9. Materiały w wysokich temperaturach

Większość właściwości materiałów ulega znaczącym zmianom w podwyższonych temperaturach. Charakter tych zmian może być różnoraki - możemy obserwować zmiany liniowe (np. gęstość, moduł Younga), ale także np. eksponencjalne (tempo dyfuzji, korozji wysokotemperaturowej). Szczególnie istotne w wysokich temperaturach staje się nowe, do tej pory nie omawiane przez nas zjawisko - pełzanie.

9.1. Właściwości materiału a temperatura

Dla każdego materiału możemy scharakteryzować minimalną i maksymalną temperaturę pracy. Temperatura minimalna zazwyczaj związana jest z kruchością materiałów w niskich temperaturach i jest parametrem empirycznym. Szczególnym przypadkiem są elastomery, w których minimalna temperatura pracy zazwyczaj wynosi około 0.8 T_g (temperatury zeszklenia). Maksymalna temperatura pracy jest również parametrem zgrubnym - charakteryzuje przybliżoną temperaturę, w której materiał zachowuje swoje właściwości mechaniczne na "przyzwoitym" poziomie, przy ograniczonym tempie korozji, braku przemian chemicznych itp.

9.1.1. Zależności temperaturowe

Część właściwości zależy od temperatury w sposób liniowy. Ogólny wzór takich funkcji ma następującą postać:

$$P = P_0\left(1+\beta\frac{T}{T_m}\right) \tag{9.1}$$

gdzie P - dana właściwość, P_0 - jej wartość w niskiej temperaturze, β - współczynnik kierunkowy prostej. Przykładami wielkości o tego typu przebiegu temperaturowym mogą być gęstość ($\beta \approx$ -0.06), moduł Younga ($\beta \approx$ -0.5), współczynnik załamania światła ($\beta \approx$ -0.06) czy, w przypadku metali, przewodnictwo elektryczne ($\beta \approx 2$).

Przykładem zjawiska niepodlegającego prawu liniowemu, a które jest niezwykle istotne pod kątem bieżących zajęć, jest dyfuzja. Temperaturowa zależność współczynnika dyfuzji D może zostać opisana z wykorzystaniem tzw. relacji Arrheniusa, typowej dla procesów aktywowanych termicznie:

$$D = D_0\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{9.2}$$

gdzie: D_0 - współczynnik przedeksponencjalny, R - stała gazowa, E_a - energia aktywacji. O zjawisku dyfuzji można by było opowiadać w ramach osobnego przedmiotu (...), nas jednak będzie interesowało przede wszystkim jako źródło innego zjawiska - pełzania.

9.1.2. Pełzanie

W dotychczas rozważanych przez nas zakresach niskich i umiarkowanych temperatur, odkształcenie materiałów zależało tylko i wyłącznie od naprężenia. W przypadku zakresu wysokich temperatur, dodatkowo pojawia się zależność od czasu. Nawet stosunkowo niewielkie naprężenia, które nie byłyby w stanie w temperaturze pokojowej odkształcić materiału w sposób trwały, w wysokich temperaturach mogą spowodować pogłębiające się z czasem odkształcenie materiału, prowadzące do jego zniszczenia. I to właśnie jest istotą zjawiska pełzania.

Badanie zjawiska pełzania jest stosunkowo proste - obciążony materiał umieszczany jest w piecu o określonej temperaturze, a jego odkształcenie jest mierzone w funkcji czasu. Przykładowa krzywa pomiarowa przedstawiona została poniżej:

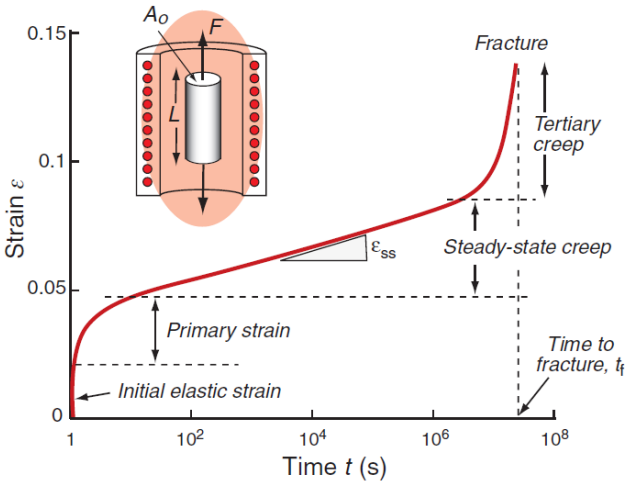


Fig. 9.1. Przykładowa krzywa pełzania z wyszczególnionymi poszczególnymi etapami procesu.

Pierwsze dwa etapy (*initial elastic* oraz *primary strain*) zachodzą w bardzo krótkim okresie czasu i są stosunkowo mało interesujące. Następny etap (*steady-state creep* - równowagowe pełzanie), jest już jednak dużo bardziej istotny, jako że występuję przez przeważającą większość czasu życia próbki. W tym zakresie tempo odkształcenia $\dot{\varepsilon}_{ss}$ można powiązać z naprężeniem σ poprzez zależność:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = B\sigma^n \tag{9.3}$$

Wartość wykładnika *n* będzie zależała od rozpatrywanego zakresu naprężeń. Dla dużych naprężeń zawiera się on w przedziale 3 do 8 (tzw. *power-law creep*), dla mniejszych wynosi 1 (tzw. płynięcie dyfuzyjne - *diffusional flow*). Co istotne, zależność pomiędzy $\dot{\varepsilon}_{ss}$ a temperaturą ma charakter relacji Arrheniusa:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = C\exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \tag{9.4}$$

gdzie Q_c jest energią aktywacji pełzania. Łącząc ze sobą równania (9.3) i (9.4) otrzymujemy:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = C'\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) = \dot{\varepsilon}_0\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \tag{9.5}$$

gdzie: $\dot{\varepsilon}_0$, σ_0, n, Q_c - stałe. Mając te 4 wielkości, możliwe jest policzenia tempa odkształcania dla dowolnych naprężeń i temperatur.

W trakcie pełzania materiał będzie ulegał ciągłemu niszczeniu - wszystkie szczeliny i pustki będą stopniowo się rozrastać i łączyć, zmniejszając przekrój próbki i prowadząc do koncentracji naprężeń. Oczywiście, będzie się to odbijało na żywotności materiału. Zależność tą można wyrazić za pomocą krzywych naprężenie-pękniecie (*stress - rapture curve*):

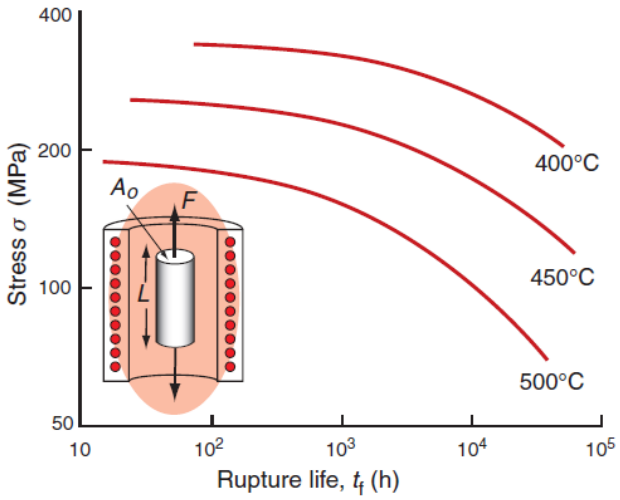
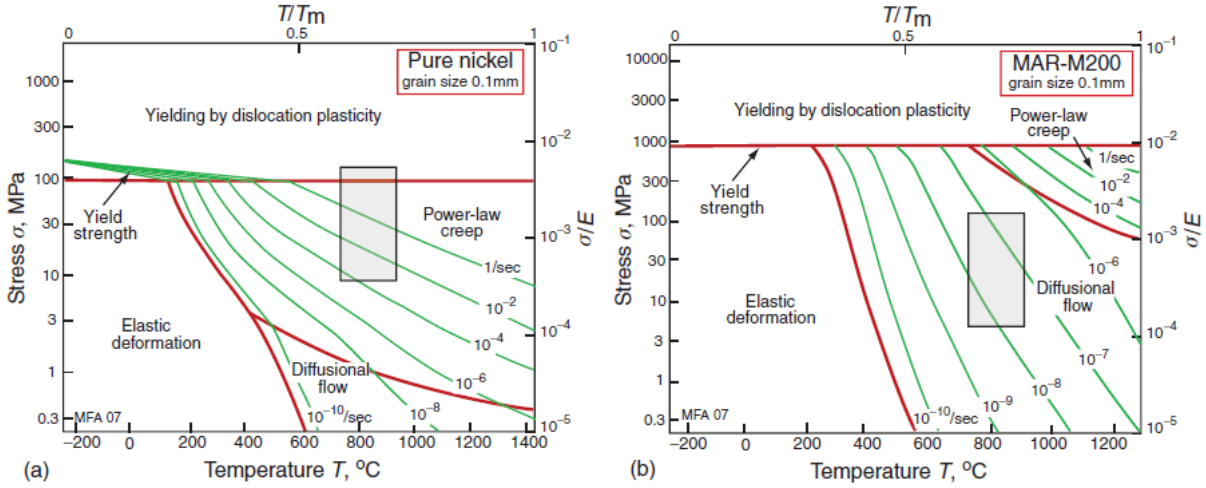


Fig. 9.2. Przykładowe krzywe naprężenie - pęknięcie. Obie osie są logarytmiczne.

Patrząc na to jak mocny może być wpływ zjawiska pełzania na żywotność próbki, pojawia się pytanie - od którego momentu musimy zacząć je uwzględniać? Dla metali temperatura początku pełzania wynosi około $T = 0.35T_m$, podczas gdy dla ceramiki $T = 0.45T_m$. Należy tutaj jednak zauważyć, że w przypadku metali odpowiednie zaprojektowanie struktury fazowej materiału może znacząco podnieść tą temperaturę. Zobrazować można to za pomocą mapy naprężenia w funkcji temperatury. Tego typu wykres umożliwia zidentyfikowania dominującego mechanizmu pełzania, w zależności od tempa odkształcania. Na poniższym rysunku przedstawione zostały mapy dla czystego niklu oraz superstopu MAR-M200 na jego bazie:



Rys. 9.3. Mapa naprężenia w funkcji temperatury dla a) czystego niklu b) superstopu MAR-M200. Dla tego samego zakresu naprężeń (szary prostokąt), stosunek szybkości odkształcania wynosi około 10^6 na korzyść superstopu.

Jak można zauważyć, oprócz niemal 10-krotnie wyższej zdolności do przenoszenia naprężeń, superstop cechuje się znacznie szerszym zakresem, dla którego pełzanie ma charakter czysto dyfuzyjny. Oznacza to, że może przenosić takie same i większe naprężenie co nikiel, odkształcając się od niego znacznie wolniej. O ile wolniej? Gdy porównamy podobny zakres naprężeń 10-100 MPa możemy zauważyć, że super stop będzie odkształcał się 10^6 razy wolniej niż nikiel (!). Trudno zatem się dziwić, dlaczego superstopy cieszą się tak wielką popularnością w przemyśle lotniczym, gdzie odporność na działanie wysokich temperatur ma kluczowe znaczenie.