



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 112223

(13) C2

(51) МПК

G01N 3/18 (2006.01)

G01N 3/54 (2006.01)

G01N 25/02 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

(21) Номер заявки: а 2014 10906  
(22) Дата подання заявки: 06.10.2014  
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.08.2016  
(41) Публікація відомостей про заявку: 27.04.2015, Бюл.№ 8  
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.08.2016, Бюл.№ 15

(72) Винахідник(и):  
Шмуклер Валерій Самуїлович (UA),  
Євзеров Ісаак Данилович (UA),  
Резнік Петро Аркадійович (UA),  
Фурсов Юрій Васильович (UA)  
(73) Власник(и):  
Шмуклер Валерій Самуїлович,  
вул. Чернишевського, 86, кв. 41, м. Харків,  
61002 (UA)  
(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:  
UA 87550 U, 10.02.2014  
RU 2096769 C1, 20.11.1997  
RU 2149352 C1, 20.05.2000  
RU 2031393 C1; 20.03.1995  
RU 2473732 C1, 27.01.2013  
RU 2427795 C1, 27.08.2011  
SU 320763 A, 03.02.1972  
US 2009/0092352 A1, 09.04.2009  
FR 2865539 A1, 29.07.2005  
Эффективный алгоритм решения температурной задачи теории конструкций / В. С. Шмуклер, П. А. Резник // Будівельні конструкції. - 2013. - Вип. 78(1). - С. 550-557.  
Расчет распределения температурных полей по толщине аэродромных плит с учетом влияния температурно-климатических воздействий / А.Ю. Конопляник, Е.Д. Семенов // Вісник ПДАБА. - 2013. - №9. - С. 28-34.  
Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим температурным воздействиям СП52-00-2011.Актуализированная редакция СНиП 2.03.04.-84. - 1-ая ред. - М.: Издание официальное.- 2010. - 35с.

**(54) СПОСІБ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ДІЇ ДОВІЛЬНО ЗАДАНИХ ТЕМПЕРАТУР**

**(57) Реферат:**

Винахід належить до будівництва та випробувань будинків та споруд, а саме до методів досліджування міцнісних властивостей конструкцій при дії довільно заданих температур. Розроблений метод, при наявності відповідно означених видів забезпечення, являє собою ефективну технологію проведення досліджень конструкцій, підданих впливу віртуальних температурних полів. Його відмінними особливостями є простота експериментальної частини, низька вартість експерименту, фізична прозорість і логічна обґрунтованість одержуваних

UA 112223 C2

результатів. Перераховане, в першу чергу, зумовлене виконанням необхідних процедур на ненагрітому тілі, завантаженим найпростішим чином - одиничною силою. Шляхом розширення технічної бази, можливості методу можуть бути істотно розширені (маються на увазі пристосування, що створюють одночасний вплив від сил, прикладених в різних напрямках, наприклад, експериментальне моделювання центру стиснення). Важливим моментом тут є також можливість випробування конструкцій різних типів: масивів, оболонок, пластин, стрижнів, їх комбінацій і т.д.

Також практично відсутнє обмеження на якісні та кількісні параметри температурного поля.

Винахід належить до будівництва та випробувань будівель і споруд, а саме до методів дослідження міцнісних і деформаційних властивостей конструкцій при дії довільно заданих температур.

Відомий метод випробування на вогнестійкість за ознакою втрати несучої здатності (відповідно до ДСТУ Б. В. 1.1-4-98 \* [1]), який пропонує проведення експериментів в спеціально обладнаних лабораторіях. При цьому, зразок поміщається в піч, а потім задається температурний режим і прикладаються статичні навантаження.

Недоліками даного методу є висока вартість проведення випробування, неможливість визначення роботи конструкції у складі будівлі або споруди та складність зняття замірів переміщень в значній кількості точок.

Відомий чисельний метод визначення напружено-деформованого стану при спільній дії температури і навантаження за допомогою спеціалізованих програмних комплексів, наприклад, ПК "Ansys" [2], оснований на методі скінченних елементів (МСЕ).

Недоліком даного методу є велика складність верифікації отриманих результатів з урахуванням особливостей, яка викликана, з одного боку, обчислювальними можливостями програмного забезпечення, а з іншого, стохастичністю і багатофакторністю викладаються процесів.

В основі методу, що заявляється, є ідея, що базується на еквівалентній заміні нагріваного або охолоджуваного тіла ненагрітим [3]. Основою подібної заміни є ідеологія, фундована енергетичним принципом взаємності робіт Бетті-Максвелла. В [3] позначений захід побудови такого методу. Однак, впровадження його в практику стало неможливим в силу цілого ряду причин. До них належать:

- складність фіксації переміщень у внутрішніх точках області, яка зайнята випробуванням тілом;
- складність зняття замірів переміщень в значній кількості точок на поверхні тіла;
- необхідність виконання великої кількості обчислювальних операцій, пов'язаних з обробкою експериментально отриманої інформації та її поданням у вигляді, зумовленому спеціальним алгоритмом.

Як теоретична основа методу використовується формула, отримана в [3]. Формула дозволяє визначити переміщення в будь-якій точці досліджуваного нагріваного (охолоджуваного) тіла. Для чого, замість тіла (конструкції), яка зазнає задані температури, вводиться в розгляд той же, але ненагрітий конструктив, завантажений одиничною силою, прикладеною в довільній точці С і за напрямком шуканого температурного переміщення. Формула в декартових координатах має вигляд:

$$Q_c = \int \int \int_{V_B} \frac{\alpha E}{1-2\nu} T \cdot \theta^* dV_B, \quad (1)$$

де  $Q_c$  - переміщення конструкції в точці С;

$\alpha = \alpha(x, y, z, t)$  - коефіцієнт температурного розширення;

$T = T(x, y, z, t)$  - задане температурне поле;

$E = E(x, y, z, t)$  - модуль деформації 1-го роду матеріалу конструкції;

$\nu = \nu(x, y, z, t)$  - коефіцієнт поперечних деформацій матеріалу конструкції;

$\theta^*$  - одинична об'ємна деформація від дії одиничної сили, яка прикладена в точці С;

$V_B$  - об'єм, який займає конструкція.

Дана формула є приводом для побудови пропонованого методу.

Вводиться позначення:

$$f(x, y, z, t) = \frac{\alpha(x, y, z, t) \cdot T(x, y, z, t)}{1 - \nu(x, y, z, t)} \quad (2).$$

Тоді формула (1) приймає вигляд:

$$Q_c = \int \int \int_{V_B} f(x, y, z, t) \operatorname{div} R dV_B, \quad (3)$$

де  $\{R\}^T = \{u, v, w\}$ ;

$U = U(x, y, z, t)$ ;  $V = V(x, y, z, t)$ ;  $W = W(x, y, z, t)$ ;

$\text{div } R = I_1$ ;

$I_1$ -й інваріант тензора деформації;

$U, V, W$  - проекції векторів переміщень вздовж осей  $X, Y, Z$  відповідно

$f; U, V, W \in C^1$ .

- 5 У разі заданого стаціонарного температурного поля  $T = \text{const}$ . Якщо, при тому, тіло є ізотропним та однорідним, то  $E = \text{const}$ ,  $\nu = \text{const}$ ,  $\alpha = \text{const}$ , і, як наслідок,  $f = \text{const}$ , тоді формула (3) набуває вигляду:

$$Q_C = f \cdot \int \int \int_{V_B} \text{div} R dV_B, \quad (4).$$

- 10 Далі використовується формула Остроградського-Гауса:

$$Q_C = f \cdot \int \int \int_{V_B} \text{div} R dV_B = \int \int_S (U \ell + V m + W n) dS, \quad (5)$$

де  $S$  - площа поверхні розглянутого тіла;

- 15  $\ell, m, n$  - напрямні косинуси зовнішньої нормалі, а інтеграл у правій частині є поверхневим інтегралом 1-го роду.

Формула (5) дозволяє тільки по переміщеннях, які виникають на поверхні розглянутого ненагрітого тіла, завантаженого одиничною силою, визначити переміщення заданої точки, в заданому напрямку і в заданий момент часу, нагрітого (охолодженого) тіла.

- 20 Для загального випадку, коли задано нестаціонарне поле, формула (3) після виконання інтегрування частинами прийме вигляд:

$$Q_C = \int \int \int_{V_B} f(x, y, z, t) \text{div} R dV_B = \int \int_S (U \ell + V m + W n) dS + \int \int \int_{(V)} \left[ U \frac{\partial f}{\partial x} + V \frac{\partial f}{\partial y} + W \frac{\partial f}{\partial z} \right] dV_B; \quad (6)$$

- 25 Присутність другого доданка (інтеграл за об'ємом) в правій частині (6), ускладнює завдання в порівнянні з процедурою, що задається (5). Тобто, в разі постійних температур і однорідності матеріалу досить виміряти переміщення точок тіла, розташованих тільки на поверхні, а потім за (5) визначити температурне переміщення.

У загальному випадку (нестационарне температурне поле) для реалізації послідовності дій за (6) пропонується наступний алгоритм:

- 30 - дискретизація моделі тіла у скінченно-елементній формі (МСЕ);  
 - по заданих температурних і фізико-механічних параметрах визначення функції  $f(x, y, z, t)$ ;  
 - аналітичне (у разі апроксимації) або чисельне обчислення похідних від  $f$  за координатами  $x, y, z$ ;  
 - визначення по МСЕ, при необхідності з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей, переміщень у всіх вузлах сітки скінченних елементів (СЕ) від дії одиночної сили,  
 35 прикладеної в заданій точці;  
 - експериментальне вимірювання переміщень у вузлах сітки СЕ, розташованих тільки на поверхні тіла;  
 - обчислення різниці переміщень у вузлах сітки СЕ, розташованих на поверхні тіла, заміряних експериментально і обчислених теоретично;  
 40 - обчислення переміщень в усіх вузлах сітки СЕ від знайденої різниці переміщень, прикладених до поверхні тіла;  
 - обчислення сумарних переміщень у всіх вузлах сітки СЕ від дії одиночної сили і різниці поверхневих переміщень;  
 - визначення шуканого температурного переміщення по (6). Ухвалений експериментально-теоретичний підхід дозволяє коригувати отримане розрахунковим шляхом поле переміщень  
 45 таким чином, щоб на поверхні тіла (конструкції) переміщення були рівні експериментально заміряних.

Наведений алгоритм фундирує пропонований експериментально-теоретичний метод в загальному випадку.

- 50 В свою чергу, технічне забезпечення методу включає систему навантаження, систему вимірювання та обчислювальний комплекс (ПК).

Система навантаження складається з домкрата (фіг. 1-3), маслостанції (фіг. 1-4) і опорної рами (фіг. 1-2). Ця система проста в експлуатації, мобільна, не вимагає великих стартових і експлуатаційних витрат. Призначена для використання при випробуваннях як в лабораторних умовах (малі моделі), так і безпосередньо на готових конструкціях (натурні випробування, випробування великомасштабних моделей).

Система вимірювання - фотограмметрична або лазерна установка (фіг. 1-5), типу VIC-3D, що дозволяє експериментально вимірювати всі три проекції переміщення на поверхні зразка (тіла), при цьому практично, в будь-якій кількості точок [4].

VIC-3D має наступні переваги в порівнянні з іншими системами вимірювання:

- економія часу і коштів у порівнянні з використанням тензорезисторів;
- відсутність прямого контакту з об'єктом вимірювання (зразком), що дозволяє використовувати систему для вимірювання поля деформацій на реальному діючому об'єкті або на чутливих до механічного впливу зразках;
- використання простого білого світла для підсвічування об'єкта вимірювання і відсутність потенційно небезпечних лазерних випромінювань;
- наочність відображення отриманих результатів у вигляді повнокольорових 3D діаграм, накладених на зображення реального об'єкта, отримання повної картини деформацій по всій поверхні, крім того, (фоновий ефект), використання системи для експрес-аналізу конструкції в процесі навантаження і пошуку механічних концентраторів;
- наявність стандартних бібліотек для обчислень деформацій  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{xy}$  модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона;
- синхронізація з випробувальною машиною, а також використання інтегрованих функцій "віртуальний екстензометр" і "віртуальний тензорезистор" для отримання діаграми навантаження в істинних координатах;
- простий експорт діаграм в стандартні текстові файли забезпечує формування повноцінного звіту по проведених випробуваннях;
- висока роздільна здатність вимірювальної системи, що дозволяє вловити зміни деформації, пов'язані навіть з внутрішнім руйнуванням ламелей композиційного матеріалу.

Програмне забезпечення включає фірмову систему обробки знятих поверхневих переміщень, будь-який програмний комплекс, який реалізує метод скінчених елементів і набір власних ексклюзивних утиліт, що забезпечують спільне функціонування систем навантаження, вимірювання і обчислення. Структурна схема показана на фіг. 1.

Розроблений метод, при наявності відповідних означених видів забезпечень, являє собою ефективну технологію проведення досліджень конструкцій, підданих впливу віртуальних температурних полів. Його відмінними особливостями є простота експериментальної частини, низька вартість власне експерименту, фізична прозорість і логічна обґрунтованість одержуваних результатів. Перераховане, в першу чергу, зумовлене виконанням необхідних процедур на ненагрітому тілі, завантаженому найпростішим чином - одиничною силою. Шляхом розширення технічної бази, можливості методу можуть бути істотно розширені (маються на увазі пристосування, що створюють одночасний вплив від сил, прикладених в різних напрямках, наприклад, експериментальне моделювання центру стиснення). Важливим моментом тут є також можливість випробування конструкцій різних типів: масивів, оболонок, пластин, стрижнів, їх комбінацій і т.д.

Також практично відсутнє обмеження на якісні та кількісні параметри температурного поля.

Джерела інформації: при проведенні експертизи.

1. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. ДСТУ Б. В. 1.1-4-98\*. - [Чинний від 98-28-10] - К.: Держбуд України, 1999. - 45 с - (Національний стандарт України).

2. [www.ansys.com/](http://www.ansys.com/) - універсальна програмна система СЕ аналізу Ansys

3. Майзель В.М. Температурная задача теории упругости // Майзель В.М. -Издательство Академии Наук Украинской ССР, Киев 1961г. - 153 с.

4. <http://www.correlatedsolutions.com/vic-3d/> - система аналізу деформованого стану Vic3D для великогабаритних виробів.

## ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб експериментально-теоретичного визначення переміщень конструкцій при дії довільно заданих температур, що полягає в еквівалентній заміні нагрітої конструкції ненагрітою, завантаженої статичним локальним одиничним навантаженням, прикладеним в заданій точці, який **відрізняється** тим, що використовують систему навантаження, що складається з

маслостанції і домкратів, системи вимірювання деформацій, персонального комп'ютера і програмної системи визначення переміщень, при цьому вимірювання деформацій проводять тільки в точках, розташованих на поверхні конструкції, а переміщення будь-якої точки конструкції від заданої температури визначають за формулою:

$$5 \quad Q_c = \int_{V_B} \int \int f(x, y, z, t) \operatorname{div} R dV_B = \int \int_S (U\ell + Vm + Wn) dS + \int \int_{(V)} \left[ U \frac{\partial f}{\partial x} + V \frac{\partial f}{\partial y} + W \frac{\partial f}{\partial z} \right] dV_B;$$

де  $Q_c$  - переміщення конструкції в точці C;

$$f(x, y, z, t) = \frac{\alpha E T}{1 - 2\nu};$$

$T = T(x, y, z, t)$  - задане температурне поле;

$\alpha = \alpha(x, y, z, t)$  - коефіцієнт температурного розширення;

10  $E = E(x, y, z, t)$  - модуль деформації 1-го роду;

$\nu = \nu(x, y, z, t)$  - коефіцієнт поперечних деформацій;

$x, y, z$  - координати декартової системи;

$t$  - час,

$$\{R\}^T = \{U, V, W\};$$

15  $\operatorname{div} R = I_1$ ;

$I_1$  - 1-й інваріант тензора деформацій;

$$U = U(x, y, z, t);$$

$$V = V(x, y, z, t);$$

$$W = W(x, y, z, t);$$

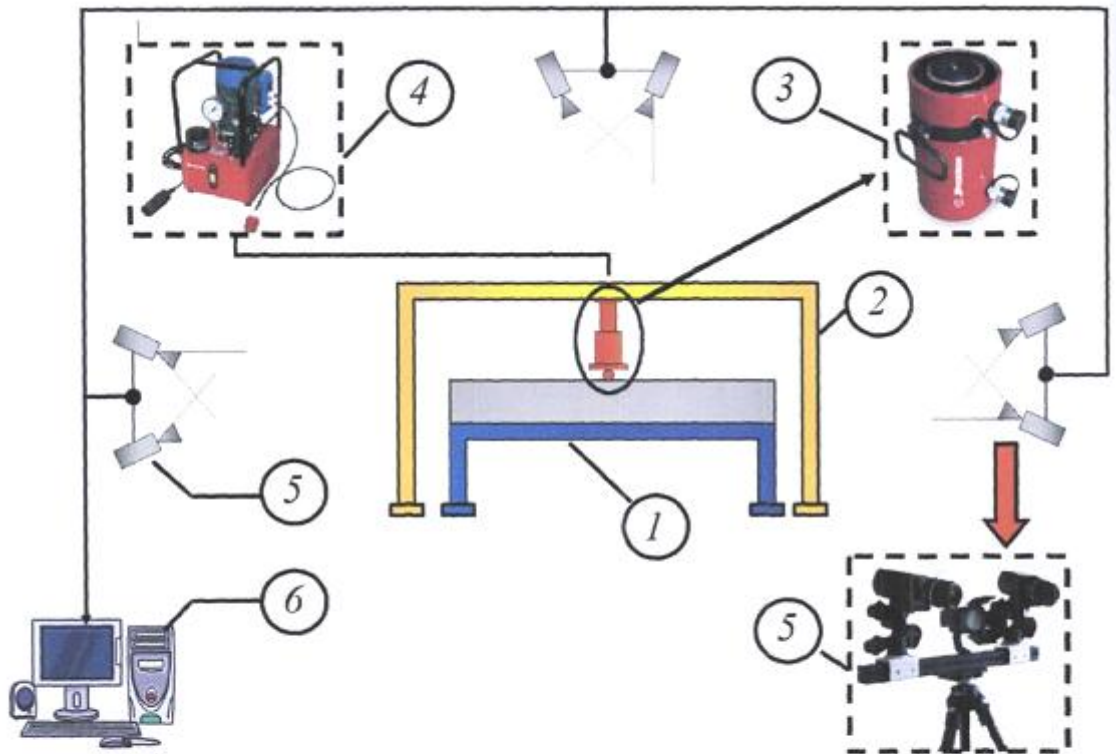
20  $U, V, W$  - проекції векторів переміщень вздовж осей X, Y, Z відповідно

$$F, U, V, W \in C^1;$$

$\ell, m, n$  - напрямні косинуси зовнішньої нормалі;

$S$  - площа бокової поверхні конструкції;

$V_B$  - об'єм, який займає конструкція.



- 1 - об'єкт дослідження; 2 - опорна рама;
- 3 - гідравлічний домкрат;
- 4 - маслостанція;
- 5 - фотограмметрична або лазерна установка, за типом VIC-3D;
- 6 - персональний комп'ютер, оснащений ПК МСЕ.

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601