

Józef SZYMCZYK

Instytut Techniki Ciepłej

KRYTERIA DOBORU ODPowiedNIEGO MATERIAŁU  
NA ELEMENTY PODDANE WPŁYWOM NAPRĘŻEŃ TERMICZNYCH

**Streszczenie.** W pracy przedyskutowano wpływ różnych materiałów na wielkość naprężeń termicznych, jakie w nich powstają pod wpływem tych samych warunków pozostałych. Ilościowo zagadnienie ujęto przez wprowadzenie odpowiednich współczynników będących funkcją wielkości określających cieplno-mechaniczne właściwości materiału.

Wpływ różnych materiałów na wielkość naprężeń, jakie powstają w elementach przy danych warunkach termicznych, może być przeanalizowany przy pomocy zależności przedstawionych w literaturze (np. [1] i [2]). W celu pokazania jawniejszego wpływu niektórych wielkości charakteryzujących właściwości materiału, staje się konieczne dokonanie pewnych przekształceń. Większość bowiem rozwiązań określających składowe stanu naprężenia uzyskiwane są przy zastosowaniu warunków brzegowych pierwszego rodzaju dla rozwiązania równania Fouriera-Kirchhoffa. Forma matematyczna tych wyrażeń jest prostsza, ale wpływ niektórych wielkości staje się zamaskowany. Przykładowo, dla ustalonych pól temperatur we wzorach opisujących je, można wyeliminować współczynnik przewodzenia ciepła, który w dużym stopniu decyduje o charakterze tego pola. Podobna sytuacja jest ze strumieniem ciepła przepływającym przez dany element. Dla cylindrycznej długiej rury, przez którą przepływa promieniowo ustalony strumień ciepła, składowa normalna naprężenia przy warunkach brzegowych pierwszego rodzaju dla temperatury ma postać następującą

$$\sigma_{rr} = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \frac{t_w}{2 \ln \frac{r_z}{r_w}} \left[ -\ln \frac{r_z}{r} - \frac{r_w^2}{r_z^2 - r_w^2} \left( 1 - \frac{r_z^2}{r} \right) \ln \frac{r_z}{r_w} \right] \quad (1)$$

Wyprowadzenie jej można znaleźć w [2] przy założeniu, że temperatura na zewnętrznym promieniu  $r_z$  jest równa zero a na wewnętrznym  $t_w$ .

Jeżeli dla tej samej rury zastosuje się warunki brzegowe drugiego rodzaju dla temperatury, to wyrażenie (1) przyjmie nową postać

$$\sigma_{rr} = \frac{\alpha E}{(1-\nu)} \frac{\dot{q}}{2\pi r l} \frac{1}{r} \left[ \frac{r^2}{r_z^2} - \frac{r_w^2}{r_w^2} \int_{r_w}^r r \ln \left( \frac{r_w}{r} \right) dr + \right. \\ \left. - \int_{r_w}^r r \ln \left( \frac{r_w}{r} \right) dr \right], \quad (2)$$

która jest znacznie wygodniejsza do analizy wpływu właściwości materiału czy wielkości strumienia ciepła na wielkość naprężeń termicznych. Podobnie do (2) można przedstawić zależności dla wyznaczania innych składowych naprężenia, a więc jako iloczyny następujących czynników:

- współczynnika uwzględniającego właściwości materiału

$$C = \frac{\alpha E}{(1-\nu)\lambda} \quad (3)$$

- jednostkowego strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnię walca na promieniu  $r$

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{\lambda} = \frac{\dot{Q}}{2\pi r l} \quad (4)$$

- funkcji wpływowej  $F$  zależnej od geometrii i wymiarów liniowych elementu. Uwzględniając powyższe założenia można napisać ogólnie, że

$$\sigma_{ij} = C \dot{q} F_{ij}(r, \varphi, z). \quad (5)$$

Ostatnie równanie wskazuje na to, że materiał tym lepszy będzie do znoszenia dużych gradientów temperatury; im wartość współczynnika  $C$  będzie mniejsza. Naprężenia termiczne można więc uczynić w danym elemencie możliwe małe, jeżeli zastosuje się materiał odznaczający się małymi wartościami modułu Younga  $E$ , liczby Poissona  $\nu$  i współczynnika rozszerzalności liniowej  $\alpha$ , natomiast dużą wartością współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$ . Dla różnych materiałów  $C$  jest miernikiem naprężeń termicznych, jakie w nich powstaną pod wpływem tych samych warunków pozostałych.

Duże wartości naprężeń termicznych mogą być dopuszczone dla materiałów odznaczających się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi. Należy więc

wprowadzić nowe współczynniki, w których uwzględni się wartość granicy plastyczności  $R_e$  lub czasowej granicy pełzania  $R_{1/1000}$ .

$$C_{R_e} = \frac{R_e}{C} = \frac{R_e (1 - \nu) \lambda}{\alpha E} \quad (6)$$

$$C_{R_1} = \frac{R_{1/1000}}{C} = \frac{R_{1/1000} (1 - \nu) \lambda}{\alpha E} \quad (7)$$

Z powyższego określenia  $C_{R_e}$  i  $C_{R_1}$  wynika, że materiał tym odpowiedniejszy będzie na elementy poddane wpływom naprężeń termicznych, im wartości ich będą większe.

Można wykazać, że do postaci (5) można sprowadzić również każde niestalone pole naprężeń. Przy wyborze materiału mającego przenosić zmienne w czasie pole temperatur należy rozpatrzyć jeszcze wpływ takich zjawisk na jego zachowanie się, jak zmęczenie temperaturowe i uderzenie cieplne. Zmęczenie temperaturowe jest podobne do zmęczenia wywołanego okresowo-zmiennym obciążeniem mechanicznym. Zmienne pole temperatur powoduje wystąpienie przemiennych, ściskających i rozciągających naprężeń termicznych w danym punkcie elementu. Wielokrotne powtórzenie tego efektu prowadzi do mikropęknięć wywołanych lokalnym zmęczeniem materiału, których rozprzestrzenienie prowadzi do makroskopowych uszkodzeń. Zdolność materiału do przeciwstawiania się takim obciążeniom nazywa się wytrzymałością na zmęczenie temperaturowe i wyznacza się je doświadczalnie jako ilość cykli nagrzania i ochłodzenia przedmiotu lub modelu do chwili pojawienia się widocznej szczeliny.

Analiza rozwiązań różnych przypadków uderzenia cieplnego pozwala je również sprowadzić do postaci (5), ale nie tylko sama wartość naprężenia ma tu decydujące znaczenie. Jeżeli uwzględni się fakt, że wytrzymałość wielu materiałów w podwyższonych temperaturach w dużym stopniu zależy od szybkości zmian obciążenia, to zjawisko wystąpienia szybkich zmian pola temperatury staje się niebezpieczne i musi być dodatkowo uwzględnione. Niektóre materiały mogą nie przenieść naprężeń termicznych wynikłych z uderzenia cieplnego, mimo że w warunkach powolnego ogrzewania lub chłodzenia ich wielkość okazałaby się bezpieczna. Są one kruche na uderzenie cieplne, czyli gwałtowane zmiany naprężeń termicznych. Badania doświadczalne pozwoliły określić bezpieczny zakres szybkich zmian temperatury jako iloczyn funkcji wpływowych tzw. parametrów uderzenia cieplnego

$$C_{u1} = \frac{\lambda (1 - \nu) R_e}{E \alpha} \quad (8)$$

dla przedmiotów o małych wymiarach charakterystycznych oraz

$$C_{u2} = \frac{(1 - \nu) R_e}{E\alpha} \quad (9)$$

oraz dla przedmiotów o dużych wymiarach charakterystycznych. Z porównania (8) z (6) wynika, że parametr  $C_{u1}$  jest równoważny współczynnikowi  $C_{Re}$ . Parametry  $C_{u1}$  i  $C_{u2}$  pozwalają porównać różne materiały biorąc pod uwagę ich względną odporność na uderzenie cieplne. Uszeregowanie różnych materiałów nie będzie identyczne przy wykorzystaniu obu współczynników. Wynika to z różnego zachowania się przedmiotów nawet o tym samym kształcie, lecz o różnych wymiarach geometrycznych, podczas szybkich zmian temperatury. Jeżeli materiał źle przewodzi ciepło, wówczas duży strumień ciepłny szybko narastający swoje działanie skieruje na włókna leżące najbliżej powierzchni, gdzie może nastąpić zniszczenie jej przez wykruszenie. W niektórych przypadkach może się to okazać mniej groźne, niż naprężenia powstające wewnątrz przedmiotu o dużych rozmiarach, wykonanego z materiału o dużej wartości współczynnika przewodzenia ciepła. W ten sposób w niektórych przypadkach materiał będący dobrym przewodnikiem ciepła pod względem wytrzymałości na uderzenie cieplne będzie gorszy od materiału posiadającego mniejszy współczynnik przewodzenia ciepła.

Przy pomocy określonych współczynników poszukiwano odpowiedniego materiału na wykonanie walców formujących walcarki szkła, które głównie poddane są wpływom naprężeń termicznych, zmieniających się w czasie obrotu. Dokonana analiza dała pozytywne rezultaty, obecnie walce działają przez dłuższy okres czasu bez deformacji.

Z zamieszczonej tabeli widać, że materiałem, który najlepiej znosi duże różnice temperatur jest grafit. Przy tych samych warunkach pozostałych powstają w nim naprężenia około sto razy mniejsze niż w przypadku różnych gatunków stali. Nie pogarszają sytuacji nienajlepsze właściwości wytrzymałościowe grafitu, gdyż mimo tego współczynniki  $C_{Re}$  i  $C_{u1}$  są kilka razy większe od analogicznych wielkości dla stali. Następnym bardzo dobrym materiałem do przenoszenia naprężeń termicznych są stopy tytanu; o ograniczonej ich stosowalności może stanowić ich koszt. Kolejnym wyróżniającym materiałem są stale niskostopowe, których reprezentantem jest stal 40H2MF. Mogą one przenosić prawie dwukrotnie większe gradienty temperatur niż stale węglowe. W przypadku wysokiej średniej temperatury przedmiotu można stosować stale stopowe wysokochromowe. Natomiast do przenoszenia naprężeń termicznych nie nadają się stale wysokostopowe chromowo-niklowe. Brak niektórych danych uniemożliwił przeprowadzenie pełnej analizy dla żeliw. Biorąc jednak pod uwagę to, że właściwości wytrzymałościowe żeliw sferoidalnych są zbliżone do właściwości stali oraz wyznaczone wartości współczynnika  $C$  można przewidywać, że żeliwa są odpowiedniejszym tworzywem do znoszenia dużych gradientów temperatur niż stale.

Wartości współczynników  $C$ ,  $C_{R_e}$ ,  $C_{u1}$ ,  $C_{u2}$   
dla różnych materiałów w temperaturze 400°C

Lp.	Materiał	$C \cdot 10^{-3}$ s/m <sup>2</sup>	$C_{R_e} = C_{u1}$ MN/s	$C_{u2}$ deg	Żaroodporny w atmosferze powietrza do temperatury °C
1	Stal 45	79,3	2950	108	400
2	Stal 2H17	75,3	2390	101,8	850
3	Stal H26N4	98,5	2340	124	1100
4	Stal H18N9S	193,2	835	48	850
5	Stal 40H2MF	129,4	5620	286	550
6	Stop tytanu	96,3	6030	623	700
7	Grafit	1,04	12930	183	1500
8	Żeliwo sferoidalne ferrytyczne	27,1	-	-	-
9	Żeliwo sferoidalne perlityczne	33,9	-	-	-

## LITERATURA

1. PARKUS H. - Nieustanowisziesja temperaturnyje napriazhenija. Moskwa 1963 r.
2. TIMOSHENKO S., GOODIER J.N. - Teoria sprężystości. Warszawa, Arkady, 1962 r., II wyd.

КРИТЕРИИ ПОДБОРА СООТВЕТСТВУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА  
НА ЭЛЕМЕНТЫ ПОДВЕРГНУТЫЕ ВЛИЯНИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

## Резюме

В работе рассматривается влияние различных материалов на величину температурных напряжений, какие в них возникают при этих самых начальных и крайних условиях. Описание проблемы делается введением соответствующих коэффициентов, которые облагаются функциями величин определяющих тепловые и механические свойства материала.

## CHOICE CRITERIONS OF PROPER MATERIALS FOR CONSTRUCTION ELEMENTS INFLUENCED BY THERMAL STRESS

### S u m m a r y

The paper discusses the influence of various materials on the thermal stresses which appear in the same conditions. The problem is solved by introducing the special coefficients which depend on the values determining the thermal-mechanical properties of material.