

ĆWICZENIE 8

WYZNACZANIE ODPORNOŚCI MATERIAŁÓW NA WSTRZĄS CIEPLNY

1. CEL ĆWICZENIA

Zbadanie wytrzymałości mechanicznej materiałów ceramicznych poddanych wstrząsowi cieplnemu i określenie na tej podstawie wpływu naprężeń cieplnych II rodzaju na ich wytrzymałość mechaniczną.

2. WPROWADZENIE

2.1. Podstawy teoretyczne wykonania ćwiczenia. Rodzaje naprężeń cieplnych

Konsekwencją rozszerzalności cieplnej ciał stałych są powstające w nich naprężenia podczas zmiany temperatury. Podstawowe typy naprężeń cieplnych można prześledzić na dwóch następujących układach modelowych:

- 1) materiał izotropowy w skali mikro- i makroskopowej oraz polikrystaliczny z ziarnami anizotropowymi posiadający jednorodny rozkład temperatury;
- 2) materiał izotropowy w skali mikro- i makroskopowej oraz polikrystaliczny z ziarnami anizotropowymi posiadający niejednorodny rozkład temperatury.

W **przypadku 1)** naprężenia w materiale powstają stosownie do różnic rozszerzalności cieplnej kryształów lub faz. Wielkość tych naprężeń zależy od własności sprężystych i współczynników rozszerzalności cieplnej sąsiadujących składników. Takie naprężenia nazywają się **naprężeniami I rodzaju**. Ogólnie, gdy wartość powstałych naprężeń przekroczy wytrzymałość tworzywa, następuje jego pęknięcie. Naprężenia I rodzaju, występujące na granicach stykających się ziaren, mają charakter lokalny i maleją nagle w miarę oddalania się od granicy międzyziarnowej. Z uwagi na zlokalizowanie naprężeń wywołane przez nie spękania mają charakter lokalny. W konsekwencji nie następuje zniszczenie tworzywa, lecz tylko lokalne spękanie powodujące obniżenie jego wytrzymałości mechanicznej.

W **przypadku 2)** powstają naprężenia cieplne, gdyż niemożliwa jest swobodna rozszerzalność poszczególnych elementów objętości materiału, w obrębie którego istnieje zróżnicowanie temperatury. Swobodna ekspansja każdego z obszarów prowadziłaby do ich rozdzielenia. Ponieważ jednak są one „uwięzione” w objętości tego samego ciała, muszą powstać naprężenia określane mianem **naprężeń II rodzaju**. Prowadzą one, w przypadku przekroczenia wytrzymałości materiału, do jego spękania i zniszczenia.

Naprężenia II rodzaju mogą powstać zarówno w materiałach ceramicznych, jak i metalicznych, organicznych oraz kompozytowych. Z tymi naprężeniami spotykamy się zarówno w życiu codziennym (np. podczas wlewania wrzącej wody do chłodnej szklanki itd.), jak i w technice (np. podczas wlewania roztopionego metalu do znacznie chłodniejszej kadzi metalowej wyłożonej materiałem ogniotrwałym, w trakcie przebicia elektrycznego dielektryka itd.). W tych przypadkach wskazana jest znajomość odporności materiałów na wstrząs cieplny, bowiem pomoże nam to dobrać odpowiedni materiał dla danego zastosowania.

Wielkości fizyczne występujące przy określaniu wielkości naprężeń cieplnych II rodzaju

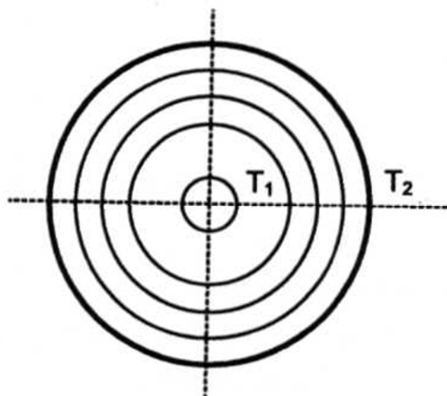
Temperatura w dowolnym punkcie ciała jest funkcją miejsca i czasu. Układ wartości temperatury w danej chwili i we wszystkich punktach rozpatrywanej przestrzeni nazywa się polem temperatury. Jeżeli temperatura zależy od czasu, to pole jest niestalone, a gdy nie zależy — ustalone. Odpowiednio do tego mówimy o niestalonym i ustalonym przewodzeniu ciepła.

Dla przeprowadzenia analizy naprężeń cieplnych II rodzaju obok znajomości pola temperatury konieczna jest znajomość własności termomechanicznych badanego tworzywa:

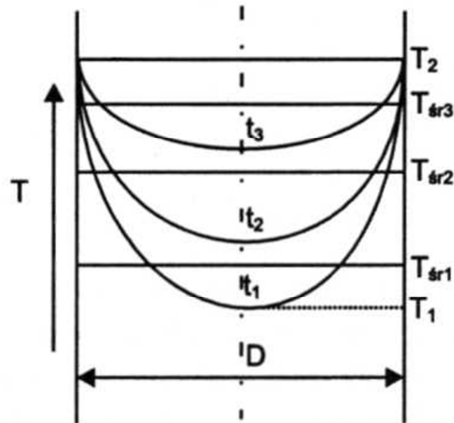
- współczynnika przewodzenia ciepła λ ,
- współczynnika wymiany ciepła h ,
- współczynnika rozszerzalności cieplnej α ,
- modułu sprężystości E ,
- współczynnika Poissona ν ,
- w obliczeniach zazwyczaj zakłada się, że wielkości: λ , ν , α , h są stałe w badanym zakresie temperatur, że tworzywo jest izotropowe i doskonale sprężyste do momentu zniszczenia. Pomimo tych uproszczeń rozwiązania analityczne są możliwe tylko dla prostych kształtów i warunków, podczas gdy dla kształtów i warunków bardziej złożonych stosuje się rozwiązania graficzne i numeryczne.

Naprężenia cieplne II rodzaju w cienkim walcu o przekroju kołowym

Jeżeli cienki walec kołowy, którego temperatura w całej objętości jest jednakowa T_1 umieścimy w płynie (cieczy lub gazie) o wyższej temperaturze T_2 (lub niższej), ciepło zacznie przenikać przez powierzchnię do wnętrza. Temperatura w określonym punkcie wewnętrznym walca uzależniona będzie od szybkości wnikania ciepła przez powierzchnię (charakteryzowana współczynnikiem h), od zdolności przewodnictwa cieplnego walca (charakteryzowanej współczynnikiem λ) oraz odległości tego punktu od powierzchni. Jeżeli pominąć wymianę ciepła przez wolne końce, która w istotny sposób zmienia rozkład temperatury tylko w ich pobliżu, to rozkład temperatury po czasie t jest osiowo symetryczny i nie zależy od współrzędnej w kierunku osiowym (Rys. 1). Układ sprowadza się zatem do dwuwymiarowego. Rozkład temperatury wzdłuż osi walca jest paraboliczny o średniej temperaturze T_{sr} (Rys. 2). T_{sr} oznacza tu temperaturę średnią kalorymetryczną, tzn. taką, jaką miałby rozpatrywany walec, gdyby ilość ciepła wymieniona z otoczeniem przyjmowana była z jednakową szybkością przez całą objętość walca.



Rys.1. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym walca w przypadku, gdy temperatura powierzchni $T_2 > T_1$ (temperatura wnętrza)



Rys.2. Rozkład temperatury wzdłuż osi walca dla różnych czasów ogrzewania t ($t_1 < t_2 < t_3$)

Te różnice temperatury w przekroju poprzecznym wywołują tendencję do rozszerzania się tworzywa w obszarze, w którym temperatura jest wyższa od T_{sr} , oraz kurczenia się w obszarze, gdzie temperatura jest niższa od T_{sr} . Zbiór punktów o temperaturze T_{sr} traktowany jest jako punkt odniesienia. W czasie $t > t_0$ izotermy w przekroju poprzecznym mają kształt kół współśrodkowych (Rys. 1). Ponieważ przekrój poprzeczny jest osiowo symetryczny, rozszerzalność liniowa (lub skurczliwość) jest taka sama we wszystkich kierunkach, a jej wartość wynosi

$$\epsilon_y = \epsilon_x = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

Tendencjom do zmiany przekroju przeciwstawiają się naprężenia, których wartości można obliczyć z prawa Hooke'a. Zgodnie z prawem Hooke'a dla płaskiego układu naprężeń otrzymamy:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y) \quad (2)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x) \quad (3)$$

Z równości $\epsilon_x = \epsilon_y$, wynika $\sigma_x = \sigma_y$ oraz po podstawieniu (1) do (2) i (3) otrzymamy

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu} \quad (4)$$

gdzie ΔT jest różnicą temperatur pomiędzy temperaturą rozpatrywanego punktu i T_{sr} .

Odporność tworzyw na wstrząs cieplny

Pod pojęciem tym rozumie się maksymalną różnicę temperatur, przy której maksymalne naprężenia cieplne są równe wytrzymałości tworzywa, czyli gdy:

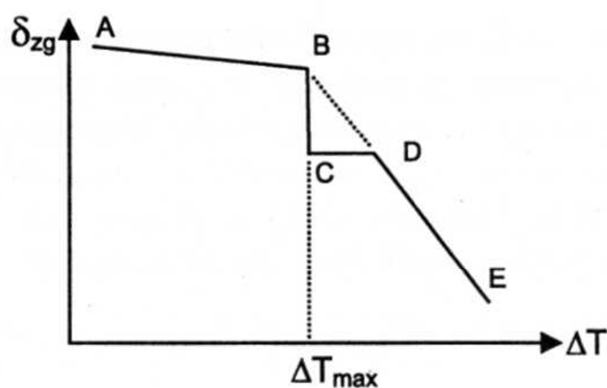
$$\Delta T = \Delta T_{\max} \quad \text{wówczas} \quad \sigma_{\max \text{ cieplne}} = \sigma_{\text{wytz. materiału}} \quad (5)$$

Dla rozpatrywanego walca otrzymamy

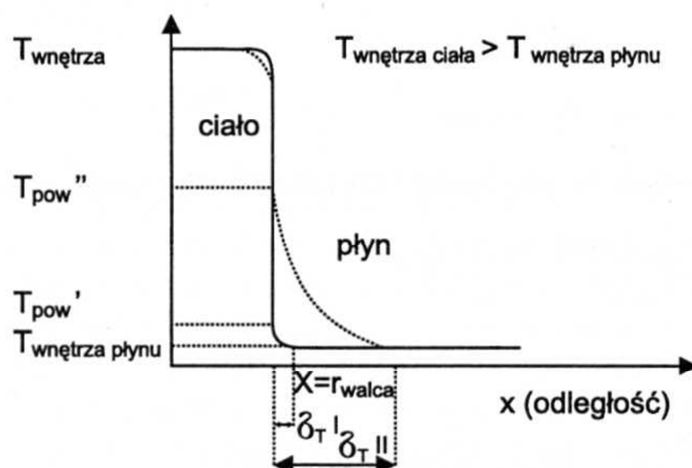
$$\Delta T_{\max}' = \frac{\sigma_{\text{wytr}} \cdot (1 - \nu)}{\alpha \cdot E} = R' \quad (6)$$

(dla cienkiego pręta można przyjąć $\nu = 0$).

Jeżeli wielkość $\Delta T > \Delta T_{\max}$, wówczas w zależności od wielkości ΔT w materiale pojawić się mogą mniejsze lub większe spękania. Spękania te obniżają wytrzymałość mechaniczną materiału. Badając więc zależność wytrzymałości materiału σ w funkcji ΔT , możemy określić ΔT_{\max} , po przekroczeniu której następuje mniej lub bardziej gwałtowne obniżenie tej wytrzymałości. Teoretyczną zależność $\sigma = f(\Delta T)$ przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Teoretyczna zależność wytrzymałości materiałów σ w funkcji wielkości ΔT : ABC — materiały b. kruche (np. szkło, niektóre monokryształy), ABCDE — materiały polikrystaliczne nieporowate, ABDE — materiały polikrystaliczne porowate.



Rys. 4. Powstawanie przyściennej warstwy termicznej w chłodzącym płynie na styku ciało-płyn

Wpływ na wielkość wyznaczanego ΔT_{\max} ma sposób wprowadzania próbki do płynu (wprowadzanie powolne lub gwałtowne). Podobnie jak w materiale, tak i w płynie powstaje różnica temperatur ($\Delta T_{\text{płynu}} = T_{\text{pow.ciała}} - T_{\text{wnętrza płynu}}$) w trakcie wymiany ciepła z materiałem.

Podczas chłodzenia ciała można to przedstawić następującym schematem (Rys. 4). Im grubsza jest warstwa δ_T , tym większa jest różnica

$$\Delta T_{\text{płynu}} \quad (\Delta T''_{\text{płynu}} = T''_{\text{pow}} - T_{\text{płynu}} > \Delta T'_{\text{płynu}} = T'_{\text{pow}} - T_{\text{płynu}}).$$

Transport ciepła w warstwie δ_T dokonuje się wyłącznie za pomocą przewodzenia. Ten sposób przenoszenia ciepła jest dużo wolniejszy od innych sposobów jego przenoszenia, które mogą wystąpić w płynach, jak **konwekcja swobodna** i **konwekcja wymuszona**. W przypadku konwekcji swobodnej dokonuje się jednocześnie transport ciepła i masy drogą dyfuzji wywołaną różną gęstością płynu zimnego i ciepłego (ten typ przenoszenia ciepła i masy występuje, gdy ciało i płyn są względem siebie statyczne). Najszybszym sposobem przenoszenia ciepła jest konwekcja wymuszona. Występuje ona wówczas, gdy ciało i płyn są względem siebie w ruchu. Wzrastająca szybkość wzajemnego przemieszczania ma istotny wpływ na zmniejszanie się grubości przyściennej warstwy termicznej δ_T , w której przepływ płynu jest laminarny (niezależnie od charakteru przepływu ponad tą warstwą — laminarnego czy turbulentnego).

Z powyższego wynika, że $\Delta T_{\text{max}} = T_{\text{wnętrza ciała}} - T_{\text{wnętrza płynu}}$ jest w rzeczywistości sumą dwóch gradientów

$$\Delta T_{\text{max}} = \Delta T_{\text{ciała}} + \Delta T_{\text{płynu}} \quad (7)$$

gdzie:

$$\Delta T_{\text{ciała}} = T_{\text{wnętrza ciała}} - T_{\text{pow. ciała}},$$

$$\Delta T_{\text{płynu}} = T_{\text{pow. ciała}} - T_{\text{wnętrza płynu}}.$$

Jeżeli $\Delta T_{\text{płynu}}$ jest małe, wówczas sumaryczny gradient ΔT_{max} można oszacować ze wzoru

$$\Delta T_{\text{max II}} = \frac{\sigma_{\text{wytrz}}(1-\nu)}{\alpha \cdot E} \cdot \frac{3,25}{\beta} = R'' \quad (8)$$

gdzie:

$$\frac{\sigma_{\text{wytrz}}(1-\nu)}{\alpha \cdot E} = R' = \Delta T_{\text{max I}} \text{ — jak we wzorze (6)}$$

β — liczba Biota;

$$\beta = \frac{r_m \cdot h}{\lambda} \quad (9)$$

r_m — charakterystyczny wymiar (w przypadku walca—jego promień).

Ze wzoru (7) wynika, że gdy $\Delta T_{\text{płynu}} \rightarrow 0$, wtedy czynnik $\frac{3,25}{\beta} = \frac{3,25 \cdot \lambda}{r_m \cdot h} \rightarrow 1$ i z równania (8)

otrzymana się równanie (6)

Biorąc powyższe pod uwagę, aparatura do wywołania w materiałach różnicy ΔT została tak skonstruowana (wysokość spadania ogrzanej próbki do chłodzącej wody tak dobrano, aby $\Delta T_{\text{płynu}} = 0$), że występujący w równaniu (8) czynnik $\frac{3,25}{\beta}$ w przypadku walca wynosi 1 i dlatego do obliczeń teoretycznych ΔT_{max} w przypadku próbek o kształcie walca można stosować wzór (6).

3. WYKONANIE ĆWICZENIA

Zasada pomiaru

Eksperyment polega na wrzucaniu do zimnej wody próbek o coraz wyższej temperaturze i wyznaczeniu maksymalnej wartości różnicy temperatury $\Delta T_{\text{max}} = T_{\text{ciała}} - T_{\text{płynu}}$ powstałej w próbce (o określonym kształcie i wymiarach) w wyniku gwałtownego chłodzenia, które powoduje drastyczne obniżenie się wytrzymałości mechanicznej materiału. Wielkość ΔT_{max} wyznacza się w oparciu o zależność wytrzymałości badanego materiału od różnicy temperatury między próbką i medium chłodzącym (Rys. 3).

W przypadku przezroczystych próbek szklanych wielkość tę można w przybliżeniu oszacować przez ustalenie wielkości ΔT_{max} , przy której stają się widoczne spękania.

Ze wzoru $\Delta T_{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{wytr}} \cdot (1 - \nu)}{\alpha \cdot E} = R'$ (6) oblicza się różnicę temperatury próbki i płynu chłodzącego, co pozwala zaplanować eksperyment.

Wystarczy bowiem ogrzewać próbki w niewielkim zakresie temperatur powyżej i poniżej

$T_{\text{cieczy}} + \Delta T_{\text{max(teoret)}}$.

Aparatura, materiały i próbki do wykonania ćwiczenia

Zestaw laboratoryjny do badania odporności na wstrząs cieplny składa się z:

- rurowego pieca oporowego, zawieszono na obrotowym statywie — komorę grzewczą pieca stanowi rura jednostronnie zasklepią, którą zamyka się dopasowanym korkiem ceramicznym; próbki umieszcza się na dnie rury, w którym zamontowana jest termopara pomiarowa i jednocześnie sterująca piecem;
- zlewki z dnem wyłożonym cieką gąbką, napełnionej wodą w ilości około 0,5 dcm³;
- laboratoryjnego termometru do pomiaru temperatury wody w zlewce;
- szkiełka zegarkowego;
- pojemnika na próbki;
- suszarki;
- lupy;
- papieru ściernego;
- suwmiarki;

- pincety;
- maszyny wytrzymałościowej;
- prętów szklanych lub ceramicznych o znanych wartościach wytrzymałości na zginanie (σ_{zg}), rozciąganie (σ_{rozcz}), modułu sprężystości E i współczynnika rozszerzalności cieplnej α .

3.1. Opis wykonania ćwiczenia

1. Obliczyć ΔT_{\max} ze wzoru $\Delta T_{\max}' = \frac{\sigma_{\text{wytz}} \cdot (1 - \nu)}{\alpha \cdot E} = R'$ Dla cienkich próbek przyjąć $\nu = 0$.

2. Ustalić następujące temperatury pomiaru:

- a) temperatura otoczenia,
- b) $\Delta T_{\max} + T_{\text{wody}} - 40^{\circ}\text{C}$,
- c) $\Delta T_{\max} + T_{\text{wody}} - 20^{\circ}\text{C}$,
- d) $\Delta T_{\max} + T_{\text{wody}}$,
- f) $\Delta T_{\max} + T_{\text{wody}} + 20^{\circ}\text{C}$,
- g) $\Delta T_{\max} + T_{\text{wody}} + 40^{\circ}\text{C}$.

3. Zapoznać się z instrukcją obsługi pieca.

4. Trzy próbki badanego materiału umieścić na dnie pionowo ustawionego piecyka rurowego, zamknąć komorę grzejną korkiem ceramicznym i nastawić regulator temperatury na wartość ustaloną w punkcie 2b. Zgodnie z instrukcją obsługi pieca ogrzać badane próbki do zadanej temperatury i przetrzymać je w tej temperaturze przez 15 minut.

5. Pod piec podłożyć pojemnik z wodą, wyjąć korek ceramiczny zamykający komorę grzejną i za pomocą pokrętki obrócić komorę grzejną tak, aby ogrzane próbki wpadły do pojemnika z wodą.

6. Próbki po ostudzeniu umieścić na szkiełku zegarkowym i suszyć w suszarce w temperaturze 110°C przez 10 minut.

7. Zmierzyć suwmiarką średnicę każdej próbki 3-krotnie i wartość średnią wpisać do tablicy wyników pomiarów.

8. Zapoznać się z instrukcją obsługi maszyny wytrzymałościowej do pomiaru wytrzymałości na zginanie.

9. Dla próbek wyjętych z suszarki wykonać pomiary wytrzymałości na zginanie. Zmierzoną wartość siły łamiącej zapisać w tabeli wyników pomiarów.

10. W analogiczny sposób, jak w punktach 4-9 wykonać pomiary kolejno dla ustalonych w punktach 2c-2g warunków temperaturowych.

11. Wykonać pomiary wytrzymałości na zginanie próbek zerowych (punkt 2a).

12.3.2. Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów umieścić w poniższej tabeli.

Wyniki pomiarów				Wyniki obliczeń	
Temperatura pomiaru	Nr próbki	Średnia średnica próbki d	Wartość siły łamiącej P	Wytrzymałość na zginanie σ_{zg}	Średnia wytrzymałość na zginanie σ_{zg}
[°C]		[mm]	[N]	[MPa]	[MPa]
a)	1				
	2				
	3				
b)	1				
	2				
	3				
c)	1				
	2				
	3				
d)	1				
	2				
	3				
e)	1				
	2				
	3				
f)	1				
	2				
	3				
g)	1				
	2				
	3				

3.3. Opracowanie wyników pomiarów

— Obliczyć wytrzymałość próbek na zginanie wg wzoru

$$\sigma_{zg} = \frac{8 \cdot P \cdot l}{\pi \cdot d^3},$$

Gdzie:

P — wartość siły łamiącej [N],

l — rozstaw podpór,

d — średnica badanej próbki.

— Obliczyć średnią wytrzymałość na zginanie dla poszczególnych temperatur pomiaru.

— Wyniki obliczeń wpisać do tabeli wyników pomiarów.

— Sporządzić wykres $\sigma_{zg} = f(\Delta T)$

— Porównać wartości ΔT_{\max} obliczoną z wzoru (6) z wartością $\Delta T_{\max \text{ dosw}}$ odczytaną z wykresu

$\sigma_{zg} = f(\Delta T)$

Oszacowanie błędów pomiarów

Zastanów się nad błędami systematycznymi pomiarów (związanymi np. z dokładnością przyrządów pomiarowych) i ich ewentualnym wpływem na rozbieżność uzyskanych wyników.

Wymagana znajomość następujących zagadnień:

- teoretyczna i rzeczywista wytrzymałość mechaniczna materiałów,
- naprężenia cieplne, ich rodzaje oraz wpływ ich obecności na wytrzymałość mechaniczną materiałów,
- wyjaśnić pojęcie „odporność cieplna materiałów na wstrząs termiczny” oraz wyjaśnić, jakie właściwości materiałów (i dlaczego) mają wpływ na tę odporność,
- wyjaśnić wpływ warunków chłodzenia (ogrzewania) próbek materiałów na wartość doświadczalnie wyznaczanej odporności na wstrząs cieplny.

Literatura

- [1] Hasselman D. P. H.: *Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramic*. J. Amer. Ceram. Soc, 52 (1969), str. 600-604
- [2] Hobler T.: *Ruch ciepła i wymienniki*. Warszawa, WNT 1982, str. 51-67 i 127-197
- [3] Kwatera A.: *Modelowanie chemicznego procesu osadzania cienkich warstw z fazy gazowej w warunkach kontrolowanych dyfuzją masy do podłoża*. Zeszyty Naukowe AGH, Ceramika, 61 (1991), str. 26-48
- [4] Pampuch R.: *Podstawy inżynierii materiałów ceramicznych*. Warszawa, PWN 1971, str. 214-263
- [5] Pampuch R.: *Budowa i właściwości materiałów ceramicznych*. Kraków, Wyd. AGH 1995, str. 139-158

Instrukcję opracowano na podstawie: „Laboratorium z nauki o materiałach” pod red. Jerzego Lisa, Wyd.2, Kraków 2003