$m_1 = \rho_1 h_1$  - маса матеріалу крайнього шару,

$\rho_1$  - щільність матеріалу крайнього шару

За допомогою відомого способу можна вимірювати модуль пружності тільки в середньому шарі, а це не завжди допустимо в техніці, тому що найчастіше необхідно вимірювати модуль пружності тільки в поверхневому шарі, наприклад при нанесенні на вироби покриттів і для тривалої експлуатації яких необхідно вимірювати модуль пружності саме в покритті. Крім того, відомий спосіб не дає високої точності вимірів. Суттєвим недоліком відомого способу є також те, що товщина досліджуваного середнього шару повинна бути не більше 0,1 від товщини крайніх шарів, тобто за товщиною середній шар і крайні шари практично однакові. У той же час при виробництві реальних деталей середній шар набагато перевищує товщину крайніх шарів. Так, наприклад, при ремонті деталей склоформуючого інструменту методами газопламенного наплавлення чи плазмового напилювання при товщині стінки деталі (середній шар) 10-20 мм товщина покриття не перевищує 1,0 мм. Деталь, як правило, виготовляють із нелегованих чи легованих чавунів, а покриття наносять сплавом на нікелевій основі.

У процесі експлуатації під впливом механічних і термоциклічних навантажень, через різні модулі пружності основного металу і покриття відбувається руйнування і відшарування покриття і зниження терміну експлуатації всієї деталі. Як уже було відзначено, відомий спосіб не дозволяє визначати модуль пружності в покритті, що ускладнює вибір покриття з модулем пружності найбільш близьким до основного металу.

Крім того, додаткові порушення резонансних коливань в однорідному зразку і визначення хвильового числа ускладнюють застосування відомого способу в інженерній практиці і призводять до зниження точності одержуваних результатів. А це викликає великі ускладнення при розрахунках, для яких необхідно одержувати результати з високою точністю, наприклад, при розрахунках лопаток турбін в авіаційному машинобудуванні.

Після нанесення покриття його зовнішній шар має досить велику жорсткість. При визначенні модуля пружності, тим більше динамічним способом, це впливає на точність одержуваних результатів. Результати наукових досліджень останніх років (Спротивление деформированию и разрушению / Трощенко В. Г., Красовский А. Я., Покровский В. В. и др. - Справочное пособие Т 2-К. Наукова думка, 1994 - С 210-236) показують, що стан поверхні матеріалів суттєво впливає на опір матеріалів руйнуванню. У той же час відомий спосіб не враховує такого важливого фактору, як стан поверхні, що, безумовно, знижує точність результатів з визначення опірності матеріалів руйнуванню.

Слід також зазначити, що у відомому рішенні обумовлений модуль пружності  $G$  характеризує опірність матеріалу пружній деформації при зсуві. У той час як модуль пружності  $E$  характеризує опірність матеріалу пружній деформації при розтягуванні. Таким чином, величини  $G$  і  $E$  є різними величинами, тому що характеризують опірність матеріалу при різних видах деформацій.

З критики аналога і прототипу впливає завдання створення такого способу, який би забезпечував визначення модуля пружності динамічним способом безпосередньо в покритті.

Поставлене завдання вирішується таким чином, що в способі, згідно з яким вимірюють геометричні розміри досліджуваного зразка до і після нанесення покриття, а потім збуджують резонансні згальні коливання і вимірюють резонансну частоту, додатково, перед збудженням резонансних згальних коливань, роблять шліфування, а потім полірування зовнішнього шару нанесеного покриття, а затім вимірюють геометричні розміри біметалевого з'єднання і, крім того, визначають положення головних центральних осей, сумарну жорсткість і погонну масу біметалевого з'єднання і визначають модуль пружності покриття із співвідношення

$$E_n = \frac{4\pi^2 f^2 \left(\frac{\ell}{\alpha}\right) - E_0 J_0}{\sum J_n}$$

де  $E_n$  - модуль пружності покриття,

$f$  - власна частота зразка з покриттям,

$\alpha = 1,875 \sqrt{5} = \text{const}$  - корінь рівняння частот згинних коливань,

$m^*$  - погонна маса зразка з покриттям (біметалевого з'єднання),

$\ell$  - довжина зразка,

$J_0$  - момент інерції зразка без покриття,

$\sum J_n$  - сума моментів інерції покриття щодо поперечної головної центральної осі  $U$ .

Сукупність відомих і нових технологічних прийомів, які заявляються і послідовність їх виконання

спричиняють виникнення нового технічного результату - визначення динамічним способом модуля пружності покриття

На фіг 1 подана розрахункова схема у вигляді зразка з нанесеним з 2 сторін покриттям

Спосіб визначення модуля пружності в покритті, який заявляється, реалізується наступним чином вимірюють геометричні розміри зразка 1 до нанесення покриття Потім наносять захисне покриття 2 і з метою усунення шорсткості шліфують, а потім полірують зовнішній шар покриття і роблять вимір геометричних розмірів усієї системи (біметалевого з'єднання)

Після цього визначають положення головних центральних осей зразка з покриттям, жорсткість зразка і погонну масу зразка з покриттям Потім зразок установлюють на вібростенд, збуджують резонансні згинні коливання і вимірюють резонансну частоту

З використанням усіх отриманих даних і за допомогою запропонованої формули визначають модуль пружності покриття

У лабораторії кафедри опору матеріалів ЗНТУ було проведено роботу з визначення модуля пружності у покритті з нікелевого сплаву, який містить бор, кремній і хром Покриття наносили на зразок з чавуну з кулястим графітом марки В4 з двох сторін методом плазмового напилювання Покриття наносили на зразок із двох сторін

Зразок був представлений у вигляді плоскої пластини Виміри геометричних розмірів показали, що його довжина  $l=97,5\text{мм}$ , ширина  $b=15\text{мм}$  і товщина  $h=1,85\text{мм}$

За допомогою плазмотрона з двох сторін зразка було нанесено захисне покриття Після шліфу-

$$Y_c = \frac{t_1^2 + 2kht_1 + 2t_1t_2 + kh^2 + 2ht_2 + t_2^2}{2(t_1 + kh + t_2)} =$$

$$\frac{0,5^2 + 2 \cdot 0,73918 \cdot 1,85 \cdot 0,5 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,4 + 0,73918 \cdot 1,85^2 + 2 \cdot 1,85 \cdot 0,4 + 0,4^2}{2(0,5 + 0,73918 \cdot 1,85 + 0,4)} = 1,3677\text{мм}$$

Знаходимо відстані по вертикалі від головних центральних осей до центральних осей відповідного шару

$$a_1 = Y_1 - Y_c = \frac{t_1}{2} - Y_c = \frac{0,5}{2} - 1,3644 = -1,1144\text{мм}$$

$$a_2 = Y_2 - Y_c = t_1 + \frac{h}{2} - Y_c = 0,5 + \frac{1,85}{2} - 1,3644 = 0,0606\text{мм}$$

$$a_3 = Y_3 - Y_c = t_1 + h + \frac{t_2}{2} - Y_c = 0,5 + 1,85 + \frac{0,4}{2} - 1,3644 = 1,1856\text{мм}$$

2 Визначаємо жорсткість зразка

$$E_0 J_0 = E_0 \left( \frac{bh^3}{12} + bha_1^2 \right) = E_0 bh \left( \frac{h^2}{12} + a_1^2 \right) =$$

$$0,683 \cdot 10^5 \cdot 15 \cdot 1,85 \left( \frac{1,85^2}{12} + (-0,0606)^2 \right) = 5,4752 \cdot 10^5 \text{мм}^2$$

3 Визначаємо суму моментів інерції покриття щодо поперечної головної центральної осі U

вання і наступного полірування зовнішніх поверхонь покриття робили виміри товщин відповідних шарів покриття, що склали  $t=0,5\text{мм}$ , і  $t_2=0,4\text{мм}$

Після установки зразка з покриттям на вібростенд ВЗДС-200 збуджували резонансні згинні коливання і визначали власну частоту зразка з покриттям, яка виявилася рівною  $f=154,7\text{Гц}$

Для визначення положення головних центральних осей (осі, відносно яких відцентровано момент інерції біметалевого з'єднання, дорівнює нулю) зразка з покриттям, його жорсткості і погонної маси використовували наступні дані

$E_0 = 0,683 \cdot 10^5 \text{МПа}$  - модуль пружності зразка, на який нанесено покриття з 2<sup>х</sup> сторін

$\rho_0 = 7,69 \cdot 10^{-6} \text{кг/мм}^3$  - щільність матеріалу зразка,

$f=154,7\text{Гц}$  - власна частота біметалу, яка визначена на вібростенді ВЗДС-200

$\kappa = \frac{E_0}{E_n} = 0,73918$  - коефіцієнт пружності, визначений при рішенні рівняння, яке має вигляд

$$f(\kappa) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\alpha}{\ell} \right)^2 \sqrt{\frac{\sum E_i J_i}{m^*}} - f = 0$$

Відповідно до вищевикладеної формули, необхідно обчислити  $m^*$ ,  $J_0$ ,  $J_{1II}$ ,  $J_{2II}$ , щоб визначити модуль пружності покриття  $E_n$

Але для того, щоб визначити ці величини, необхідно встановити величину  $K$ , яка визначається чисельним методом на комп'ютері за допомогою розв'язування рівняння  $f(\kappa)=0$

1 Спочатку знаходимо положення головних центральних осей U і V площі поперечного перерізу біметалевого з'єднання

$$\sum J_n = J_{1n} + J_{2n} = \frac{bt_1^3}{12} + bt_1 a_1^2 + \frac{bt_2^3}{12} + bt_2 a_2^2 =$$

$$= b \left[ t_1 \left( \frac{t_1^2}{12} + a_1^2 \right) + t_2 \left( \frac{t_2^2}{12} + a_2^2 \right) \right] =$$

$$= 15 \left[ 0,5 \left[ \frac{0,5^2}{12} + (-1,1144)^2 \right] + 0,4 \left[ \frac{0,4^2}{12} + 1,1856^2 \right] \right] = 17,984 \text{мм}^4$$

4 Визначаємо погонну масу, тобто масу зразка з покриттям (біметалу), що приходить на одиницю довжини

$$\begin{aligned} m^* &= b[\rho_0 h + \rho_n(t_1 + t_2)] \cdot 10^{-3} = \\ &= 15[7,69 \cdot 10^{-6} \cdot 1,85 + 7,69 \cdot 10^{-6}(0,5 + 0,4)] \cdot 10^{-3} = \\ &= 320,265 \cdot 10^{-9} \frac{\text{н} \cdot \text{с}^2}{\text{мм}^2} \end{aligned}$$

5 Визначаємо модуль пружності покриття

$$E_n = \frac{4\pi^2 f^2 m^* \left(\frac{\ell}{\alpha}\right)^4 - E_0 J_0}{\sum J_n} =$$

$$= \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 154,7^2 \cdot 320,265 \cdot 10^{-9} \left(\frac{97,5}{1875}\right)^4 - 5,4752 \cdot 10^5}{17,9841} =$$

$$= 0,9245 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Таким чином, за допомогою способу, що заявляється, можна розрахувати модулі пружності різних покриттів і вибирати покриття з модулем пружності, найбільш близьким до модуля пружності основного металу і запобігти передчасному руйнуванню покриття

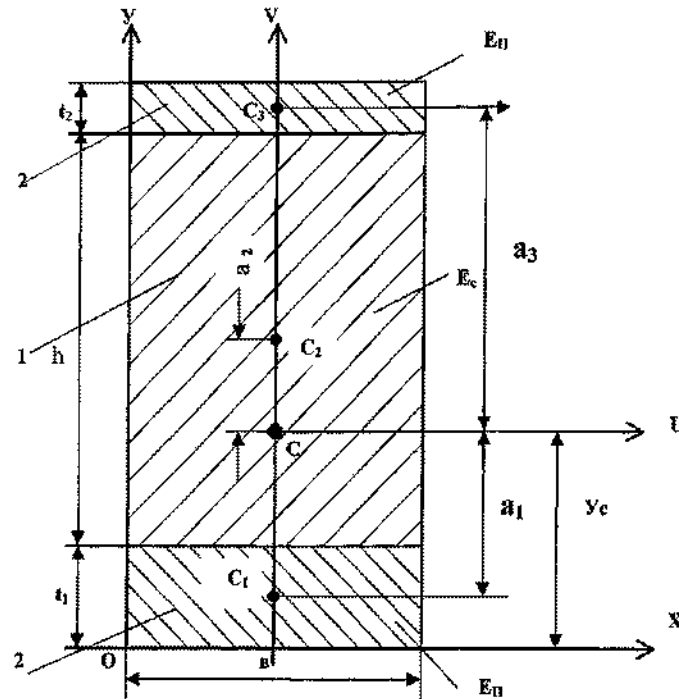


Fig.