

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Архангельский В.И.* Математическое описание формообразования толстого листа в алгоритмах автоматического управления прокаткой / *Архангельский В.И., Твардовский В.П., Иевлев Н.Г.* [и др.] // Технология легких сплавов: Научно-технический бюллетень. – М. : Всесоюзный институт легких сплавов. – 1981. – № 4. – С. 65–69.

2. *Иевлев М.Г.* Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів / *М.Г. Ієвлев, Г.Г. Грабовський.* – К. : Техніка, 2001. – 248 с.

3. *Shohet K.N.* Flatness control in plate rolling / *K.N. Shohet, N.A. Townsend* // Journal of the Iron and Steel Institute. – 1971. – № 10. – P. 769–775.

4. *Кухта Ю.Б.* Совершенствование процесса формирования поперечного профиля и плоскостности горячекатаных полос на основе моделирования работы

валковой системы «кварто»: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2009.

5. *Грабовский Г.Г.* Анализ влияния скоростной асимметрии на плоскостность листового проката применительно к АСУ ТП / *Г.Г. Грабовский, Н.Г. Иевлев.* – Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения. – М. : 1985, № 3030. – 24 с.

6. *Бельский С.М.* Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. – Москва, 2009.

7. *Салганик В.М.* Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы / *В.М. Салганик, П.П. Полецков, Ю.Б. Кухта, Л.Г. Егорова* // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 59–64.

УДК 621.9 (621.1-1-681.2)

СИСТЕМНИЙ СИНТЕЗ СУПЕРПРЕЦИЗІЙНОЇ ЛІНІЙНОЇ НАПРЯМНОЇ



В.О. Тарасов, *докт. техн. наук,*
Т.М. Назаренко,
Л.О. Злочевська

Упровадження сучасних, високих, науковомістких технологій вимагає постійного підвищення точнісних характеристик верстатів, які не повинні змінюватися під впливом динамічного навантаження та при тривалій експлуатації. Проблему точнісних характеристик можна розв'язати в різний спосіб: за рахунок жорсткої стабілізації радіального і осевого положення осі шпindelної опори; стабілізації положення рухомого елемента лінійної напрямної щодо нерухомої у просторі площини; системою рівнянь, котрі забезпечують зворотний зв'язок між комп'ютером і пристроями інформаційного управління верстата. У цій статті будемо розглядати питання стабілізації положення рухомого елемента несучої плоскої

опори суперпрецизійної лінійної напрямної відносно нерухомої у просторі площини.

Суперпрецизійна лінійна напрямна [1; 2] призначена для конструювання верстатів, що забезпечують обробку точних елементів оптики й механіки, зокрема, при конструюванні верстатів для обробки плоских поверхонь із особливо високою точністю.

Мета – підвищити точність стабілізації положення рухомого елемента плоских опор суперпрецизійної лінійної напрямної при обробці плоских поверхонь.

Викладення основного матеріалу. Для вирішення поставленої мети спочатку розглянемо *склад та елементи конструкції суперпрецизійної лінійної напрямної.*

Загальний вигляд суперпрецизійної лінійної напрямної показано на рис. 1, а її поперечний переріз – на рис. 2. Напрямна включає несучу плоску опору 1, оснащену пристроєм стабілізації положення рухомого елемента 2 несучої плоскої опори щодо нерухомої в просторі (нерухомої щодо основ датчиків 3, які утворюють поле датчиків 4 площини стабілізації Q і плоских поверхонь, що забезпечують точність обробки). Замикаюча плоска опора 5 (рис. 2) оснащена пристроєм стабілізації лінійного переміщення рухомого елемента 6 цієї опори. Пристрій забезпечує переміщення точок рухомого елемента замикаючої плоскої опори, що лежать на сліді проекції на площину рухомого елемента цієї опори прямої F , яка паралельна напрямку переміщення рухомого елемента і проходить через осі симетрії датчиків 8 і 9 величин зазорів стабілізації лінійного переміщення рухомого елемента, установлених по середній лінії основи 26 цієї опори без зміщення відносно прямої F .

Оснащення суперпрецизійної напрямної такими пристроями стабілізації досягається за рахунок того, що всі точки рухомого елемента несучої плоскої опори, шарнірно пов'язаного з рухомих елементом замикаючої плоскої опори й положення якого стабілізується щодо площини Q , переміщуються по прямих, паралельних цій площині Q , тобто, строго лінійно.

Рухомий елемент несучої опори (рис. 2) установлений із зазорами щодо її основ 10 і 11 і переміщається по роликах 12 п'єзоелектричних регуляторів 13 положення рухомого елемента. У основах несучої опори регулятори положення встановлюються попарно навпроти один одного. До кожної пари регуляторів входять пружний (рис. 3) і жорсткий (рис. 4) регулятори положення. Ролики регуляторів установлюються на радіальних підшипниках 14, 15 (вісь обертання ролика). Між корпусом 16 ролика й повзуном 17 у пружному регуляторі положення встановлюється пружина 19, що забезпечує постійне прилягання ролика до поверхні рухомого еле-

мента, а її жорсткість визначає піднімальну силу п'єзоелектричного регулятора положення при максимальному подовженні п'єзостовпа 20. П'єзостовп установлюється між повзуном і регулювальним гвинтом 21, угвинченим у верхню стінку 22 корпуса 18 регулятора положення, та ізолюваний від них ізоляторами 23. Регулювальний гвинт призначений для установки початкового тиску ролика на рухомий елемент і установки рухомого елемента в

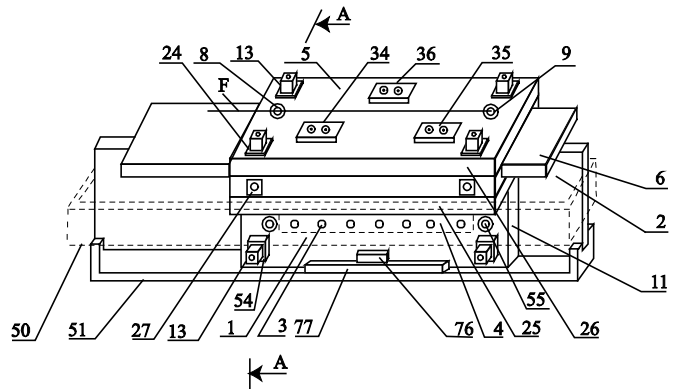


Рис. 1. Суперпрецизійна лінійна напрямна (загальний вигляд)

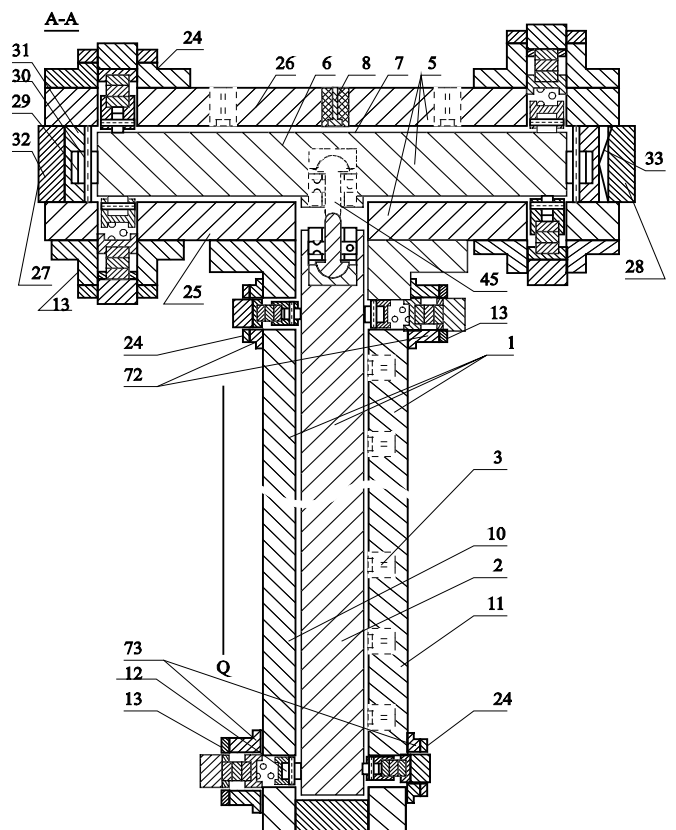


Рис. 2. Суперпрецизійна лінійна напрямна (поперечний переріз)

початкове положення по висоті зазора. Висока жорсткість несучої опори досягається тим, що в кожній основі опори встановлюються два пружних і два жорстких п'єзоелектричних регулятори положення, у яких, на відміну від пружних регуляторів, немає пружного елемента (пружини).

На одній із основ несучої опори між основами датчиків і поверхнею рухомого елемента встановлюються датчики 3 величин зазорів. Датчики розташовані рівномірно по області основи, розміщеної між регуляторами положення, й утворюють поле датчиків 4 (рис. 5).

Поле датчиків величин зазорів забезпечує побудову базової площини, що згладжує поверхню рухомого елемента, та площин, які

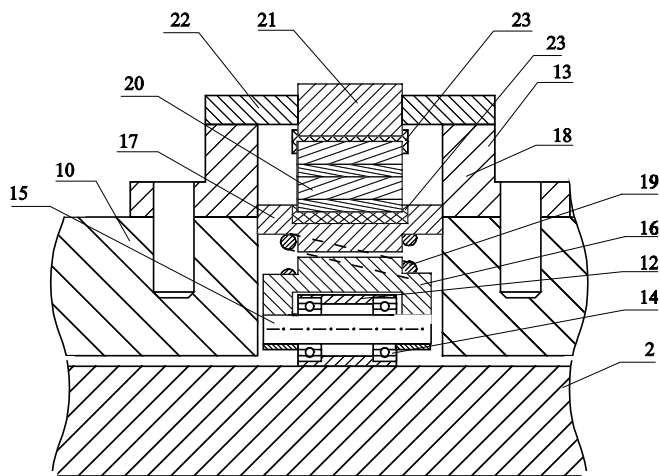


Рис. 3. Пружний п'єзоелектричний регулятор положення рухомого елемента суперпрецизійної лінійної напрямної

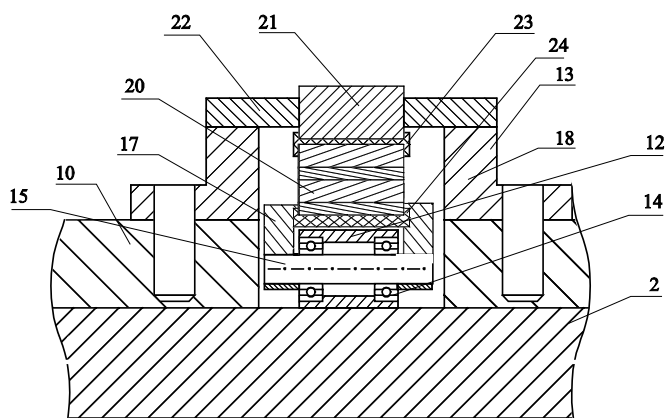


Рис. 4. Жорсткий п'єзоелектричний регулятор рухомого елемента суперпрецизійної лінійної напрямної

згладжують поверхню рухомого елемента на дискретах стабілізації. Основи датчиків поля датчиків установлюються в одну площину. Їхня кількість визначається заданою довжиною L переміщення рухомого елемента, точністю установки основ датчиків в одну площину, неплоскістю поверхні рухомого елемента, точністю виміру величин зазорів, необхідною точністю стабілізації положення рухомого елемента щодо площини стабілізації Q і може коливатися від трьох (в ідеальному випадку) до одного-двох десятків.

У безпосередній близькості від регуляторів положення встановлюються датчики 52, 53, 54, 55 величин зазорів стабілізації положення рухомого елемента несучої опори, призначені для виміру величин зазорів, що відповідають незбуреному положенню рухомого елемента щодо площини стабілізації. Для підвищення точності виміру величин зазорів стабілізації щодо поверхні рухомого елемента датчики встановлюються з мінімально припустимим зазором. Рухомий елемент 6 замикаючої плоскої опори 5 (рис. 2) встановлено із зазорами між основами 25 і 26 замикаючої опори, він переміщається по роликах п'єзоелектричних регуляторів положення рухомого елемента замикаючої опори. Як і в несучій опорі, регулятори положення в основах замикаючої опори встановлюються попарно навпроти один одного. Кожна пара регуляторів включає

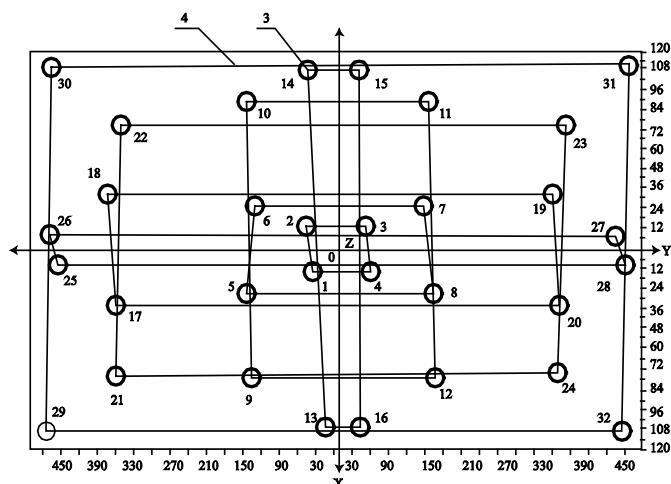


Рис. 5. Поле датчиків величин зазорів для побудови згладжувальних площин

один пружний і один жорсткий регулятор положення рухомого елемента.

У напрямку, перпендикулярному напрямку переміщення, силове замикання рухомого елемента замикаючої опори (див. рис. 1, 2) забезпечується двома парами обмежників поперечного зміщення рухомого елемента. У кожну пару входить жорсткий обмежник 27 і пружний обмежник 28. Жорсткий обмежник зміщення включає ролик 29, установлений на осі 30 у корпусі ролика. Положення ролика щодо бічної грані рухомого елемента встановлюється за допомогою регульовального гвинта 32. Пружний обмежник додатково має пружину 33. Цим забезпечується постійне прилягання бічних граней рухомого елемента замикаючої опори до роликів обмежників.

У основі 26 замикаючої опори по лініях, паралельних напрямку переміщення рухомого елемента (рис. 6), встановлено блоки 34, 35 і 36 датчиків положення рухомого елемента замикаючої плоскої опори. У кожному блоці датчиків встановлюються по два датчики величин зазора: перші C_1^1, C_1^2, C_1^3 та другі C_2^1, C_2^2, C_2^3 . Рухомий елемент плоскої несучої опори зв'язаний із рухомих елементом замикаючої плоскої опори (рис. 7) двома парами сферичних шарнірів 45, 46, 47, 48. У кожній парі півсфери й сфери 49 сферичних шарнірів 45 і 47 мають зворотний напрям жорсткості півсферам і сферам 49 сферичних шарнірів 46 і 48. Центри сфер сферичних шарнірів, установлених у рухомому елементі несучої опори, лежать на одній прямій, паралельній бічній грані цього рухомого елемента. Крім того, центри півсфер і сфер усіх шарнірів лежать у площині симетрії рухомого елемента несучої опори. Таке з'єднання рухомих елементів дозволяє змінювати положення рухомого елемента несучої опори по висоті зазора й здійснювати його мікроповороти навколо осей X і Y системи координат $OXYZ$ (рис. 7) у процесі стабілізації положення незалежно від рухомого елемента замикаючої опори.

Крім того, малі зміщення рухомого елемента замикаючої опори в поперечному напрямку через неплоскість його бічних граней не порушують лінійності переміщення рухомого елемента несучої опори.

Для установки оброблюваної деталі на рухомому елементі несучої опори встановлюється балка 50. Для установки вимірної лінійки лінійного індуктосина вимірника лінійного переміщення рухомого елемента на рухомому елементі встановлюється балка 51.

Як згадувалося, датчики величин зазорів стабілізації рухомого елемента несучої опори й датчики величин зазорів стабілізації лінійного переміщення рухомого елемента замикаючої опори встановлюються з мінімальними зазорами. Для запобігання їхньому руйнуванню в аварійних ситуаціях ці датчики встановлюються в конічній втулці 56, що за

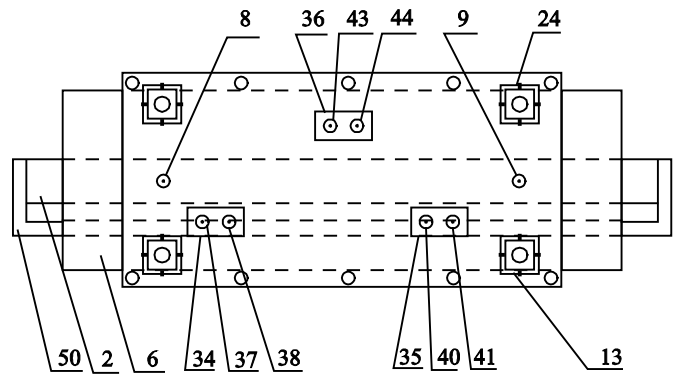


Рис. 6. Основа замикаючої опори із блоками датчиків і регуляторами положення рухомого елемента замикаючої опори

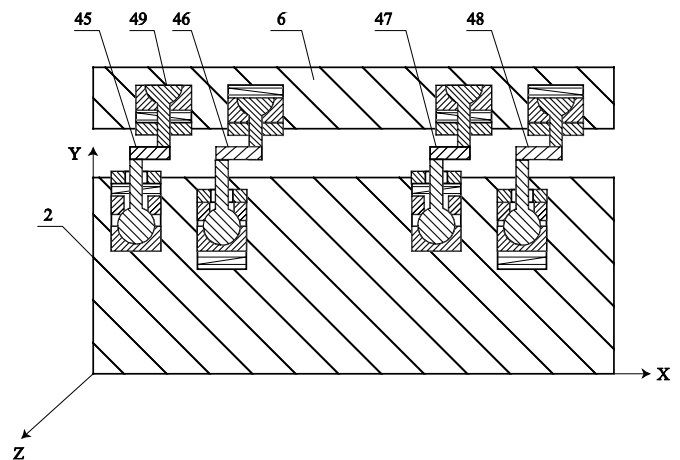


Рис. 7. Кінематична система з'єднання рухомого елемента несучої опори з рухомих елементом замикаючої опори

допомогою пружини 57 і регулювального гвинта 58 утримується в корпусі 59 пристрою запобігання руйнуванню датчика, угвинченому в основу опори (рис. 8).

Суперпрецизійна лінійна напрямна може оснащуватися пристроєм для вирівнювання поверхонь рухомих елементів несучої й замикаючої опор по сліду датчиків величин зазорів стабілізації. Пристрій (рис. 9) включає корпус 60 і державку 61 алмазного бруска 62. Брусок у державці за допомогою пружини 63 і регулювального гвинта 64 підтиснутий до рухомого елемента опори. Робота цього пристрою буде розглядатися нижче.

Спосіб стабілізації положення рухомого елемента несучої плоскої опори суперпрецизійної лінійної напрямної (спосіб згладжувальних площин). Стабілізація положення рухомого елемента несучої плоскої опори здійснюється шляхом суміщення на дискретних стабілізації площини, що згладжує поверхню рухомого елемента, із площиною стабілізації. За площину стабілізації приймається площина, нерухома щодо основ датчиків поля датчиків, і згладжувальна поверхня цього рухомого елемента при його положенні щодо основ датчиків того ж поля датчиків, прийнятого за незбурене.

Спосіб згладжувальних площин порівняно зі способом опорних зазорів має низку істотних переваг:

1. Інформація про положення згладжуваної поверхні надходить у великому надлишку,

що забезпечує високу стабільність прив'язки згладжувальної площини до точок плоскої згладжуваної поверхні. Надлишок інформації дозволяє знизити вимоги до точності установки основ датчиків поля датчиків в одну площину.

2. Похибка установки рухомого елемента в незбурене положення на дискреті стабілізації не залежить від похибки його установки в незбурене положення на попередніх дискретах стабілізації, що виключає накопичення похибок положення рухомого елемента.

3. Мінімальна величина дискрети стабілізації обмежується роздільною здатністю вимірника величини переміщення рухомого елемента, що практично не обмежує її нижнього значення.

Недолік способу – спосіб не розрізняє зміни кута нахилу згладжуваної поверхні.

Водночас зміна кута нахилу поверхні не порушує працездатності способу опорних зазорів, що інваріантний до рельєфу поверхні рухомого елемента. Точність стабілізації положення рухомих елементів плоских опор досягається на основі спільної реалізації цих способів: на етапі підготовки напрямної до роботи спосіб опорних зазорів забезпечує установку основ датчиків в одну площину й корекцію неплоскостності згладжуваної поверхні рухомого елемента. У процесі роботи напрямної стабілізація положення рухомого елемента несучої опори здійснюється за способом згладжувальних площин.

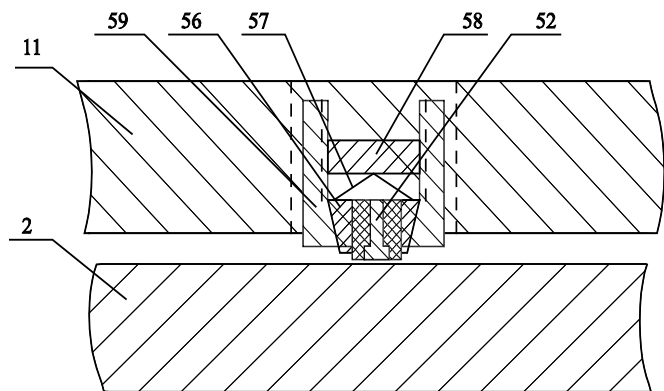


Рис. 8. Пристрій для запобігання руйнуванню датчиків величин зазорів

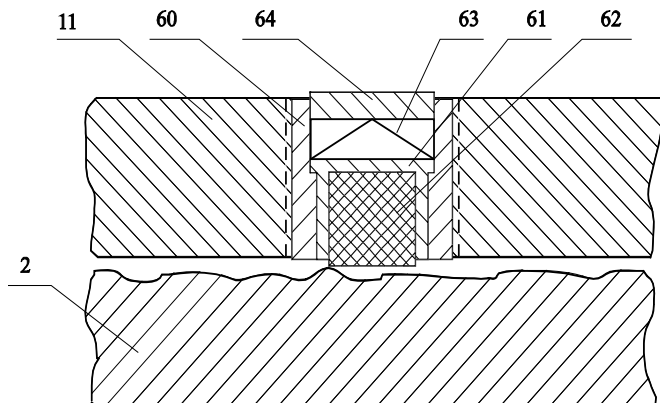


Рис. 9. Пристрій для вирівнювання поверхонь рухомих елементів суперпрецизійної лінійної напрямної

Систему координат $OXYZ$ уведемо таким чином (рис. 5, 10). Площину XOY сполучимо з площиною основи II несучої опори, вісь Y сполучимо з напрямком переміщення рухомого елемента, вісь Z направимо по висоті зазора, а її початок помістимо в центр поля датчиків. Основи датчиків поля датчиків із кінцевою точністю встановлено в площину XOY , X_q, Y_q – координати центра основи q -го датчика. Тоді координати точки поверхні рухомого елемента під q -м датчиком величини зазора X_q, Y_q, Z_q , де Z_q – величина зазора під (над) q -м датчиком.

Рухомий елемент за показниками вимірника величини лінійного переміщення рухомого елемента встановлюється в середнє по довжині переміщення положення. Вимірюються величини зазорів під Q датчиками поля датчиків $Z_1, Z_2, \dots, Z_\alpha, \dots, Z_\beta, \dots, Z_\gamma, \dots, Z_Q$.

Система рівнянь для визначення коефіцієнтів A, B, C рівняння площини $AX + BY + CZ + D = 0$, що проходить через три точки поверхні рухомого елемента з координатами $(X_\alpha, Y_\alpha, Z_\alpha), (X_\beta, Y_\beta, Z_\beta), (X_\gamma, Y_\gamma, Z_\gamma)$, має вигляд:

$$\begin{aligned} A(X_\alpha - X_\beta) + B(Y_\alpha - Y_\beta) + C(Z_\alpha - Z_\beta) &= 0; \\ A(X_\alpha - X_\gamma) + B(Y_\alpha - Y_\gamma) + C(Z_\alpha - Z_\gamma) &= 0; \\ A(X_\beta - X_\gamma) + B(Y_\beta - Y_\gamma) + C(Z_\beta - Z_\gamma) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Тоді $D = -AX_\beta - BY_\beta - CZ_\beta$.

Тут $\alpha \neq \beta \neq \gamma$; $1 \leq \alpha \leq Q$; $1 \leq \beta \leq Q$; $1 \leq \gamma \leq Q$; A, B, C – проекції нормального вектора до площини, що проходить через три точки з координатами $(X_\alpha, Y_\alpha, Z_\alpha), (X_\beta, Y_\beta, Z_\beta), (X_\gamma, Y_\gamma, Z_\gamma)$, на осі X, Y, Z системи координат $OXYZ$ відповідно.

Через Q точок поверхні рухомого елемента можна провести $N = C_Q^3$ площин, які визначаються C_Q^3 системами рівнянь виду (1). Система рівнянь виду (2) має нульове рішення. Для її вирішення коефіцієнт C прийемо в якості вільного невідомого. Тоді (1) перетвориться в систему двох рівнянь із двома невідомими:

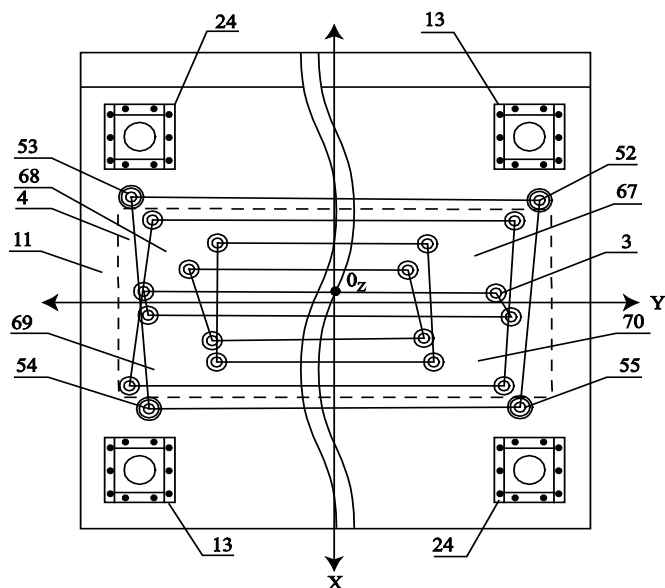


Рис. 10. Основа несучої плоскої опори з датчиками поля датчиків, датчиками величин зазорів стабілізації та регуляторами положення рухомого елемента несучої опори

$$\begin{aligned} A(X_\alpha - X_\beta) + B(Y_\alpha - Y_\beta) &= -C(Z_\alpha - Z_\beta) \\ A(X_\alpha - X_\gamma) + B(Y_\alpha - Y_\gamma) &= -C(Z_\alpha - Z_\gamma) \end{aligned} \quad (2)$$

Оскільки величини зазорів (координати $Z_\alpha, Z_\beta, Z_\gamma$) вимірюються з похибками, координати центрів основ датчиків поля датчиків відомі з похибкою установки датчиків, а різниці координат центрів основ датчиків у лівій частині системи (2) для деяких комбінацій датчиків можуть приймати близькі до нуля значення, то систему (2) слід віднести до класу погано обумовлених систем алгебраїчних рівнянь: малим похибкам визначення координат центрів основ датчиків і малим похибкам виміру висоти зазорів можуть відповідати відхилення рішень, що виходять за припустимі межі.

Для знаходження нормального рішення системи (2), стійкого до збурювань цих рівнянь, застосуємо метод рішення погано обумовлених систем алгебраїчних рівнянь [3]. Відповідно до цього методу систему (2) представимо у вигляді

$$\overline{AZ} = \tilde{u}, \quad (3)$$

де \bar{Z} – шуканий вектор; \tilde{u} – приблизно заданий вектор;

A – квадратна матриця з елементами a_{ij} .

У розгорнутому вигляді (3) набуває виду

$$\begin{aligned} (\bar{a}_{11} + \alpha)A^\alpha + \bar{a}_{12}B^\alpha &= b_1, \\ \bar{a}_{21}A^\alpha + (\bar{a}_{22} + \alpha)B^\alpha &= b_2, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{де } \bar{a}_{kj} = \sum_{i=1}^m a_{ik}a_{ij}, \quad b_k = \sum_{i=1}^m a_{ik}\tilde{u}_i, \quad (m=2).$$

Коефіцієнти в (4) мають наступні значення:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{11} &= a_{11}a_{11} + a_{21}a_{21}; \quad \bar{a}_{21} = a_{12}a_{11} + a_{22}a_{21}; \\ \bar{a}_{12} &= a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22}; \quad \bar{a}_{22} = a_{12}a_{12} + a_{22}a_{22}; \\ b_1 &= a_{11}\tilde{u}_1 + a_{21}\tilde{u}_2; \quad b_2 = a_{12}\tilde{u}_1 + a_{22}\tilde{u}_2. \end{aligned}$$

Представимо (4) у розгорнутому вигляді:

$$\begin{aligned} &[(X_\beta - X_\alpha)(X_\beta - X_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(X_\gamma - X_\alpha) + \tau^{(k)}]A^{\tau^{(k)}} + \\ &+ [(X_\beta - X_\alpha)(Y_\beta - Y_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(Y_\gamma - Y_\alpha)]B^{\tau^{(k)}} = \\ &= -[(X_\beta - X_\alpha)(Z_\beta - Z_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(Z_\gamma - Z_\alpha)]C; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &[(X_\beta - X_\alpha)(Y_\beta - Y_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(Y_\gamma - Y_\alpha)]A^{\tau^{(k)}} + \\ &+ [(Y_\beta - Y_\alpha)(Y_\beta - Y_\alpha) + (Y_\gamma - Y_\alpha)(Y_\gamma - Y_\alpha) + \tau^{(k)}]B^{\tau^{(k)}} = \\ &= -[(Y_\beta - Y_\alpha)(Z_\beta - Z_\alpha) + (Y_\gamma - Y_\alpha)(Z_\gamma - Z_\alpha)]C. \quad (5) \end{aligned}$$

Тут $\tau = \tau_0 q^k$ ($q < 1$) – крок по параметру регуляризації; τ_0 – початкове значення параметра регуляризації; $\tilde{u}_1 = -C(Z_\alpha - Z_\beta)$; $\tilde{u}_2 = -C(Z_\alpha - Z_\gamma)$; $k, i, j = \overline{1, 2}$; τ_0 та q вибираються в процесі обчислювального експерименту.

З першого рівняння системи (5):

$$\begin{aligned} B^{\tau^{(k)}} &= \{ [(X_\beta - X_\alpha)(Z_\beta - Z_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(Z_\gamma - Z_\alpha)]C - \\ &- [(X_\beta - X_\alpha)(X_\beta - X_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(X_\gamma - X_\alpha) + \tau^{(k)}]A^{\tau^{(k)}} \} / \\ &/ [(X_\beta - X_\alpha)(Y_\beta - Y_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(Y_\gamma - Y_\alpha)] \end{aligned}$$

Уведемо позначення:

$$L = (X_\beta - X_\alpha)(X_\beta - X_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(X_\gamma - X_\alpha);$$

$$\begin{aligned} M &= (X_\beta - X_\alpha)(Y_\beta - Y_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(Y_\gamma - Y_\alpha); \\ F &= (Y_\beta - Y_\alpha)(Y_\beta - Y_\alpha) + (Y_\gamma - Y_\alpha)(Y_\gamma - Y_\alpha); \\ \theta &= (Y_\beta - Y_\alpha)(Z_\beta - Z_\alpha) + (Y_\gamma - Y_\alpha)(Z_\gamma - Z_\alpha); \\ D_1 &= (X_\beta - X_\alpha)(Z_\beta - Z_\alpha) + (X_\gamma - X_\alpha)(Z_\gamma - Z_\alpha). \end{aligned}$$

З урахуванням уведених позначень

$$B^{\tau^{(k)}} = \frac{-D_1 C - (L + \tau^{(k)})A^{\tau^{(k)}}}{M}. \quad (6)$$

Вираз для $A^{\tau^{(k)}}$ підставимо у друге рівняння системи (5):

$$MA^{\tau^{(k)}} - \frac{(F + \tau^{(k)})D_1 C}{M} - \frac{(F + \tau^{(k)})(L + \tau^{(k)})}{M}A^{\tau^{(k)}} = -\theta C;$$

$$\left[M - \frac{(F + \tau^{(k)})(L + \tau^{(k)})}{M} \right] A^{\tau^{(k)}} = \left[\frac{(F + \tau^{(k)})D_1}{M} - \theta \right] C.$$

Звідси

$$A^{\tau^{(k)}} = \frac{\left[(F + \tau^{(k)})D_1 - \theta M \right] C}{M^2 - (F + \tau^{(k)})(L + \tau^{(k)})}. \quad (7)$$

Підставивши значення $A^{\tau^{(k)}}$ в (6), одержимо $B^{\tau^{(k)}}$ – проекцію нормального вектора на вісь Y системи координат $OXYZ$.

Обчислення коефіцієнтів A_n та B_n із системи (2) для n -ї площини із $N = C_Q^3$ площин, кожна з яких проходить через три точки поверхні рухомого елемента несучої опори з координатами $(X_\alpha, Y_\alpha, Z_\alpha)$, $(X_\beta, Y_\beta, Z_\beta)$, $(X_\gamma, Y_\gamma, Z_\gamma)$, де $1 \leq \alpha \leq Q$; $1 \leq \beta \leq Q$; $1 \leq \gamma \leq Q$, виконується в наступній послідовності.

1. Призначається значення вільного невідомого C для всіх $N = C_Q^3$ систем рівнянь (2).

2. Вибирається початкове значення τ_0 параметра регуляризації та кроку q по параметру регуляризації.

3. Для кожного значення $\tau_0, \tau_0 q, \tau_0 q^2, \tau_0 q^3, \dots$ із сітки значень параметра регу-

ляризації обчислюють (6) і (7) для n -ї системи рівнянь. Одержують $(k + 1)$ пар рішень $A_n^{\tau(k)}$ та $B_n^{\tau(k)}$. Як нормальне рішення системи (2) приймають вектор, для якого виконується

$$\text{умова } \|Z^\delta\|_{\beta\tau} = \sqrt{(A_n^{\tau(k)})^2 + (B_n^{\tau(k)})^2} = \max.$$

4. За результатами рішення $N = C_Q^3$ систем рівнянь виду (2) розраховуються коефіцієнти \bar{A} і \bar{B} площини, що згладжує поверхню рухомого елемента, як середні значення коефіцієнтів $A_n^{\tau(k)}$ та $B_n^{\tau(k)}$ по $N = C_Q^3$ системах рівнянь при середньому по довжині переміщення положенні рухомого елемента:

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A_n^{\tau(k)}; \quad \bar{B} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N B_n^{\tau(k)}.$$

Цю площину приймають за базову, що згладжує поверхню рухомого елемента. Рівняння базової площини має вигляд:

$$\bar{A}_B X + \bar{B}_B Y + CZ + D_B = 0, \quad (8)$$

$$\text{де } D_B = CZ_B; \quad Z_B = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q Z(q).$$

Згладжувальна площина устанавлюється паралельно площині установки основ датчиків поля датчиків. Для цього, зміщуючи рухомий елемент, добиваються близькості до нуля коефіцієнтів \bar{A}_B та \bar{B}_B рівняння (8).

З (8) випливає, що базова згладжувальна площина проходить через точку, що лежить на осі Z системи координат $OXYZ$ на висоті, рівній середній висоті зазору \bar{Z}_B під Q датчиками поля датчиків. Оскільки $N = C_Q^3$ може приймати значення від декількох тисяч до декількох десятків тисяч, положення базової згладжувальної площини не залежить від неплщинності окремих ділянок поверхні рухомого елемента й визначається середньою висотою \bar{Z}_B зазорів під датчиками поля датчиків.

Стабілізація положення рухомого елемента щодо базової згладжувальної площини

здійснюється шляхом суміщення на дискреті стабілізації поточної площини, що згладжує поверхню рухомого елемента, з базовою згладжувальною площиною і формування на $J = L/l_\delta$ дискретах стабілізації, де l_δ – величина дискрети стабілізації, масиву зазорів стабілізації під датчиками $C_{52}^{cm}, C_{53}^{cm}, C_{54}^{cm}, C_{55}^{cm}$, у даному випадку відповідних незбуреному положенню рухомого елемента щодо базової площини.

Для цього рухомий елемент несучої опори встановлюється у вихідне для переміщення положення ($L = 0$). Вимірюються величини зазорів під датчиками поля датчиків $Z_1(0), Z_2(0), \dots, Z_Q(0)$ і за їх результатами будується згладжувальна площина

$$\bar{A}_{z_{2л.}}(0) + \bar{B}_{z_{2л.}}(0)Y + CZ + D_{z_{2л.}} = 0, \quad (9)$$

$$\text{де } D_{z_{2л.}} = -C\bar{Z}; \quad \bar{Z} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q Z(q).$$

Виконується перевірка збігу згладжувальної площини (9) з базовою згладжувальною площиною (8). Умовою збігу цих площин є рівність коефіцієнтів рівнянь

$$\bar{A}_{z_{2л.}}(0) = \bar{A}_B; \quad \bar{B}_{z_{2л.}}(0) = \bar{B}_B; \quad D_{z_{2л.}} = D_B. \quad (10)$$

Виконання умови (10) свідчить про те, що у вихідному для переміщення положенні точки рухомого елемента, через які проходить згладжувальна базова площина, лежать у цій площині. Рухомий елемент перебуває в незбуреному положенні щодо базової згладжувальної площини. Вимірюються й запам'ятовуються величини зазорів стабілізації $Z_{52}^{cm}(0), Z_{53}^{cm}(0), Z_{54}^{cm}(0), Z_{55}^{cm}(0)$ під датчиками $C_{52}^{cm}, C_{53}^{cm}, C_{54}^{cm}, C_{55}^{cm}$, що відповідають незбуреному положенню рухомого елемента.

Якщо умова (10) не виконується, обчислюються відстані $d_{52}, d_{53}, d_{54}, d_{55}$ від центрів основ датчиків $C_{52}^{cm}, C_{53}^{cm}, C_{54}^{cm}, C_{55}^{cm}$ до базової згладжувальної площини за формулою

$$d_k^B = \frac{|\overline{A}_B X + \overline{B}_B Y + CZ + D_B|}{\sqrt{\overline{A}_B^2 + \overline{B}_B^2 + C^2}},$$

де $X, Y, Z = 0$ – координати центрів основ датчиків $C_{52}^{cm}, C_{53}^{cm}, C_{54}^{cm}, C_{55}^{cm}$ та відстані $d_{52}^{32l}(0), d_{53}^{32l}(0), d_{54}^{32l}(0), d_{55}^{32l}(0)$ від центрів відстаней цих датчиків до згладжувальної площини

$$d_k^{32l}(0) = \frac{|\overline{A}_{32l} X + \overline{B}_{32l} Y + CZ + D_{32l}|}{\sqrt{\overline{A}_{32l}^2 + \overline{B}_{32l}^2 + C^2}}.$$

На підставі порівняння відповідних відстаней до базової й згладжувальної площини встановлюються сигнали керування на регулятори положення рухомого елемента несучої опори й методом послідовних наближень сполучають згладжувальну площину з базовою. Вимірюються й запам'ятовуються величини зазорів стабілізації.

З вихідного положення рухомий елемент послідовно встановлюється 1, 2, ..., j, ..., J дискреті стабілізації. На кожній j-й дискреті стабілізації будується згладжувальна площина. Виконується суміщення цієї площини з базовою площиною. Вимірюються й запам'ятовуються величини зазорів стабілізації. У результаті переміщення рухомого елемента на відстань L з кроком l_0 буде сформовано масив величин зазорів стабілізації

$$\begin{aligned} & [Z_{52}^{cm}(0), Z_{53}^{cm}(0), Z_{54}^{cm}(0), Z_{55}^{cm}(0)] \\ & [Z_{52}^{cm}(1), Z_{53}^{cm}(1), Z_{54}^{cm}(1), Z_{55}^{cm}(1)] \dots, \\ & [Z_{52}^{cm}(j), Z_{53}^{cm}(j), Z_{54}^{cm}(j), Z_{55}^{cm}(j)] \dots, \\ & [Z_{52}^{cm}(J), Z_{53}^{cm}(J), Z_{54}^{cm}(J), Z_{55}^{cm}(J)]. \end{aligned}$$

У процесі роботи напрямної на кожній j-й дискреті стабілізації порівнюються поточні величини зазорів $[Z_{52}^{cm}(t), Z_{53}^{cm}(t), Z_{54}^{cm}(t), Z_{55}^{cm}(t)]$ під датчиками $C_{52}^{cm}, C_{53}^{cm}, C_{54}^{cm}, C_{55}^{cm}$ з відповідними величинами зазорів стабілізації. При відхиленні поточних величин зазорів від величин зазорів стабілізації на регулятори положення рухомого елемента несучої опори виробляються й подаються сигнали керування, що запобігають

зміщенню рухомого елемента щодо базової площини. Висока точність стабілізації досягається корекцією неплоскостності поверхні рухомого елемента й корекцією положення датчиків поля датчиків по висоті зазору.

Оцінка точності вимірів величин зазорів під датчиками поля датчиків. Точність вимірювання величин зазорів істотно впливає на точність стабілізації положення рухомого елемента й залежить від величини вимірюваного зазора. Так, зазор $Z=10$ мкм може вимірюватися з похибкою 0,01 мкм, зазор $Z=100$ мкм – із похибкою 0,1 мкм, а зазор $Z=500$ мкм уже вимірюється з похибкою 1 мкм. Таким чином, для підвищення точності вимірювання необхідно зменшувати робочий зазор несучої опори, що вимагає підвищення точності виготовлення опори.

Це протиріччя може бути вирішено шляхом оцінювання величин зазорів під датчиками поля датчиків. За величину зазора під q-м датчиком поля датчиків може прийматися асимптотично незміщена оцінка цього зазора

$$\hat{Z}_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_q(i),$$

де $Z_q(1), Z_q(2), \dots, Z_q(n)$ – незалежні рівноточні вимірювання величини зазора під q-м датчиком поля датчиків.

Ця оцінка має дисперсію σ^2/n , де σ – середньоквадратична похибка вимірника величини зазора.

Для одержання оптимальної незміщеної оцінки величини зазора, що є зваженою лінійною комбінацією елементів вибірки, оцінювання виконується фільтром Вінера-Колмогорова. Рівняння Вінера-Колмогорова має вигляд:

$$\int_0^t W_{omn}(t, \lambda) K_Z(\xi, \lambda) d\lambda = K_{Zu}(\xi, t), \quad (11)$$

де $K_Z(\xi, \lambda)$ – кореляційна функція повного вхідного сигналу, тобто суми корисного сигнала

лу $u(t)$ і шуму $v(t)$; $K_{Zu}(\xi, t)$ – кореляційна функція повного вхідного й корисного сигналів; $W_{omn}(t, \lambda)$ – імпульсна вагова функція фільтра.

Інтегральне рівняння (11) є рівнянням Фредгольма (Fredholm) першого роду, воно не має рішення в явному вигляді й відноситься до класу некоректно поставлених завдань. У цьому випадку замість (11) необхідно розглядати рівняння

$$A_h k = \int_0^t K_Z^h(t - \tau) k(\tau) d\tau = K_{Zu}^\delta(t). \quad (12)$$

Тут під A_h мається на увазі апроксимуючий оператор, визначений на гільбертовому просторі V з областю значень у просторі F і задовольняючий умові $\Omega_F(A_h k; Ak) \rightarrow 0$, коли $h \rightarrow 0$; K_{Zu}^δ – δ -наближення до функції K_{Zu} ; K_Z^h – h -наближення до функції K_Z . Причому збіжність розглядається як норма в просторі F .

Завдання наближеного рішення (12) полягає у тому, щоб заданій сукупності наближених вихідних даних K_{Zu}^δ та A_h зіставити функцію $k_{\delta h} \in V$ таку, щоб $\Omega_V(k_{\delta h}, k) \rightarrow 0$, коли $\delta, h \rightarrow 0$. Засобом вирішення такого завдання є метод регуляризації академіка А.М. Тихонова. Відповідно до цього методу (12) для дискретних вимірів набуває вигляду:

$$\begin{aligned} & \sum_{l=0}^N \sum_{i=0}^N K_Z^h(m-l) K_Z^h(l-i) \hat{k}_{\delta h}^\alpha(m) + \alpha \hat{k}_{\delta h}^\alpha(m) = \\ & = \sum K_Z^h(m-l) K_{Zu}^\delta(l), \quad 0 \leq m \leq N, \end{aligned} \quad (13)$$

де $\hat{k}_{\delta h}^\alpha$ – імпульсна вагова функція по параметру регуляризації α , коли помилки завдання кореляційних функцій K_{Zu}^δ та K_Z^h не перевищують δ та h відповідно. Кореляційні функції K_{Zu}^δ та K_Z^h розраховуються за формулами:

$$\begin{aligned} K_Z^h(k) &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z(j+k) Z(j); \\ K_{Zu}^\delta(k) &= Z(j+k) u(j), \quad k = 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

Обчислення вагових функцій фільтра проводиться в наступній послідовності.

1. Обчислюється початкове значення параметра регуляризації

$$\alpha_0 = \alpha(\delta, h) = \sqrt{\delta^2 + h^2}.$$

2. Для α_0 записується (13) у вигляді системи $(N+1)$ лінійних рівнянь і визначаються

$(N+1)$ вагових функцій фільтра: $\hat{k}_{\delta h}^\alpha(0)$, $\hat{k}_{\delta h}^\alpha(1)$, $\hat{k}_{\delta h}^\alpha(2)$, ..., $\hat{k}_{\delta h}^\alpha(N)$.

3. Обчислюється $\alpha_1 = \alpha_0 \tau$, де τ – крок по параметру регуляризації, і виконується п. 2.

4. Обчислюється друге значення параметра регуляризації $\alpha_2 = \alpha_0 \tau^2$ й виконується п. 2.

5. Триває процес обчислення доти, поки різниця по нормі між двома суміжними рішеннями (13) по параметру регуляризації не досягне мінімуму

$$\|k_{\delta h}^{\alpha(n)} - k_{\delta h}^{\alpha(n-1)}\| = \min.$$

Тоді оцінку $(N+1)$ -го виміру величини зазора на інтервалі N спостережень під q -м датчиком одержують у вигляді

$$\hat{Z}_\phi(N) = Z(0) \hat{k}_{\delta h}^\alpha(0) + Z(1) \hat{k}_{\delta h}^\alpha(1) + \dots + Z(N) \hat{k}_{\delta h}^\alpha(N).$$

При цьому дисперсія похибки вимірника величини зазора зменшується в \sqrt{N} разів, тобто, $D_{\hat{Z}_\phi} = \frac{D_{\text{вим.}}}{\sqrt{N}}$.

Початкове значення параметра регуляризації α_0 та крок τ по параметру регуляризації можуть визначатися в процесі обчислювального експерименту.

Оцінювання вимірів величин зазорів може виконуватися як на етапі формування масиву опорних зазорів, так і на етапі стабілізації положення рухомого елемента. Для оцінки в процесі стабілізації поточних величин зазорів

під датчиками зазорів стабілізації імпульсні вагові функції фільтра розраховуються заздалегідь. Це дозволяє виконувати оцінювання величин зазорів майже в реальному вимірі часу.

Продовження статті – у наступних номерах журналу.



Нові матеріали та речовини

КЕРАМІЧНА БРОНЕПАНЕЛЬ

Призначення. Запропоновані кулестійкі бронепанелі, призначені для колективного захисту мозаїчної конструкції.

Сфери застосування: винахід відноситься до засобів бронезахисту й може бути використаний для бронювання автомобілів, додаткового бронювання техніки та укриттів, захисту людини від ураження кулями або уламками.

Опис. Бронепанелі виготовлені із композиційного матеріалу на основі карбиду кремнію і склопластику. Матеріал, що має протирикошетне покриття, ефективно захищає від куль із підвищеною пробивною спроможністю. Матеріал також може використовуватися при бронюванні автомобілів для банківських перевезень.

Переваги: матеріал був випробуваний у складі броні для наземної та плаваючої техніки під ударами куль і показав подвійну вагову перевагу перед традиційною сталевною бронею.

Технічні характеристики:

- керамічний бронепанель – III, IV клас захисту за NIJ 0101.04;
- матеріал – композиція кераміки і параарамідного органопласта;
- вага блока III класу площею 7,5 дм³ – 2,600,05 кг;

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Деклараційний патент на винахід 34059 А Україна, МПК F16C 32/06 (2006.01). Суперпрецизійна лінійна напрямна / В.М. Зіненко. – Заявл. 24.05.1999, № 99052840; опубл. 15.02.2001, бюл. № 1/2001.
2. Решетов Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.
3. Тихонов А.М. Методы решения некорректных задач / А.М. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М. : Наука, 1979. – 224 с.

ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ

- вага блока IV класу площею 7,5 дм³ – 3,350,05 кг;
- поверхнева густина для III класу – 34,60,5 кг/дм²;
- поверхнева густина для блока IV класу – 44,60,5 кг/дм².

Блоки виготовляються будь-якої конфігурації із заданим радіусом.

Новизна – один патент України.

Стадія готовності: готові до впровадження.

Пропозиції щодо співробітництва: продаж патентів і ліцензій.

Нанотехнології

ВУГЛЕЦЕВІ НАНОТРУБКИ ТА НАНОВОЛОКНА ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК

Призначення. Винахід належить до галузі виготовлення нановолокнистих матеріалів і може бути використаний при розробці армованих композитних матеріалів, особливо з керамічною матрицею, та для виготовлення фільтрів надтонкої очистки рідин, включаючи агресивні.

Сфери застосування: електроніка, приладобудування, машинобудування.

Опис. Вуглецеві нанотрубки (С) та нановолокна тугоплавких сполук синтезували як методом хімічного газофазного осадження (SiC, TiC, Si₃N₄, TiB₂), так і прямим синтезом у проточному трубчатому реакторі. Винахід