

УДК 621.951.47

К 651+ К 222 284 440.622

<sup>1</sup>О.А. Жданов<sup>2</sup>П.О. Дибський, канд. техн. наук<sup>3</sup>О.В. Лосєв, канд. техн. наук

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ТЕРМОІМПУЛЬСНОГО ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

<sup>1</sup>Державне підприємство "Харківський машинобудівний завод ФЕД"<sup>2,3</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "ХАІ"

*Розглянуто вибрані за допомогою параметричного моделювання методом скінченних елементів основні теплофізичні параметри, що контролюють режим роботи установки для термоімпульсного очищення поверхонь металевих деталей, яка була розроблена на кафедрі технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету "ХАІ".*

### Вступ

В основі термоімпульсного методу очищення поверхні металевих деталей лежать взаємозв'язані теплофізичні, хімічні, механічні процеси. Для числового моделювання теплової дії газового середовища на поверхню металу необхідне коректне задання нестационарних граничних умов. Для їхнього вибору пропонується такий алгоритм:

1) обробляються результати експериментальних досліджень, проведені на лабораторних зразках простої конфігурації;

2) проводиться параметричне числове моделювання теплового потоку для області, що відповідає лабораторним зразкам, і граничних умов, визначених з експерименту;

3) на підставі порівняння числових і експериментальних результатів коректуються параметри числової моделі для забезпечення необхідної точності моделювання;

4) вибирається зразок складної конфігурації з імітацією ліквідів, що підлягають термоімпульсному видаленню;

5) проводиться параметричне числове моделювання, у результаті якого визначаються параметри, що забезпечують необхідний температурний вплив на зразок із ліквідом;

6) здійснюється експериментальна перевірка результатів, отриманих числовим моделюванням.

У разі потреби проводиться коректування числових моделей (пп. 2–5) і повторюється експериментальна перевірка (п. 6). Даний підхід реалізовано в рамках загальної блок-схеми взаємодії процедур формування технологічного процесу термоімпульсної обробки.

### Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження умов термоімпульсної обробки поверхонь деталей проводилися в спеціально розробленій випробувальній

установці (рис. 1), конструкція якої являє собою циліндричну камеру об'ємом 15 л зі випускним запобіжним клапаном і кришкою для завантаження зразків. У бічній стінці камери виконано гнізда для встановлення зразків-свідків, що тестуються і виготовлені у вигляді круглих пластин.

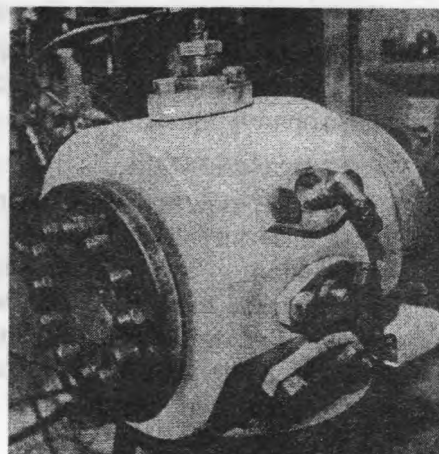


Рис. 1. Експериментальний стенд ЕУ-6

Технологічний цикл методу передбачає вплив на поверхню деталі високоенергетичного газового середовища, що досягає температури 4500°C і тиску 70 МПа і розвиваються в імпульсі тривалістю  $10^{-5} - 10^{-2}$  с.

Для дослідження як зразки використовували виготовлені зі сталі (3X13, 1X18H9E) пластини круглої форми товщиною 1,5 мм і діаметром 40 мм. У середині камери був встановлений датчик тиску. Температуру зовнішньої поверхні зразка вимірювали за допомогою термопари. Типові осцилограми для результатів швидкісної реєстрації тиску і температури записані на інтервалі від моменту запалення робочої суміші в камері до моменту відкриття випускного клапана (рис. 2).

Експериментальні дослідження показали, що тиск газової суміші після її запалення стрибкоподібно збільшується до 10 МПа, а потім змен-

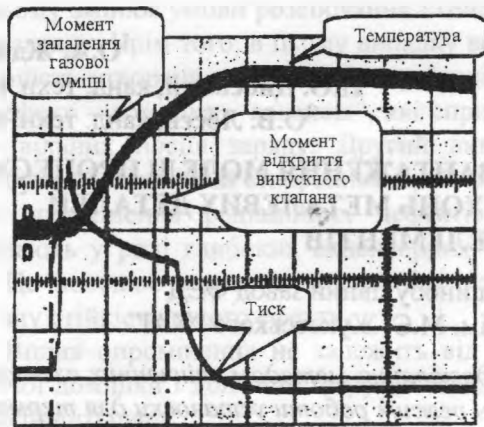


Рис. 2. Осцилограма зміни температури зразка і тиску газів( час: 1 см – 0,01 с; температура: 1 см – 12,7 °С; тиск: 1 см – 2,0 МПа)

шується експоненціально до моменту відкриття клапана, після чого відбувається експоненціальний спад тиску до величини тиску навколишнього середовища. Оскільки об'єм газової суміші до моменту відкриття клапана не змінюється, то можна припустити, що температура всередині камери змінюється пропорційно тискові, що відповідає поведінці ідеального газу при ізохорному процесі.

#### Математична модель задачі

Як лабораторний зразок простої конфігурації використовували пластину круглої форми. У випадку, коли граничні умови не залежать від координати на поверхні пластини, а теплообміном через торець пластини можна знехтувати, задача стає одновимірною і рівняння неусталеної теплопровідності, коли відсутні джерела тепла, має вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

де  $\rho$  – густина;  $c$  – питома теплоємність;  $T$  – температура;  $t$  – час;  $K_x$  – коефіцієнт теплопровідності.

Як початкова умова задавалася початкова температура по всьому тілу. При цьому розглядалися дві граничні умови:

1. Задано тепловий потік через поверхню:

$$K \frac{\partial T}{\partial n} = K_x \frac{\partial T}{\partial x} = q(t),$$

де  $n$  – одиничний вектор нормалі;  $q(t)$  – змінний у часі тепловий потік через поверхню.

2. Задано теплопередачу в середовище з температурою  $T_0$ :

$$K \frac{\partial T}{\partial n} + H[T(t) - T_0(t)] = 0,$$

де  $H$  – коефіцієнт поверхневої теплопередачі або тепловіддачі (коефіцієнт теплообміну [1]);  $T(t)$  – температура в даний момент часу в точці на

поверхні тіла;  $T_0(t)$  – температура у відповідній точці навколишнього середовища.

Для визначення теплового навантаження був застосований термохімічний розрахунок, методика якого докладно описана в праці [2]. Вихідними даними для цього розрахунку є такі параметри:

- об'єм камери  $V_k = 0,015 \text{ м}^3$ ;
- склад паливної суміші: 50% – пропан, 50% – бутан;
- окиснювач: кисень технічний, ступінь надлишку окиснювача  $\alpha = 1$ ;
- тиск і температура суміші перед запаленням:  $p = 0,6 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ,  $T = 25$ ;
- коефіцієнти виділення тепла  $\xi = 0,8$  і енергетичних утрат  $\eta = 0,83$ .

У результаті термохімічного розрахунку одержали максимальну температуру горіння  $T_{\max} = 4560 \text{ °С}$  і відповідний максимальний ступінь підвищення тиску  $\lambda = 18,2$ .

Для апроксимації імпульсу теплового навантаження була використана функція (рис. 3, табл. 1):

$$T(t) = C_i t^{n_i} b_i^{-p_i t^{m_i}}.$$

Функції, які апроксимують тепловий потік через поверхню, мають такий же вигляд, а відрізняються тільки числовими коефіцієнтами, тому графіки цих функцій не показані.

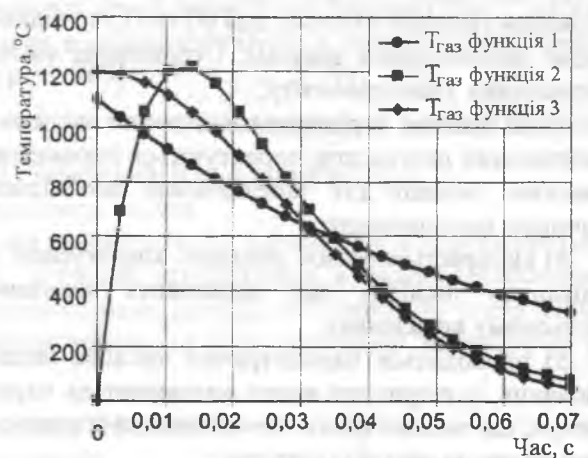


Рис. 3. Графіки функцій, що апроксимують температуру газової суміші

Таблиця 1

Параметр	Позначення функції		
	$T_{\text{газ}}$ функція 1	$T_{\text{газ}}$ функція 2	$T_{\text{газ}}$ функція 3
$i$	1	2	3
$C_i$	4560	$9,698 \cdot 10^5$	4560
$n_i$	0	1	0
$b_i$	100	50	3
$p_i$	5	20	600
$m_i$	1	1	2

### Розв'язання задачі теплопровідності для необмеженої пластини методом скінченних елементів

Для розв'язання задачі теплопровідності методом скінченних елементів (МСЕ) була використана програма ANSYS™ [3].

Моделювання МСЕ теплового потоку через необмежену пластину може бути здійснене як в одновимірній (1D) так і в двовимірній (2D) і тривимірній (3D) постановках. Використання 2D-постановки дозволило забезпечити загальність одержуваних результатів, необхідну для наступного аналізу прикладних задач.

Типове розбиття на скінченні елементи досліджуваної області показано на рис. 4.

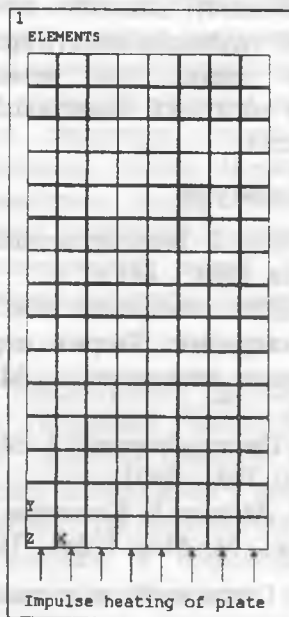


Рис. 4. Модель МСЕ

Для моделювання МСЕ круглої пластини були використані елементи типу PLANE55, що допускають розв'язання задачі у вісесиметричній постановці. Ступінь дискретизації області попередньо визначається на підставі оцінки похибки скінченно-елементної апроксимації [4]:

$$E = O(h^{p+1}),$$

де  $h$  – характерний розмір скінченного елемента;  $p$  – порядок елемента.

У нашому випадку використовувалися лінійні елементи, тому максимальна похибка апроксимації, що не перевищує 1% буде гарантована, якщо характерний розмір скінченних елементів не буде перевищувати 0,1 мм.

Теплофізичні коефіцієнти були задані значеннями, що відповідають властивостям матеріалу – сталі 1X18H9T (табл. 2).

Крім похибки, пов'язаної зі ступенем дискретизації області скінченними елементами, точ-

Таблиця 2

Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7900
Коефіцієнт теплопровідності $K$ , Дж/(м·с·°К)	14,5
Питома теплоємність $c$ , Дж/(кг·К)	0,50
	2
Коефіцієнт поверхневої теплопередачі $H$ , Дж/(м <sup>2</sup> ·с·°К)	1,8*

\* Визначається за результатами моделювання

ність моделювання нестационарних процесів залежить від вибраного кроку розбиття за часом. Було виконане моделювання для декількох значень розбиття інтервалу спостереження процесу теплового навантаження досліджуваного зразка:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^{t_{\text{вим}}} |T_{\text{МКЕ}_I}(t) - T_{\text{МКЕ}_{II}}(t)| dt}{\int_0^{t_{\text{вим}}} T_{\text{МКЕ}_{II}}(t) dt},$$

де  $T_{\text{МКЕ}_I}(t)$ ,  $T_{\text{МКЕ}_{II}}(t)$  – варіація температури для двох різних кроків розбиття за часом.

Відповідні величини відносної похибки показано на рис. 5.

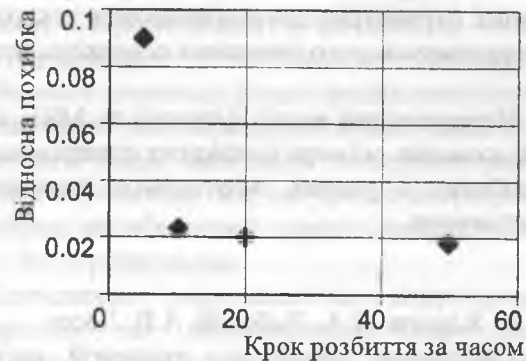


Рис. 5. Відносна інтегральна похибка залежно від ступеня дискретизації за часом

Отже, двоцентна похибка числового моделювання температурного поля може бути забезпечена при кроці за часом, що дорівнює 1/20 вибраного інтервалу спостереження.

Для оцінки близькості числового розв'язку й експериментального результату було використано відносну інтегральну похибку у вигляді:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^{t_{\text{вим}}} |T_{\text{ек}}(t) - T_{\text{МКЕ}}(t)| dt}{\int_0^{t_{\text{вим}}} T_{\text{ек}}(t) dt},$$

де  $T_{\text{ек}}(t)$ ,  $T_{\text{МКЕ}}(t)$  – варіація температури для вузлів елемента.

Порівняння результатів експериментального і числового моделювання (рис. 6) показало висо-

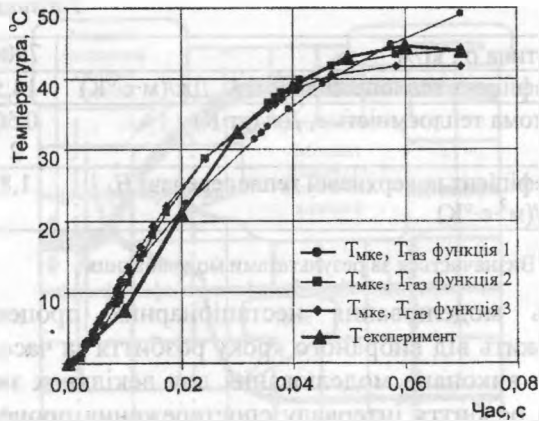


Рис. 6. Зміна температури внаслідок впливу теплового імпульсу

кий ступінь адекватності скінченно-елементної моделі, теплофізичні параметри і циклограми теплового навантаження для якої були оцінені за допомогою термохімічного і термодинамічного розрахунків і уточнені на підставі експериментальних вимірювань.

#### Висновки

1. Побудовану модель МСЕ зразка використано для експериментального дослідження теплофізичних параметрів, що контролюють технологію термоімпульсного очищення поверхонь деталей.

2. Порівняльний аналіз фізичної та МКЕ моделей дозволив оцінити коефіцієнт поверхневого теплообміну в умовах імпульсного теплового навантаження.

А.А. Жданов, П.А. Дыбский, А.В. Лосев

Исследование параметров тепловой нагрузки модели процесса термоимпульсной очистки поверхностей металлических деталей методом конечных элементов

Рассмотрены выбранные с помощью параметрического моделирования методом конечных элементов основные теплофизические параметры, контролирующие режим работы установки для термоимпульсной очистки поверхностей металлических деталей, которая была разработана на кафедре технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета «ХАИ».

A.A. Zhdanov, P.A. Dybskiy, A.V. Losev

Analysis of thermal loading parameters for finite-element model of thermo-impulse cleaning of metal parts' surfaces.

The main thermo-physical parameters controlling the process of thermo-impulse cleaning of metal parts' surfaces for installation that was designed at the department of "Technology of flying vehicle manufacturing" at the National Aerospace University "KhAI" have been studied by means of finite-element parametric modeling.

#### 3. Функції теплового навантаження вигляду

$$T(t) = Ctb^{-pt};$$

$$T(t) = Cb^{-pt^2}$$

разом із коефіцієнтом поверхневого теплообміну, що визначають граничні умови теплопередачі в середовище з постійною температурою, дозволяють забезпечити апроксимацію розв'язання розглядуваної задачі нестационарної теплопровідності з точністю (1) не нижче 3%. Перевага якої-небудь однієї з функцій може бути обумовлена додатковою апріорною інформацією про процес горіння в робочій камері технологічної установки.

4. Оцінку збіжності числового алгоритму розв'язання задачі теплопровідності проведено для лабораторного зразка, що може служити підставою для наступної верифікації розв'язків прикладних задач.

#### Список літератури

1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
2. Вырубов Д.Н., Иващенко И.А. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
3. ANSYS, Inc. Theory. Release 5.7. Edited by Peter Kohnke. – № 001369. – 2001.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

Стаття надійшла до редакції 28.03.03.