

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ІМ. С. П. ТИМОШЕНКА

На правах рукопису

ДУТКА Василь Ананійович

ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ГРАФІТОВИХ ПРЕС-ФОРМ В УМОВАХ
ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

05.02.07 - механіка деформованого твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 1996

АВ 35.996

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті надтвердих матеріалів НАН України

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук
Головчан Володимир Терентійович

Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних наук,
ст. наук. співробітник
Козлов Володимир Ілліч

- доктор технічних наук, професор
Майстренко Анатолій Львович

Провідна організація - Інститут проблем матеріалознавства
НАН України

Захист відбудеться "10" грудня 1996 р. о 14 годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.03.03
в Інституті механіки НАН України ім.С.П.Тимошенка за адресою:
252057, Київ-57, вул. П.Нестерова, 3.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту механіки
НАН України (252057, Київ-57, вул. П.Нестерова, 3)

Автореферат розіслано "04" листопада 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор *М.Черненко* І.С.Чернишенко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



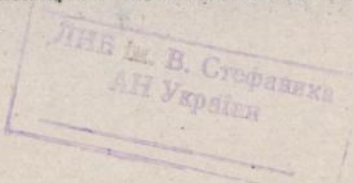
00753760 (S)

Актуальність теми. В даний час у високотемпературних установках гарячого пресування порошкових сумішей тугоплавких сполук із застосуванням індукційного нагріву використовуються конструкційні елементи із графітових матеріалів, зокрема графітові прес-форми. Це зумовлене характерним для графітів поєднанням здатності добре проводити електричний струм і тепло із високою термостійкістю і достатньою міцністю в широкому інтервалі температури. Однак як при конструюванні графітових елементів, так і при їх експлуатації є істотним врахування таких важливих властивостей графіту, як крихкість, низький опір розтягіві та значне розсіяння міцності.

В робочому стані одним із найбільш навантажених елементів установки гарячого пресування є графітова прес-форма, в якій діють великі напруження розтягу, що є однією із причин її руйнування в процесі гарячого пресування. Тому надійність функціонування прес-форми є тим важливим чинником, що впливає на одержання якісних кінцевих виробів, а також на обсяг матеріало- і енерговитрат при гарячому пресуванні, особливо крупногабаритних заготовок із конструкційної кераміки.

Викладене вище вказує на доцільність як на етапі розробки, так і при експлуатації устаткування для гарячого пресування проведення попередніх досліджень напруженого стану і надійності графітових прес-форм в реальних умовах їх термомеханічного навантаження в процесі гарячого пресування із застосуванням індукційного нагріву. При цьому є необхідним врахування взаємовпливу електромагнітного і теплового полів в елементах установки, теплового поля на напружений стан прес-форми, а також використання статистичної теорії крихкого руйнування.

Дослідженню теплових полів в елементах установки гарячого пресування порошкових заготовок із застосуванням індукційного нагріву присвячені роботи А.В.Аракчеєва, В.Б.Гласко, Г.Я.Гуна, В.І.Руднева, І.Н.Шклярєва та інших. В більшості з них автори обмежуються одновимірними моделями, в інших роботах проводиться двовимірний аналіз теплових полів в установках індукційного нагріву компактифікованих порошкових металевих заготовок для наступного допресування їх в прес-формах. Разом з тим на даний час є широкое коло робіт, в яких висвітлені питання взаємодії електромагнітного поля з матеріальним континуумом, а також розроблені ефективні методи розв'язання складних двох- і тривимірних задач індукційного нагріву.



Визначення напруженого стану і міцності прес-форм при їх механічному навантаженні проводяться в роботах В.П.Бондаренка, І.Д.Радомисельського, В.Г.Синкова, І.М.Федорченка та інших. Дослідженню полів напружень в порожнинних циліндричних тілах та їх міцності при механічних навантаженнях з допомогою експериментальних, аналітичних і чисельних методів присвячені роботи С.А.Бочарової, В.Т.Грінченка, М.А.Колтунова, В.Л.Рвачова, Н.С.Синекопа, Ю.М.Шевченка і інших. Однак результати комплексних досліджень напруженого стану і надійності прес-форм в умовах їх навантаження в процесі гарячого пресування порошків тугоплавких сполук з використанням індукційного нагріву на даний час відсутні. Таким чином, проведення вказаних досліджень є актуальним.

Метою роботи є чисельне дослідження впливу на напружений стан і надійність графітових прес-форм в умовах гарячого пресування порошкових сумішей тугоплавких сполук із застосуванням індукційного нагріву механічного і теплового навантажень прес-форми, розмірів заготовки і прес-форми, наявності, розташування і теплопровідності додаткових теплоізоляційних прокладок в установці гарячого пресування, геометрії і конструкції прес-форми.

Досягнення вказаної мети передбачає розробку ефективних алгоритмів і програм для ЕОМ розв'язання нелінійних задач індукційного нагріву і нестационарної теплопровідності та визначення напруженого стану і ймовірності руйнування прес-форми із врахуванням анізотропії, температурної залежності властивостей матеріалів і об'ємного розподілу напружень.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- розроблені ефективні алгоритми чисельного розв'язання нелінійних задач індукційного нагріву і нестационарної теплопровідності; одержана умова ефективного використання алгоритму розв'язку задачі теплопровідності;

- поширено варіант статистичної теорії крихкого руйнування, одержаний В.Т.Головчаном на базі підходів Вейбулла і Батдорфа, на випадок прогнозування надійності графітових прес-форм в умовах гарячого пресування порошків тугоплавких матеріалів з використанням індукційного нагріву;

- проведено комплексне дослідження і аналіз впливу на напружений стан і надійність графітових прес-форм в умовах процесу гарячого пресування механічного і теплового навантажень прес-форми; розмірів заготовки, що пресується, і прес-форми; наявності, розташування і теплопровідності теплоізоляційних прокладок в установці гаря-

чого пресування; геометрії і конструкції прес-форми.

Достовірність результатів, що отримані в роботі, забезпечена коректністю постановки задач, використанням обґрунтованих методів розв'язання, шляхом контролю величини похибок і практичної збіжності одержаних чисельних розв'язків, розв'язанням тестових задач, порівнянням з результатами лабораторних експериментів.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- одержані результати про характер розподілу температури і напружень в прес-формі, про залежність рівня напруженого стану в прес-формі і ймовірності її руйнування від конструктивних параметрів прес-форми і установки та режимів гарячого пресування, а також розроблені алгоритми і програми можуть бути використані при проектуванні установок індукційного нагріву, прес-форм для холодного пресування, установок для гарячого пресування, а також для оптимізації конструкції діючих установок і режимів гарячого пресування.

Особистим внеском дисертанта є:

- розробка чисельних алгоритмів розв'язання нелінійних задач індукційного нагріву і нестационарної теплопровідності, одержання умови ефективного використання алгоритму розв'язку задачі теплопровідності;

- чисельне дослідження впливу на напружений стан і надійність графітових прес-форм в умовах гарячого пресування порошків тугоплавких матеріалів механічного і теплового навантажень прес-форми, розмірів заготовки і прес-форми, наявності, розташування і теплопровідності теплоізоляційних прокладок в установці гарячого пресування, геометрії і конструкції прес-форми, а також впливу конструктивних параметрів установки на величину енерговитрат і швидкість нагріву.

Реалізація результатів роботи. Безпосередньо отримані дисертантом результати увійшли у звіти по темах НДР (№ ДР 01840017067 та № ДР 01880027525) Інституту надтвердих матеріалів НАН України.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: семінарах відділу математичного моделювання і обчислювальної техніки та відділу технології виробництва твердих сплавів і композиційних матеріалів, а також на сесії вченої ради "Надтверді матеріали і композити в породоруйнівному інструменті і вузлах тертя" Інституту надтвердих матеріалів НАН України (Київ, 1985-1996); XII, XIV конференціях молодих вчених ІНМ НАН України (Київ, 1987, 1989); XV Міжнародній конференції молодих вчених "Получение, свойства и применение сверхтвердых мате-

риалов (Київ, 1990), VI Українській конференції "Моделирование и исследование устойчивости систем" (Київ, 1995), на семінарі відділу термомеханіки та на семінарі за науковим напрямом "Механіка зв'язаних полів в матеріалах і елементах конструкцій" Інституту механіки НАН України (Київ, 1996).

Публікації. За результатами досліджень, виконаних в дисертації, опубліковано десять робіт.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, трьох глав, заключення, списку літератури, що містить 127 бібліографічних найменувань. Загальний об'єм роботи складає 168 сторінок, включаючи 34 рисунки і 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, приведені короткий огляд опублікованих робіт, що присвячені дослідженням теплових полів в елементах установок гарячого пресування, напруженого стану прес-форм і порожнинних циліндричних тіл при їх механічному навантаженні, а також методам розв'язання задач індукційного нагріву, формулюються основні положення, які виносяться на захист, приводиться анотація глав дисертації.

В першій главі приведені основні співвідношення теорії електромагнітного поля і теплопровідності, сформульована задача індукційного нагріву циліндричним індуктором елементів установки гарячого пресування сумішей тугоплавких матеріалів, приведений алгоритм її розв'язання.

Математична модель процесу індукційного нагріву складається із системи взаємозв'язаних нелінійних рівнянь електродинаміки для квазіусталених процесів і нестационарної теплопровідності відносно комплексних амплітуд характеристик електромагнітного поля та температури, усередненої за період коливань електромагнітного поля:

$$\operatorname{rot}(\hat{A}^{-1} \operatorname{rot} \vec{E}) - i \omega \mu_0 \vec{J} - \omega^2 \mu_0 \vec{D} = \vec{0}, \quad (1)$$

$$\hat{A} = \hat{A}(\vec{H}, \tau), \quad \vec{J} = \hat{\sigma}(\vec{E}, \tau) \vec{E}, \quad \vec{D} = \epsilon_0 \hat{\epsilon}(\vec{E}, \tau) \vec{E}, \quad (2)$$

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q_v, \quad (3)$$

$$Q_v = 0,5 \hat{\sigma} \vec{E} \cdot \vec{E}^* \quad (4)$$

з початковими і граничними умовами:

$$\vec{E} = \vec{H} = \vec{0}, \quad T = T_0 \quad \text{при} \quad t = 0; \quad (5)$$

$$E_{\tau 2} = E_{\tau 1}, \quad \vec{H}_{\tau 2} - \vec{H}_{\tau 1} = \vec{i} \quad \text{на } s_p; \quad (6)$$

$$\vec{E}_{\tau} = \vec{f}_{\tau} \quad \text{на } s_{\tau}; \quad \vec{H}_{\tau} = \vec{f}_{H} \quad \text{на } s_H; \quad \vec{E}, \vec{H} \rightarrow 0 \quad \text{при } |r| \rightarrow \infty; \quad (7)$$

$$-\lambda \text{grad} \vec{n} \cdot \vec{n} = \alpha_{\kappa} (\tau - \tau_c) + \bar{\epsilon} \sigma_0 (\tau^4 - \tau_c^4) \quad \text{на } s_{\tau}; \quad (8)$$

$$(\lambda \text{grad} \vec{n})_1 \cdot \vec{n}_{12} = (\lambda \text{grad} \vec{n})_2 \cdot \vec{n}_{12} = \alpha_{KH} (\tau_2 - \tau_1), \quad \text{на } s_{KH}. \quad (9)$$

При цьому для більш точного описання електромагнітного поля біля торців індуктора (рис.1: I - індуктор, З - заготовка, ПФ - прес-форма, ПН - пуансон, ПІ і ПР - відповідно теплоізоляційний матеріал і прокладка, І, ІІ і ІІІ - різні розташування додаткової теплоізоляційної прокладки) задання в ньому поля моделюється у вигляді

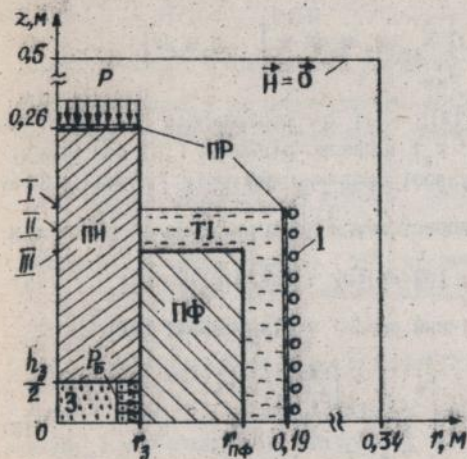


Рис. 1.

протікання поверхневих струмів \vec{j} (6) по поверхні s_p , що проходить через центри витків його обмотки. Алгоритм розв'язання нелінійної задачі (1) - (9) базується на методі скінченних елементів (МСЕ) у поєднанні з методом Бушнова-Гальоркіна і використанні двокрокової процедури на кожному кроці по часові. Попередньо рівняння теплопровідності (3) із використанням

підстановок Гудмена і Кірхгофа

$$c = \int_{T_0}^{\tau} c_p dT, \quad \lambda = \int_{T_0}^{\tau} \lambda dT, \quad (10)$$

приводиться до виду

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(\text{div} \lambda) + q_v. \quad (11)$$

В результаті застосування процедури Бушнова-Гальоркіна до рівнянь

(1), (11), скінченноелементної дискретизації області V на M скінченних елементів V^e , використання на кожному з них ізопараметричної апроксимації функцій $\vec{E}, \vec{J}, \vec{D}, c, \tau, Q_V, \vec{I}, \vec{H}_c$, 1 компонент тензора $\hat{\Lambda}$ та об'єднання локальних матриць одержимо систему рівнянь

$$\sum_{e=1}^M \left(\int_{(S \setminus S_A)^e} N_n \vec{n} \times \hat{\Lambda}^{-1} \text{rot}(\vec{E}_k N_k) ds + \int_{V^e} \hat{\Lambda}^{-1} \text{rot}(\vec{E}_k N_k) \times \text{grad} N_n dV - \omega \mu_0 \int_{V^e} (i \vec{J}_k + \omega \vec{D}_k) N_n N_k dV \right) = i \omega \mu_0 \sum_{e=1}^M \left(\int_{S_P^e} \vec{n} \times (\vec{l}_k \times \vec{n}) N_n N_k ds + \int_{S_H^e} \vec{H}_c \times \vec{n} N_n N_k ds \right). \quad (12)$$

$$\sum_{e=1}^M \dot{C}_k \int_{V^e} N_n N_k dV = \sum_{e=1}^M \left(- \int_{V^e} \text{grad} N_n \cdot (\text{div} \hat{\Lambda}_k N_k) dV - T_k \int_{S_T^e} \alpha N_n N_k ds + \int_{S_T^e} \alpha N_n T_c ds - (T_{1k} - T_{2k}) \int_{S_{KH}^e} \alpha_{KH} N_n N_k ds + \int_{V^e} N_n N_k Q_k dV \right). \quad (13)$$

Для розв'язання системи (12), (13) по двокроковій процедурі на кожному інтервалі часу $[t_1, t_2]$ запишемо рівняння (12) для моменту t_2 , виключивши із нього вузлові значення векторів густини струму

$$\vec{J}_k^{(2)} \text{ і індукції } \vec{D}_k^{(2)}, \text{ використовуючи представлення їх приростів} \\ d\vec{J}_k = d(\hat{\rho} \vec{E})_k = (\hat{\rho} d\vec{E} + (\partial \hat{\rho} / \partial t) \vec{E} dt + (\partial \hat{\rho} / \partial \vec{E}) \vec{E} d|\vec{E}|)_k, \quad (14)$$

(для $d\vec{D}_k$ має місце аналогічний вираз) в різницевому виді

$$\vec{J}_k^{(2)} = \hat{\rho}_k^{(11)} \vec{E}_k^{(1)} + \hat{\rho}_k^{(r)} (\vec{E}_k^{(2)} - \vec{E}_k^{(1)}) + \left(\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} \right)_k^{(r)} \vec{E}_k^{(r)} (T_k^{(2)} - T_k^{(1)}) + \\ + \left(\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial |\vec{E}|} \right)_k^{(r)} \vec{E}_k^{(r)} \beta(t_r) (|\vec{E}_k^{(r)}| - |\vec{E}_k^{(1)}|), \quad (15)$$

(для $\vec{D}_k^{(2)}$ - аналогічний вираз). В результаті отримаємо рівняння відносно вектору вузлових значень вектору \vec{E} в момент t_2 :

$$[\mathbf{B}][\vec{E}]^{(2)} = [\mathbf{D}][\vec{E}]^{(1)} + [(\mathbf{P}_T)]([T]^{(2)} - [T]^{(1)}) + \beta(t_r)[\mathbf{P}_E] \times \\ \times ([|\vec{E}|]^{(r)} - [|\vec{E}|]^{(1)})[\vec{E}]^{(r)} + i \omega \mu_0 [(\mathbf{R}_I)](\vec{I})^{(2)} + [(\mathbf{R}_H)](\vec{H}_c)^{(2)}. \quad (16)$$

Тут $\beta(t_r) = (t_2 - t_1)/(t_r - t_1)$ при $t_1 < t_r < t_2$ і $\beta(t_r) = 0$ при $t_r = t_1$; індекси (1), (2) і (r) означають, що значення величин об-

числюються в моменти часу t_1, t_2 і t_r ($t_1 < t_r < t_2$) відповідно; знаком $[\cdot]$ позначені відповідні матриці, причому $[T]^{(p)}$ і $[E]^{(p)}$ є діагональними матрицями вузлових значень величин $T^{(p)}$ і $|E|^{(p)}$. Якщо тензор магнітної проникності $\hat{\mu}$ залежить від характеристик полів, то для значень $\hat{\mu}^{-1}$ в межах елемента V^e використовується апроксимація $\hat{\mu}^{-1} = \hat{\mu}_i^{-1} N_i$, а для обчислення вузлових значень $\hat{\mu}_k$ в момент t_2 - вираз

$$\hat{\mu}_k^{(2)} = \hat{\mu}(T_k^{(2)}, |H_k^{(1)}|) + \frac{\partial \hat{\mu}}{\partial |H|} (T_k^{(2)}, |H_k^{(r)}|) \beta(t_r) (|H_k^{(r)}| - |H_k^{(1)}|) \quad (17)$$

та скінченнорізницєва апроксимація рівняння

$$|\vec{H}^{(r)}|_e = |(\hat{\mu}^{(r)})^{-1} \text{rot} \vec{E}^{(r)}| / (i \omega \mu_0)|_e, \quad \epsilon = \overline{1, N} \quad (18)$$

для обчислення напруженості магнітного поля \vec{H} в центрі елемента. Для визначення ж вузлових значень величини $|\vec{H}^{(r)}|$ була застосована методика спряженої апроксимації. Використавши вирази

$$\frac{\partial c}{\partial t} = c r \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \hat{\Lambda} = \hat{\Lambda}(T) T, \quad \hat{\Lambda}(T) = \frac{1}{T} \int_{T_e}^T \hat{\Lambda} dT, \quad (19)$$

одержані із співвідношень (10), виключимо вузлові значення c_k і $\hat{\Lambda}_k$ із (13). У результаті одержимо рівняння відносно вектору вузлових значень температури $\{T\}$:

$$[A] \{c\} \{T\} + ([v_{1j}] [x_{1j}] + [H] T) \{T\} = \{q\}, \quad (20)$$

де $[A]$ і $[v_{1j}]$ - постійні матриці значень об'ємних інтегралів, $\{c\}$ і $\{x_{1j}\}$ - діагональні значення величин $c(T) \rho(T)$ і компонент $x_{1j}(T)$ тензора $\hat{\Lambda}$, одержаних згідно з третім виразом (19) шляхом обчислення інтегралів від відповідних компонент тензора теплопровідності $\hat{\Lambda}$, значення яких для реальних матеріалів можна з достатньою точністю апроксимувати, наприклад, поліномом скінченного степеня від температури. Тут використано позначення $\{T\} = \{\partial T / \partial t\}$.

В результаті інтегрування системи (20) по часові t в межах від t_1 до t_2 приходимо до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно вузлових значень температури на кінцях часового інтервалу. При цьому значення теплофізичних властивостей і джерел тепла відповідають моменту часу $t_r \in [t_1, t_2]$. Розв'язання одержаної системи на інтервалі $[t_1, t_2]$ проводиться з допомогою двокрокової

процедури: 1) по значеннях температури і властивостей для моменту часу $t_1 = t_n$ знаходимо температуру при $t_2 = t_{n+1/2} = (t_n + t_{n+1})/2$, 2) на другому кроці за відомими значеннями температури в момент $t_1 = t_n$ і властивостей при $t_r = t_{n+1/2}$ визначаємо температуру в момент $t_2 = t_{n+1}$.

По аналогічній схемі розв'язується задача індукційного нагріву: 1) маючи значення величин \vec{E} і \vec{T} і властивостей матеріалів у початковий момент часу $t_1 = t_n$ і значення величин \vec{I} і \vec{H}_t - в момент $t_2 = t_{n+1/2}$, знаходимо із рівняння (16) вектор напруженості електричного поля для $t_2 = t_{n+1/2}$. Обчислюємо густину теплових джерел q_v , і, розв'язавши задачу теплопровідності по описаній вище схемі, знаходимо розподіл температури в момент t_{n+1} ; 2) обчислюємо значення властивостей матеріалу. Приймавши $t_1 = t_n$, $t_r = t_{n+1/2}$, $t_2 = t_{n+1}$, із системи (16) знаходимо $\vec{E}(t_{n+1})$. Якщо магнітна проникність залежить від напруженості магнітного поля, то використовуються рівняння (17), (18), а вектор $\{\vec{H}(t_{n+1})\}$ визначається шляхом лінійної екстраполяції величин $\{\vec{H}(t_n)\}$ і $\{\vec{H}(t_{n+1/2})\}$.

Згідно викладених алгоритмів для осесиметричного випадку розроблені пакети програм для ЕОМ. Придатність алгоритмів для розв'язання нелінійних задач індукційного нагріву і нестационарної теплопровідності встановлена в результаті розв'язання ряду тестових задач при сильній залежності властивостей матеріалу від температури і напруженості магнітного поля та жорстких граничних умовах. Встановлено, що при не різко вираженому поверхневому ефекті (що має місце при індукційному нагріві графітових прес-форм струмами частотою $f = 2400$ Гц) для одержання відносної похибки чисельного розв'язку порядку кількох процентів досліджувану однорідну область простору достатньо розбити на 9 - 12 елементів у кожному із координатних напрямків.

При пошукові матриці системи рівнянь (16) і відповідної системи для розв'язку задачі теплопровідності обчислення об'ємних інтегралів досить провести лише один раз, оскільки значення властивостей матеріалів використовуються тільки у вузлах скінченного елемента (використання вузлових значень властивостей проводиться, наприклад, в роботах Lavers'a). Це призводить до значного зменшення машинного часу при формуванні систем, а в багатьох практичних випадках і до зменшення загальних машинних витрат при чисельному розв'язанні задач. Для визначення границі ефективного використання

алгоритму розв'язку задачі теплопровідності оула одержана умова

$$b < b_{\text{гр}} = \left[(\alpha_1/k) \sum_{e=1}^N N_{\text{оп}}^e \right]^{1/2} \quad (21)$$

згідно з якою застосування вказаного алгоритму є ефективним порівняно із стандартною схемою МСЕ, якщо півширина b стрічки матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь менша від певної величини $b_{\text{гр}}$, яка залежить від кількості машинних операцій $N_{\text{оп}}^e$ при обчисленні об'ємних інтегралів в межах елемента. Тут α_1 - постійна, k - загальна кількість вузлів сітки. В результаті проведеного чисельного експерименту, в якому при різних b визначалось відношення витрат машинного часу $\tau/\tau_{\text{СТ}}$ при розв'язанні нелінійної нестационарної задачі теплопровідності з використанням запропонованої схеми (20) і стандартної схеми МСЕ (табл.1), встановлено, що в осесиметричному випадку величина $b_{\text{гр}} \approx 47$, що є достатнім для коректного розв'язання ряду практичних задач теорії теплопровідності.

Таблиця 1.

m	144	144	400	324	400	484	576	676	841
b	15	23	23	32	35	39	42	45	50
$\tau/\tau_{\text{СТ}}$	0,50	0,57	0,58	0,73	0,80	0,87	0,94	0,97	1,03

В другій главі проведено дослідження електромагнітного і теплового полів в графітовій прес-формі установки гарячого пресування при індукційному нагріві. В числовій моделі індукційного нагріву враховується температурна залежність властивостей матеріалів пуансонів і прес-форми (графіт МГ-1, рис.1), заготовки (попередньо холодноспресована суміш на основі нітриду кремнію з пористістю $n = 0,55$), теплоізоляційного матеріалу (порошок ZrO_2 , $n = 0,62$), конвективний і променевий теплообмін із зовнішнім середовищем, а також анізотропія теплопровідності графіту. При обчисленнях оули прийняті реальні параметри режиму індукційного нагріву і елементів установки; величина поверхневого струму задавалась на основі реальних величин струму генератора і напруги на контактах індуктора. Середня похибка δ задоволення чисельним розв'язком рівняння поля (1) і граничних умов (6) становила відповідно 3% і 4,6%, а її локальні значення в зонах торців індуктора досягали 12% і 15%.

Встановлено, що найбільші вихорові струми в прес-формі, згідно з ефектом "близькості", протікають в зоні, прилеглої до її зов-

нішньої бічної поверхні. Відповідно до цього максимальний рівень температури в прес-формі виникає в середній частині її зовнішньої бічної поверхні; максимальний перепад температури $\Delta T_{\text{пф}}$ досягається між точками вказаної зони і торцевою зоною внутрішньої бічної поверхні прес-форми. Причому із плином часу нагріву величина $\Delta T_{\text{пф}}$ сильно зростає, а, отже, і зростає неоднорідність температурного поля в прес-формі: так, на кінцевій стадії нагріву ($t \approx 150 - 180$ хв.) величина $\Delta T_{\text{пф}}$ в декілька разів більша, ніж на початковій ($t \approx 60 - 80$ хв.) і досягає кількох сотень градусів. Встановлено, що максимальні температурні градієнти в прес-формі виникають в зоні, прилеглої до внутрішньої частини її торцевої поверхні.

Для тих же параметрів установки і режиму нагріву був проведений лабораторний експеримент по вимірюванню температури в різних точках заготовки і прес-форми. Відхилення між результатами обчислень температури і даними експерименту знаходилося в межах 12% протягом всього часу нагріву, що також підтверджує придатність запропонованої методики для розв'язання практичних задач індукційного нагріву.

Третя глава присвячена дослідженню напруженого стану та надійності графітових прес-форм в умовах гарячого пресування порошків тугоплавких матеріалів з використанням індукційного нагріву. Напружений стан в прес-формі під час гарячого пресування виникає при дії на неї механічного тиску з боку заготовки P_B , що пресується (рис.1), а також зумовлений індукційним нагрівом. Обчислення проводились для реальних параметрів режиму гарячого пресування та конструктивних параметрів установки (робочий тиск $p = 15 - 25$ МПа, $l = (2 - 3) \cdot 10^4$ а/м); у випадках, коли пресування проходить з використанням рідкої фази, можна вважати, що величина P_B незначно відрізняється від тиску p , прикладеного до пуансонів з боку пресу; якщо ж має місце лише твердофазне ущільнення заготовки, то значення P_B значно менше p і визначається з урахуванням коефіцієнту Пуассона порошків. Визначення напруженого стану прес-форми проведено шляхом розв'язання квазістатичної лінійної задачі термопружності з урахуванням температурної залежності властивостей матеріалу та використанням розподілу температури в прес-формі, одержаного в результаті розв'язку задачі індукційного нагріву. Чисельна схема розв'язку базується на МСЕ. Надійність прес-форми визначалась шляхом обчислення ймовірності її руйнування з використанням розробленого В.Т.Головчаном варіанту статистичної теорії крихкого руйнування. Встановлена придатність даної моделі для оцінки надійності

виробів із конструкційного графіту.

З метою визначення впливу як механічного, так і теплового навантажень прес-форми на її напружений стан і ймовірність руйнування спочатку були проведені дослідження для випадку дії на неї лише механічного тиску p_B з боку заготовки. Обчислення проводились для прес-форм різних розмірів при різних значеннях висоти заготовки h_3 і тиску p_B , параметри розподілу Вейбулла для графіту МГ-1 були вибрані рівними $m = 8,41$ і $\sigma_0 = 4,02 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{3/m}$. Встановлено, що максимальні напруження розтягу σ_{max} , які є головною небезпекою для крихких матеріалів, діють в зоні зовнішнього навантаження прес-форми і ними є кругові напруження σ_{θ} . Виявлено закономірність залежності рівня напружень розтягу σ_{max} в прес-формі і ймовірності її руйнування P_f від висоти прес-форми h : для кожного фіксованого набору значень радіусу r_3 і висоти h_3 заготовки, радіусу прес-форми $r_{\text{пф}}$ та величини прикладеного тиску p_B існує така величина $h_{\text{кр}}$ висоти прес-форми, що при $h < h_{\text{кр}}$ рівень напружень розтягу в прес-формі і ймовірність її руйнування істотно залежать від h , а при $h > h_{\text{кр}}$ величини σ_{max} і P_f практично не залежать від h (рис. 2). Аналогічні залежності мають місце і при інших значеннях висо-

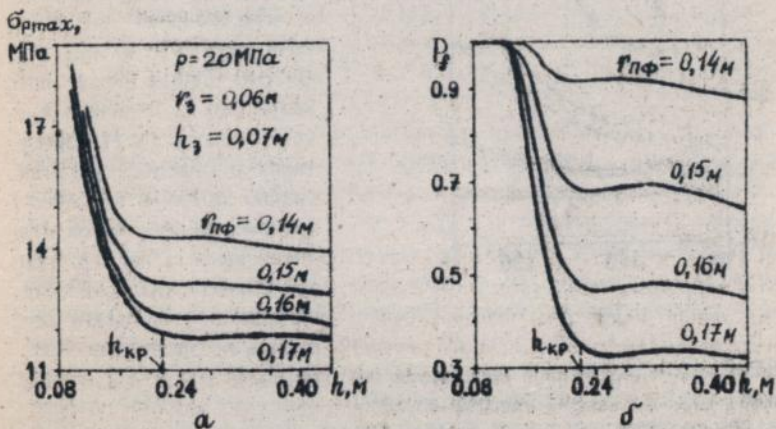


Рис. 2.

ти, радіусу заготовки і тиску p_B . Встановлено, що на величину рівня напружень розтягу в прес-формі та ймовірність її руйнування значно впливає величина коефіцієнту Пуассона ν графіту: при зміні

в від 0,24 до 0,32 величина P_r зменшується на 25% - 40%. Слід відзначити, що проведені обчислення напружень можна здійснити також аналітичними та напіваналітичними методами, викладеними в роботах В.Т.Грінченка і М.А.Колтунова із співавторами.

При одночасній дії на прес-форму механічного навантаження і індукційного нагріву, що має місце при гарячому пресуванні, рівень напружень розтягу в ній і ймовірність її руйнування істотно залежать від висоти h прес-форми і при $h > h_{кр}$: із збільшенням h їх величини зменшуються (рис.3: — — — $h = 0,25\text{м}$, - - - - $h = 0,28\text{м}$, — — — $h = 0,32\text{м}$; $P_B = 15\text{МПа}$, $1 - I = 1,85 \cdot 10^4$, $2 - I = 2 \cdot 10^4 \text{а/м}$). Це зумовлено зменшенням градієнту температури при збільшенні висоти h , оскільки максимальний перепад температури в прес-формі $\Delta T_{пф}$ практично не залежить від h . Із плином часу нагріву величина $\Delta T_{пф}$ збільшується, що призводить до зростання термічних напружень розтягу в прес-формі, якими є також кругові напруження. Їх величина

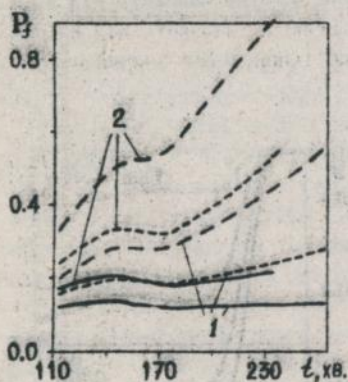


Рис.3.

співрозмірна з величиною механічних напружень розтягу, зона дії знаходиться біля внутрішньої оскової поверхні прес-форми, а максимальних значень вони досягають в зоні II торців. Аналіз рис.3 показує, що як величина P_r , так і швидкість її зростання в процесі нагріву значно залежить від висоти прес-форми, а також від інтенсивності нагріву: при збільшенні інтенсивності нагріву в 1,08 разів величина P_r зростає на 50%, а ймовірність руйнування прес-форми висотою 0,25м в 1,5 - 1,8 раза більша, ніж прес-форми висотою 0,32м.

Встановлено, що кожне окремо взяте - механічне і теплове навантаження прес-форми спричиняє відносно невелику ймовірність її руйнування ($P_r < 0,04$). Однак при їх одночасній дії величина P_r прес-форми може зростати в декілька, а то і в десятки разів (для розглянутого в роботі випадку $P_r = 0,74$). Це є наслідком того, що термічні напруження розтягу виникають в тих же зонах прес-форми.

де діють максимальні механічні напруження розтягу.

В процесі нагріву в зоні торців прес-форми виникають максимальні температурні градієнти і термічні напруження розтягу. Тому були проведені розрахунки температурного поля для прес-форми, що складається із трьох частин: середньої - висотою $h_1 > h_{кр}$ та двох торцевих, що щільно прилягають відповідно до верхнього і нижнього торців середньої частини, а розрахунки напруженого стану і ймовірності руйнування проводились лише для середньої частини. В результаті обчислень встановлено, що коли замість суцільної прес-форми використовувати прес-форму вказаної вище конструкції, то зменшення ймовірності її руйнування може досягати 45% (таблиця 2).

Таблиця 2.

$t, \text{ хв.}$	P_f		P_f		P_f	
	$h=0,25\text{м}$	$h_1=0,20\text{м}$	$h=0,28\text{м}$	$h_1=0,22\text{м}$	$h=0,32\text{м}$	$h_1=0,25\text{м}$
144	0,165	0,146	0,090	0,077	0,046	0,041
174	0,193	0,172	0,088	0,078	0,039	0,035
204	0,337	0,272	0,131	0,107	0,045	0,040
235	0,582	0,422	0,214	0,149	0,056	0,046
265	0,864	0,616	0,376	0,208	0,080	0,052

В практиці гарячого пресування для зменшення відтоку тепла від прес-форми встановлюють теплоізоляційну прокладку між пуансоном і притисочною плитою пресу. Показано, що коли розташувати ще одну таку прокладку на шляху відтоку тепла від прес-форми (положення I, II, III, рис.1), то можна знизити ймовірність руйнування прес-форми на 50% і більше, а теплові витрати на нагрівання установки в процесі пресування на 25%. При розв'язанні задачі теплопровідності прокладка моделювалась у вигляді поверхні неідеального теплового контакту, на якій задавались граничні умови (9) та вводились подвійні вузли. Серед трьох розглянутих розташувань прокладки найбільш оптимальним є розташування II на рівні шару теплоізоляційного матеріалу (положення I), що, очевидно, забезпечує найменший відтік тепла від прес-форми порівняно із двома іншими випадками. На величину ймовірності руйнування прес-форми P_f істотно впливає теплопровідність прокладки $\lambda_{пр}$: для випадку I при зменшенні $\lambda_{пр}$ від 10 до 0,105 Вт/(м·К) величина P_f зменшується на 60%, причому,

Із плином часу нагріву (при досягненні в заготовці високих температур $T_3 > 2000\text{K}$) ефективність використання прокладки зростає.

З метою дослідження впливу геометрії прес-форми на її надійність були проведені обчислення напруженого стану і ймовірності руйнування трьох прес-форм однакового об'єму але з різною формою меридіонального перетину: $r_3 = 0,06\text{м}$; $h_3 = 0,05\text{м}$, $p_3 = 15\text{МПа}$, $i = 2 \times 10^4 \text{а/м}$; 1 - циліндрична прес-форма, $h = 0,217\text{м}$, $r_{\text{нф}} = 0,17\text{м}$; 2 - циліндрична прес-форма, $h = 0,25\text{м}$, $r_{\text{нф}} = 0,16\text{м}$; 3 - $h = 0,25\text{м}$, $r_{\text{нф}} = 0,17\text{м}$, зовнішня січна поверхня - параболоїд $r = -1,97z^2 + 0,17\text{м}$. Ймовірність руйнування прес-форми 2 в середньому на 40% менша, ніж першої, а ще менша (\approx на 20%) ймовірність руйнування прес-форми із параболоїдною січною поверхнею. Аналіз рис.4 показує, що при використанні прес-форми з параболоїдною січною поверхнею ймовірність її руйнування нижча в середньому на 30%, витрати тепла Q на нагрівання установки в процесі гарячого пресування менші (швидкість нагріву вища) порівняно із випадком, коли використовується циліндрична прес-форма тих же розмірів. Встановлено, що даний ефект зу-

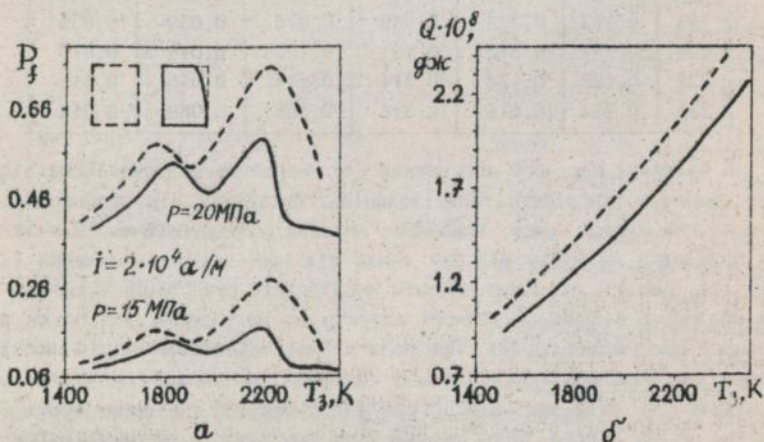


Рис. 4.

мовлений тим, що в прес-формі із параболоїдною поверхнею рівень термічних напружень розтягу в зоні дії максимальних механічних значно менший (\approx на 40%), ніж в циліндричній прес-формі.

В заключенні стисло формулюються основні результати, що отримані в роботі:

Досліджено вплив на напружений стан і надійність графітових прес-форм в умовах гарячого пресування сумішей тугоплавких матеріалів з використанням індукційного нагріву механічного і теплового навантажень прес-форми; розмірів заготовки, що пресується, і прес-форми; наявності, розташування і теплопровідності теплоізоляційних прокладок в установці гарячого пресування; геометрії і конструкції прес-форми, а також вплив конструктивних параметрів установки на величину теплових витрат і швидкість нагріву в процесі гарячого пресування. Для проведення вказаних досліджень розроблені ефективні алгоритми розв'язку нелінійних задач індукційного нагріву і нестационарної теплопровідності; отримана умова ефективного використання алгоритму розв'язку задачі теплопровідності. Виявлена закономірність впливу висоти прес-форми на рівень напружень розтягу і ймовірність руйнування прес-форми при її механічному навантаженні. В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Кожна окремо взята складова навантаження прес-форми в процесі гарячого пресування - як механічний тиск, так і індукційний нагрів - зумовлюють відносно незначну ймовірність її руйнування P_1 . Однак при їх сумарній дії величина P_2 може бути значно більшою.

2. В процесі гарячого пресування максимальні механічні і термічні напруження розтягу виникають на внутрішній бічній поверхні прес-форми, вони є співрозмірними по величині.

3. При оптимальному розташуванні додаткових теплоізоляційних прокладок на шляху відтоку тепла від прес-форми можна значно знизити як ймовірність її руйнування (на 25 - 50%), так і енерговитрати (на 20 %) в процесі гарячого пресування.

4. Істотного зниження ймовірності руйнування прес-форми (до 45%) можна досягнути при переході від використання суцільної прес-форми до складеної із трьох частин.

5. На рівень напружень розтягу в прес-формі і ймовірність її руйнування істотно впливає геометрія прес-форми. Порівняно із циліндричною прес-формою використання прес-форми таких же розмірів але із парасолоїдною зовнішньою бічною поверхнею призводить до зниження ймовірності руйнування прес-форми (на 30%), енерговитрат та підвищення швидкості нагріву.

6. Одержані результати дають підставу зробити висновок про можливість оптимізації конструктивних параметрів установки та режиму гарячого пресування з метою мінімізації сукупних витрат матеріалів, енергії і часу при здійсненні процесу гарячого пресування.

Основні результати дисертації опубліковано в таких роботах:

1. Головчан В.Т., Дутка В.А., Колодницький В.Н., Никитюк Н.И., Петасюк О.У. Эффективный вариант метода конечных элементов для решения трехмерных нестационарных нелинейных задач теплопроводности//Докл.АН УССР. Сер.А.- 1987.- № 10.- С. 70-73.
2. Дутка В.А. Определение температурного поля в условиях индукционного нагрева при горячем прессовании керамических материалов //Сверхтвердые материалы в ускорении научно-технического прогресса.- Киев: ИСМ АН УССР, 1987.- С. 100-103.
3. Головчан В.Т., Дутка В.А. Решение нелинейных задач индукционного нагрева//Докл.АН УССР. Сер.А.- 1988.- №1.- С. 36-40.
4. Дутка В.А. Решение задачи индукционного нагрева в условиях горячего прессования керамических материалов//Получение, свойства сверхтвердых материалов и перспективные технологии их применения: Сб. науч. трудов.- Киев: ИСМ АН УССР, 1990.- С.74-77.
5. Дутка В.А. Математическое моделирование электромагнитных и термомеханических полей при горячем прессовании керамических материалов с использованием индукционного нагрева//Докл. АН УССР. Сер.А.- 1991.- №2.- С. 15-19.
6. Дутка В.А. Определение температурных напряжений в графитовой пресс-форме при индукционном нагреве //Сверхтвердые и композиционные материалы и покрытия, их применение.- Киев: ИСМ АН УССР, 1991.- С. 93-96.
7. Крыль Я.А., Дутка В.А., Исаков А.А. Изучение температурного поля при горячем прессовании заготовок из нитрида кремния//Сверхтверд. материалы.- 1993.- № 4.- С. 20-23.
8. Дутка В.А. Численное моделирование электротеплового и механического состояний элементов системы горячего прессования крупногабаритных керамических изделий//6 Украинская конф.: Моделирование и исследование устойчивости систем (Прикл. механика). Киев, 15-19 мая 1995 г.: Тез. докл.- Киев, 1995.- С. 45.
9. Дутка В.А. К оценке надежности изделий из конструкционного графита//Пробл. прочности.- 1995.- № 4.- С. 69-73.

Анотация

Дутка В.А. Термонапряженное состояние графитовых пресс-форм в условиях индукционного нагрева.

Диссертация является рукописью на соискание ученой степени канди-

дата технических наук по специальности 05.02.07 - механика деформируемого твердого тела, Институт сверхтвердых материалов НАН Украины, Киев, 1996.

Защищаются результаты численного исследования влияния режима горячего прессования и конструктивных параметров технологической установки на напряженное состояние и надежность графитовых пресс-форм в условиях прессования порошковых смесей тугоплавких соединений с использованием индукционного нагрева. Для проведения указанных исследований разработаны эффективные алгоритмы решения нелинейных задач индукционного нагрева и нестационарной теплопроводности. Получено условие эффективного применения алгоритма решения задач теплопроводности. Выполнен анализ тепловых полей, напряженного состояния и вероятности разрушения графитовых пресс-форм в условиях горячего прессования.

Annotation

Dutka V.A. Thermostressed state of graphite press dies under the conditions of induction heating.

The thesis is a manuscript submitted for awarding the Candidate Degree of Technical Sciences on speciality 05.02.07 - the mechanics of deformable solid, Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1996.

The results of numerical investigations of hot pressing regime and constructive parameters of technological plant influence on stressed state and reliability of graphite press dies under the conditions of refractory materials powder mixtures pressing using induction heating are defended. The effective solving algorithms for the nonlinear induction heating and transient heat conduction problems are proposed. The condition of effective application of solving algorithm for the heat conduction problems is obtained. The analysis of the thermal fields, stressed state and fracture probability of graphite press dies under the conditions of hot pressing has been undertaken.

Ключові слова: термонапружений стан, індукційний нагрів, ймовірність руйнування, графітова прес-форма, гаряче пресування, метод скінченних елементів.

Handwritten signature
441.358

АВ 35.996

Підп. до друку 22.10.96. Формат 60x90/16. Папір пис. № 1.
Друк офс. Ум. друк. арк. 1,0. Ум.ф.-відб. 1,0. Обл.-вид.арк. 0,9.
Тираж 100 екз. Сам. 275. Безплатно.

Інститут надтвердих матеріалів НАН України
254074, Київ-74, вул. Автозаводська, 2

Фотоаприт ЦМ НАН України