

# Miary uszkodzenia w badaniach pełzania materiałów konstrukcyjnych

## Damage measures in creep investigations of engineering materials

Proces kumulacji uszkodzeń materiałów konstrukcyjnych pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych jest wieloetapowy. Zaczyna się od inicjacji wad struktury materiału, w następnej fazie obserwuje się ich stopniowy rozwój i łączenie się mikropęknięć, aż do powstania dominującego pęknięcia prowadzącego nieuchronnie do zniszczenia elementu konstrukcyjnego. Podział na trzy fazy rozwoju uszkodzeń jest umowny i zwykle nie jest dobrze zdefiniowany. Proces uszkodzeń jest różnie postrzegany przez specjalistów z zakresu inżynierii materiałowej, mechaniki ciał odkształcalnych, czy eksploatacji maszyn i urządzeń przemysłowych. Poszczególne zakresy procesu uszkodzeń są rozpatrywane w różnych gałęziach mechaniki. Okres pierwszy i obserwację zmian strukturalnych stanowią domenę inżynierii materiałowej, zmęczenie nisko i wysoko-cyklowe to odrębne grupy problemów okresu stabilnego wzrostu i propagacji pęknięcia, natomiast mechanika pęknięcia dotyczy trzeciego okresu procesu uszkodzeń.

Jednym z ważniejszych z technicznego punktu widzenia procesów rozwoju uszkodzeń jest pełzanie materiałów konstrukcyjnych pod wpływem stałych, ale długotrwale działających obciążeń [6-9, 11]. Zjawisko pełzania obserwuje się dla wszystkich materiałów, a jego intensywność zależy od zakresu obciążeń i temperatury. Pełzanie materiałów jest szczególnie istotne w przemyśle energetycznym dla instalacji ciśnieniowych pracujących w podwyższonych temperaturach. Ciągłe powiększanie nominalnych ciśnień i temperatur czynnika roboczego urządzeń energetycznych i doskonalenie materiałów konstrukcyjnych stosowanych w tych ekstremalnych warunkach pracy są główną motywacją znaczenia i rozwoju badań doświadczalnych procesu pełzania.

### Mechanizmy uszkodzenia i zniszczenia w procesie pełzania oraz ich miary

Początkowe koncepcje opisu uszkodzenia w trakcie pełzania bazowały na skalarnym parametrze uszkodzenia zaproponowanym przez Kachanowa [7] w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia.

Do opisu uszkodzenia materiałów poddawanych pełzaniu przy poziomach naprężenia wyraźnie niższych od granicy plastyczności zaproponował on pominięcie bieżącego przewężenia

przekroju poprzecznego próbki oraz przyjęcie założenia, że obciążenie przenoszone jest jedynie przez efektywnie pracującą część pola przekroju poprzecznego próbki, które stanowi różnicę między początkowym polem przekroju oraz polem powierzchni uszkodzeń. Miarę tą definiuje się związkiem

$$\psi = \frac{A}{A_0}, \quad 1 \geq \psi \geq 0, \quad (1)$$

gdzie:

$A$  – efektywne pole przekroju,

$A_0$  – początkowe pole przekroju.

Przybiera ona wartość 1 w stanie początkowym bez defektów oraz 0 w momencie zlokalizowanego zniszczenia materiału.

Zamiast parametru (1) wygodniej jest operować jego dopełnieniem, które reprezentuje parametr uszkodzenia wprowadzony przez Rabotnova [11] w postaci:

$$\omega = 1 - \psi = \frac{A_0 - A}{A_0}, \quad 0 \leq \omega \leq 1. \quad (2)$$

Tak zdefiniowany parametr ma bezpośrednią interpretację fizyczną, ponieważ oznacza powierzchnię zajmowaną w danej chwili przez defekty, odniesioną do pola przekroju początkowego bez uszkodzeń. Wykorzystując parametr uszkodzenia Rabotnova [11] rozwinął jednowymiarową teorię Kachanowa [7] proponując prawo ewolucji uszkodzenia w następującej postaci:

$$\frac{\dot{\omega}}{\dot{\omega}_0} = \frac{1}{(1-\omega)^\eta} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\nu, \quad (3)$$

gdzie  $\nu$ ,  $\eta$ ,  $\dot{\epsilon}_0$ ,  $\dot{\omega}_0$ ,  $\sigma_0$  są stałymi materiałowymi. Propozycje Kachanowa i Rabotnova [7, 11] stały się inspiracją do budowy modeli uszkodzenia i są uważane za początek kontynuowanej mechaniki uszkodzeń, która jest w dalszym ciągu rozwijana zarówno dla jednoosiowych, jak i wieloosiowych stanów naprężenia.

Początkowo przy modelowaniu konstytutywnym zakładano, że proces uszkodzenia zachodzi przy udziale jednego mechanizmu. Tymczasem prace doświadczalne wykonywane na poziomie mikrostrukturalnym dowiodły, że uszkodzenie rozwija się w materiałach przy udziale co najmniej kilku mechanizmów. Oczywiście w zależności od warunków eksperymentu mogą

<sup>1)</sup> Zbigniew L. Kowalewski, profesor w IPPT PAN w Warszawie, kierownik Zakładu Wytrzymałości Materiałów, e-mail: zkowalew@ippt.gov.pl

zaistnieć takie sytuacje, że za uszkodzenie będzie odpowiedzialny głównie jeden mechanizm uszkodzenia. Skutkiem wspomnianych prac doświadczalnych było powstanie nowego kierunku przy formułowaniu równań konstytutywnych pełzania, odzwierciedlających fizykę osłabienia materiałów mającego miejsce w trzecim etapie procesu, a mianowicie wprowadzanie więcej niż jednej zmiennej uszkodzenia, którym przypisuje się odpowiedzialność za konkretny mechanizm osłabienia.

Othman, Hayhurst i Dyson [10] zaproponowali model konstytutywny z dwiema zmiennymi uszkodzenia dla superstopów niklu. Zgodnie z ich koncepcją dla stopów niklowych zasadniczym mechanizmem sterującym procesem osłabienia w czasie pełzania jest multiplikacja dyslokacji oraz ich ruch (rys. 1).

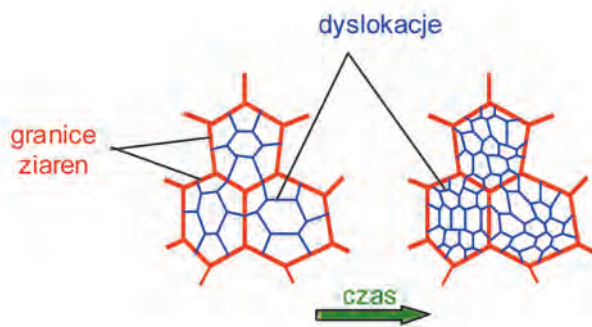
Dyson [1-4] traktując prędkość dyslokacji wokół cząstek  $\gamma'$  jako unoszenie dyfuzyjne pokazał, że uszkodzenie w drugim i trzecim okresie pełzania w stopach niklowych przy różnych jednoosiowych obciążeniach można opisać następującym związkiem:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = C \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (4)$$

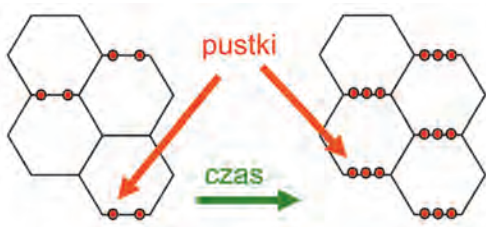
gdzie  $\omega_1$  jest parametrem uszkodzenia zdefiniowanym zależnością

$$\omega_1 = 1 - \frac{\rho_i}{\rho} \quad (5)$$

Parametr  $C$  odzwierciedla skłonność materiału do przechodzenia w trzecie stadium pełzania. Jest on odwrotnie proporcjonalny do początkowej gęstości ruchomych dyslokacji. Omawiany mechanizm uszkodzenia obserwowany przy pełzaniu powoduje osłabienie materiału prowadzące do wzrostu prędkości pełzania, natomiast nie określa jego zniszczenia.



Rys. 1. Mechanizm uszkodzenia występujący w procesie pełzania polegający na wzroście liczby dyslokacji (multiplication of dislocations)



Rys. 2. Mechanizm uszkodzenia występujący w procesie pełzania polegający na międzykrystalicznym zarodkowaniu pustek (creep constrained grain boundary cavitation)

Jako drugi mechanizm odpowiedzialny za osłabienie stopów niklowych autorzy [10] wymieniają międzykrystaliczne zarodkowanie pustek (creep constrained grain boundary cavitation) i ich wzrost, co schematycznie pokazano na rysunku 2.

W rozważanym przypadku (stop niklowy) występowanie tego procesu jest ściśle związane ze składem stopu oraz z procesem technologicznym jego otrzymania. Mechanizm zarodkowania i wzrostu pustek na granicach ziaren jest procesem kinetycznym i stąd jego wpływ na odporność materiału przy pełzaniu oraz typ zniszczenia zależy od prędkości zarodkowania i prędkości wzrostu. W przypadku, gdy obie prędkości są duże, wówczas występuje silne sprzężenie pomiędzy powstawaniem pustek a prędkością pełzania. Prowadzi to do nagłego pojawienia się trzeciego stadium pełzania i osiągnięcia małych wydłużeń próbek przy zniszczeniu. Mechanizm międzykrystalicznego zarodkowania wymuszany procesem pełzania może być sterowany zarówno przez sam proces zarodkowania pustek, jak i przez proces ich wzrostu.

Ewolucję zmiennej uszkodzenia odzwierciedlającej taki mechanizm można zdefiniować w następującej postaci

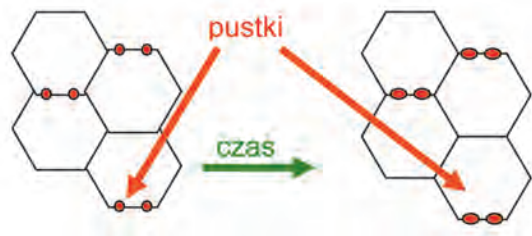
$$\frac{d\omega_2}{dt} = \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_e} \right)^v \frac{\dot{\varepsilon}_e}{3\varepsilon_u} \quad (6)$$

gdzie:

- $\varepsilon_u$  – wartość odkształcenia przy zniszczeniu podczas jednoosiowego rozciągania,
- $(\sigma_1/\sigma_e)^v$  – jest parametrem uwzględniającym rodzaj stanu naprężenia.

Przedstawiony przykład zmiennej uszkodzenia opisującej mechanizm zarodkowania pustek odpowiada założeniu, że proces jest sterowany przez prędkość zarodkowania, która jest liniowo zależna od prędkości odkształcenia. Jak widać, zmienna ta jest dodatkowo proporcjonalna do parametru uwzględniającego typ stanu naprężenia  $(\sigma_1/\sigma_e)^v$ . Należy w tym miejscu podkreślić, że w literaturze brak jest danych dających podstawy do wiarygodnej oceny wpływu stanu naprężenia na proces zarodkowania pustek. Propozycja parametru  $(\sigma_1/\sigma_e)^v$  uwzględniającego ten wpływ pochodzi z rozważań Dysona i McLeana [3].

Trzecim z mechanizmów odpowiedzialnych za uszkodzenie materiałów podczas pełzania jest mechanizm ciągłego wzrostu pustek (continuum cavity growth), który podobnie jak mechanizm międzykrystalicznego zarodkowania występuje przy pełzaniu wysoko-temperaturowym (rys. 3).



Rys. 3. Mechanizm uszkodzenia występujący w procesie pełzania polegający na wzroście pustek na granicach ziaren (continuum cavity growth)

Różnice w zniszczeniu wywoływanym przez oba z wymienionych mechanizmów uszkodzenia w wysokich temperaturach zostały zaobserwowane przez grupę Dysona [1, 4]. Podobnie jak mechanizm międzykrystalicznego zarodkowania także i mechanizm ciągłego wzrostu pustek dotyczy mikropęknięć pojawiających się na granicach ziaren. Pustki mogą wzrastać na skutek dyfuzji atomów z granic ziaren lub w wyniku plastycznego płynięcia materiału, który je otacza i tworzenie się zlepek łuk powstających na skutek przecięć dyslokacji pracujących w różnych płaszczyznach poślizgu. Może to być również kombinacja wspomnianych mechanizmów wzrostu pustek. Na omawiany proces uszkodzenia głównie wpływają procesy dyfuzyjne takie, jak dyfuzja międzykrystaliczna i dyfuzja powierzchniowa. Jeżeli mechanizm wzrostu pustki jest sterowany przez dyfuzję międzykrystaliczną atomy dyfundują na zewnątrz wzrastających pustek i osadzają się na granicach ziaren. Z kolei proces dyfuzji powierzchniowej wpływa na kształt pustek. Jeżeli dyfuzja powierzchniowa jest gwałtowna, wówczas materia ulega szybkiemu rozłożeniu wewnątrz pustki zapewniając jej w przybliżeniu sferyczny kształt.

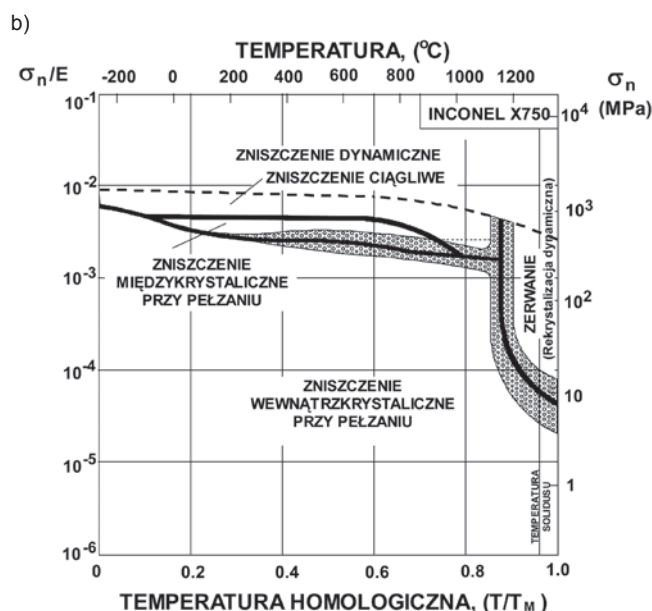
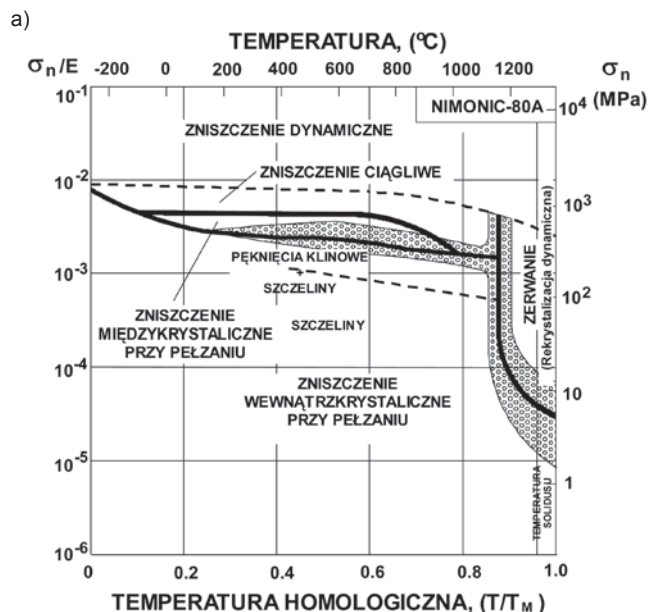
W wyniku rozwoju uszkodzeń polegającym w końcowej fazie na łączeniu się pustek w jedną lub kilka szczelin dominujących następuje zniszczenie elementu konstrukcyjnego, przy czym charakter takiego zniszczenia może być wewnątrzkrystaliczny lub międzykrystaliczny. Pęknięcie wewnątrzkrystaliczne w czasie pełzania występuje najczęściej dla materiałów o dużej ciągliwości poddanych wysokiemu poziomowi naprężenia. Z kolei pęknięcie międzykrystaliczne wskutek pełzania najczęściej pojawia się dla materiałów kruchych testowanych przy stosunkowo niskim poziomie naprężenia. Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, że zaistnienie konkretnego typu zniszczenia uzależnione jest od warunków próby pełzania, tj. temperatury i poziomu naprężenia. A zatem niezależnie od rodzaju materiału, kruchy lub ciągliwy, można dla danego materiału znaleźć warunki, w których otrzymamy zniszczenie wewnątrzkrystaliczne lub międzykrystaliczne.

Podobnie, jak w przypadku deformacyjnych mechanizmów procesu pełzania także i różne warianty zniszczenia zostały ujęte w postaci map obrazujących obszary ich dominacji w zależności od temperatury oraz poziomu naprężenia. Na rysunku 4 pokazano mapy spodziewanych rodzajów zniszczenia dla dwóch wybranych materiałów przystosowanych do pracy w warunkach znacznie podwyższonej temperatury [5].

Mapy mechanizmów zniszczenia stanowią diagramy, w których na osi pionowej odkładane są wartości naprężenia rozciągającego, a na osi poziomej wartości temperatury. Dodatkowo wprowadza się skalę bezwymiarową dla obu osi, przy czym wielkością odniesienia dla naprężenia jest moduł Younga, natomiast dla temperatury – temperatura topnienia rozpatrywanego materiału wyrażona w stopniach Kelvina. Autorzy map wprowadzili klasyfikację mikromechanizmów zniszczenia, w której wyróżniają dwie szerokie klasy zniszczenia: kruche i ciągliwe.

Dla niskich temperatur  $T < 0,3 T_M$  rozpatrują następujące mechanizmy zniszczenia:

- kruche zniszczenie wewnątrzkrystaliczne,
- kruche zniszczenie międzykrystaliczne,
- zniszczenie przez wzrost szczelin wskutek plastycznego płynięcia,
- zerwanie wskutek efektu szybkowania,
- zerwanie wskutek ścicia.

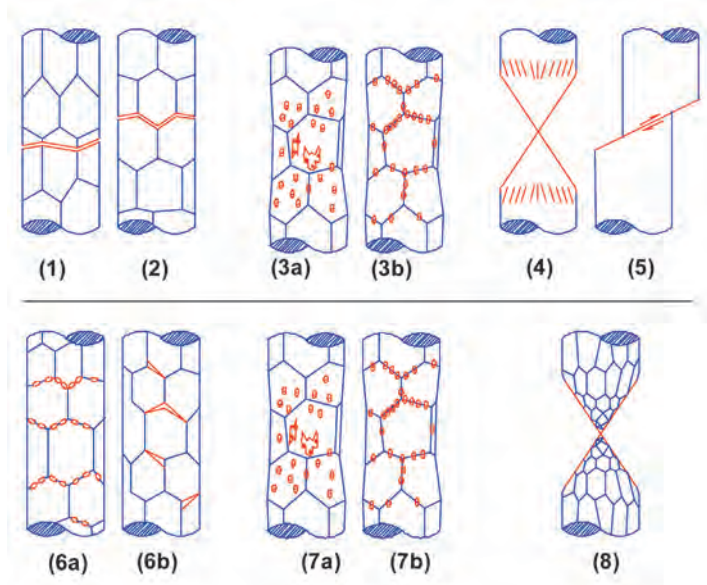


Rys. 4. Mapy mechanizmów zniszczenia [7] dla: a) nimonicu 80°, b) inconelu X-750

Z kolei dla wyższych temperatur  $T < 0,3 T_M$  identyfikują:

- międzykrystaliczne zniszczenie przy pełzaniu wskutek rozwoju pustek na granicach ziaren lub powstawania pęknięć klinowych,
- zniszczenie wskutek wzrostu szczelin wymuszonym przez mechanizm pełzania opisywany prawem potęgowym,
- pęknięcie wskutek dynamicznego zdrowienia lub rekrytalizacji.

Na rysunku 5 przedstawiono graficzną ilustrację wyżej wspomnianych mechanizmów. Szerszy opis tych mechanizmów zawiera książka Frosta i Ashby'ego [5]. Przedstawiona klasyfikacja oczywiście nie wyczerpuje całego bogactwa mechanizmów zniszczenia materiałów metalicznych. Identyfikuje ona jednak mechanizmy najczęściej odpowiedzialne za ich zniszczenie.



Rys. 5. Mechanizmy zniszczenia materiałów metalicznych [5]: zniszczenie kruche wewnątrzkrystaliczne; zniszczenie kruche międzykrystaliczne; zniszczenie wewnątrzkrystaliczne (3a) i międzykrystaliczne (3b) wskutek plastycznego wzrostu pustek; zerwanie wskutek efektu szybkowania; zerwanie wskutek ścicia; międzykrystaliczne zniszczenie przy pełzaniu wskutek rozwoju pustek na granicach ziaren (6a) lub powstawania pęknięć klinowych (6b); zniszczenie wewnątrzkrystaliczne (7a) i międzykrystaliczne (7b) wskutek wzrostu szczelin wymuszonym przez mechanizm pełzania opisywany prawem potęgowym; pęknięcie wskutek dynamicznego zdrowienia lub rekrytalizacji (8)

Schematy przedstawione w górnej części rysunku 5 ilustrują mechanizmy zachodzące poniżej temperatury  $0,3 T_M$ , w dolnej natomiast powyżej  $0,3 T_M$ , po lewej stronie w obu klasach pokazane są mechanizmy zniszczenia kruchego, po prawej – ciągliwego, w środku schematy mieszane)

## Podsumowanie

Badania pełzania ze względu na bogactwo stale pojawiających się nowych zagadnień i dużą ich złożoność są bez wątpienia dziedziną wymagającą integracji środowiska mechaniki, inżynierii materiałowej i specjalistów z zakresu różnych technik nieniszczących, w tym specjalistów zajmujących się optycznymi metodami polowych pomiarów składowych odkształcenia. W zakresie tej tematyki znajdują się ciągle obszary wiedzy nie do końca rozpoznanej, szczególnie w odniesieniu do pojawiających się nowych materiałów, jak na przykład różnego rodzaju kompozytów o matrycy metalowej lub ceramicznej, czy też materiałów gradientowych, stopów z pamięcią kształtu i wielu innych oraz ciągle jeszcze otwartą sprawą. definicji miary uszkodzenia. Zwłaszcza problematyka związana z degradacją właściwości mechanicznych pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych wywołujących pełzanie, szoki termiczne jest szczególnie istotna zarówno z poznawczego, jak i inżynierskiego punktu widzenia.

## PIŚMIENNICTWO

[1] Dyson B.F., Physically-based models of metal creep for use in engineering design. The materials, metals and materials society, 1990.

- [2] Dyson B.F., Creep and fracture of metals: mechanisms and mechanics. Rev. Phys. Appl., 1988, 23
- [3] Dyson B.F., McLean D., Creep of nimonic 80A in torsion and tension. Met. Sci, 1977, 11.
- [4] Dyson B.F., Verma A.K., Szkopiak Z.C., The influence of stress state on creep resistance: experiments and modeling. Acta Met., 1981, 29.
- [5] Frost H.J., Ashby M.F., Deformation mechanism maps, Pergamon Press, 1982
- [6] Jakowluk A., Procesy Pełzania i Zmęczenia w Materiałach, WNT, Warszawa 1993.
- [7] Kachanov L.M., The theory of creep (English translation edited by Kennedy A.J.), National Lending Library, Boston Spa, 1958
- [8] Kowalewski Z.L., Zjawisko Pełzania Metali – Eksperyment i Modelowanie, Wydawnictwo IPPT, Warszawa 2005.
- [9] Kowalewski Z.L., Kierunki i Perspektywy Rozwoju Badań Wytrzymałościowych, Wydawnictwo ITS, Warszawa, 2008.
- [10] Othman A.M., Hayhurst D.R., Dyson B.F., Skeletal point stresses in circumferentially notched tension bars undergoing tertiary creep modelled with physically based constitutive equations, Proc. R. Soc. Lond. A, 1993, 441.
- [11] Rabotnov Y.N., Creep problems In structural members. NHPC Amsterdam, 1969.

