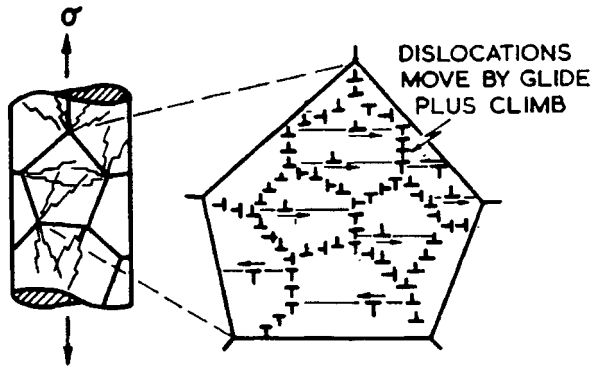
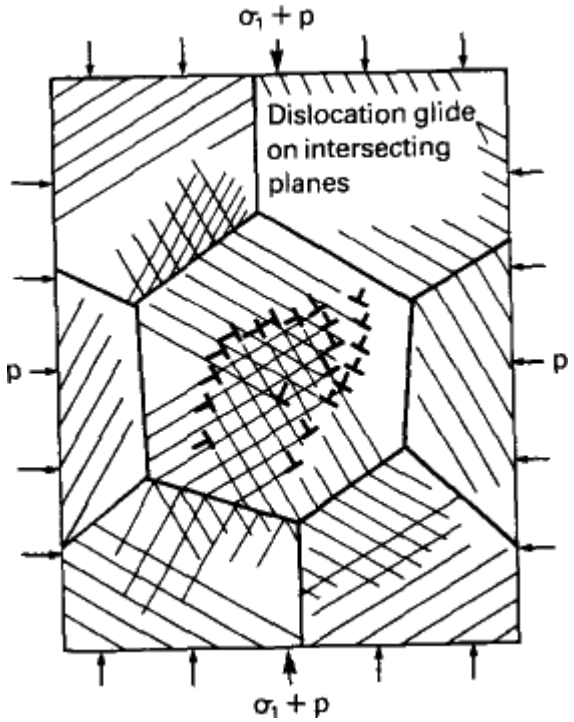
Deformazione ad alta temperatura - Creep

Lecture 14 – Meccanismi, *Engineering Approach, Creep Multiassiale*

Introduzione

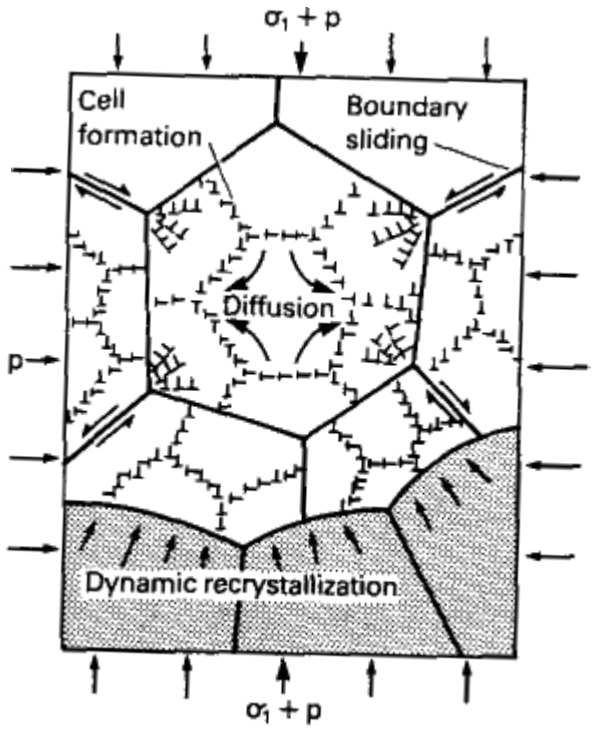
- Il fatto che per diversi valori della sollecitazione, l'esponente a creep mostri dei «salti» è indicativo di un possibile cambio nei meccanismi responsabili della deformazione a creep.
- Meccanismi di deformazione a creep:
  - **Creep dislocazionale (dislocation glide plus climb, Harper-Dorn)**. Il creep dislocazione è controllato dal moto delle dislocazioni (glide, climb, recovery). La presenza dello sforzo dà direzionalità al flusso di deformazione. La temperatura contribuisce all'agitazione termica ed al superamento delle barriere/ostacoli. Il creep dislocazionale avviene a temperature relativamente basse e sforzi elevati. Robusta dipendenza dallo sforzo, n=3-5.





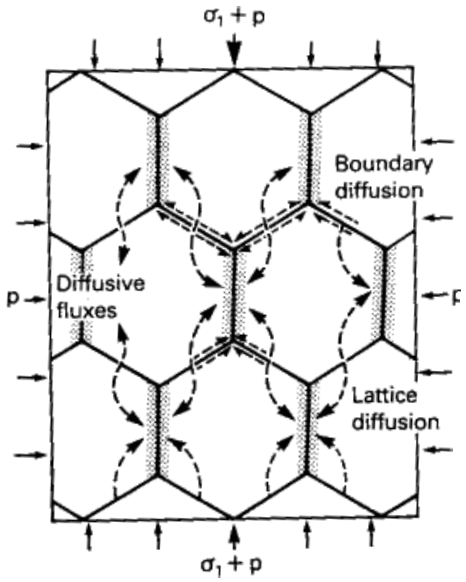
Introduzione

- **Creep diffusivo.** Ad temperature più elevate, la deformazione a creep è controllata dal moto delle vacanze che avviene per diffusione. Le vacanze si generano ai bordi di grano (boundary diffusion), e a temperature più elevate, all'interno del grano (core diffusion) Debole dipendenza dallo sforzo, ruolo essenziale della temperatura.
- Esistono essenzialmente due tipologie di creep diffusivo:
  - ***Nabarro-Herring creep.*** È un processo a creep controllato dalla diffusione a livello di grano (bulk diffusion). Gli atomi e le vacanze diffondono causando un allungamento dei grani nella direzione della sollecitazione. Debole dipendenza dalla sollecitazione (lineare, n=1)e moderata dipendenza dalla dimensione del grano: il creep rate diminuisce con l'aumentare della dimensione del grano. È fortemente dipendente dalla temperatura: il creep N-H domina il campo di temperature prossime alla temperatura di fusione.

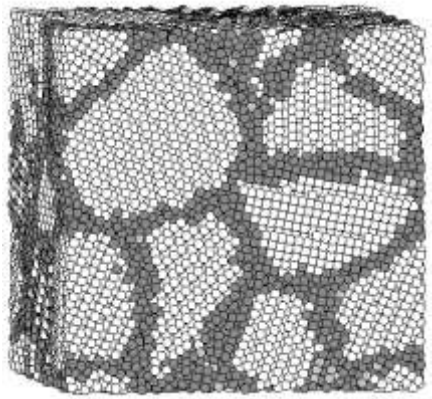


Introduzione

- **Coble creep.** Creep diffusivo a livello di bordo do grano. La diffusione causa un allungamento dei grani nella direzione di applicazione della sollecitazione. Forte dipendenza dalla dimensione del grano, dipendenza lineare dallo sforzo.

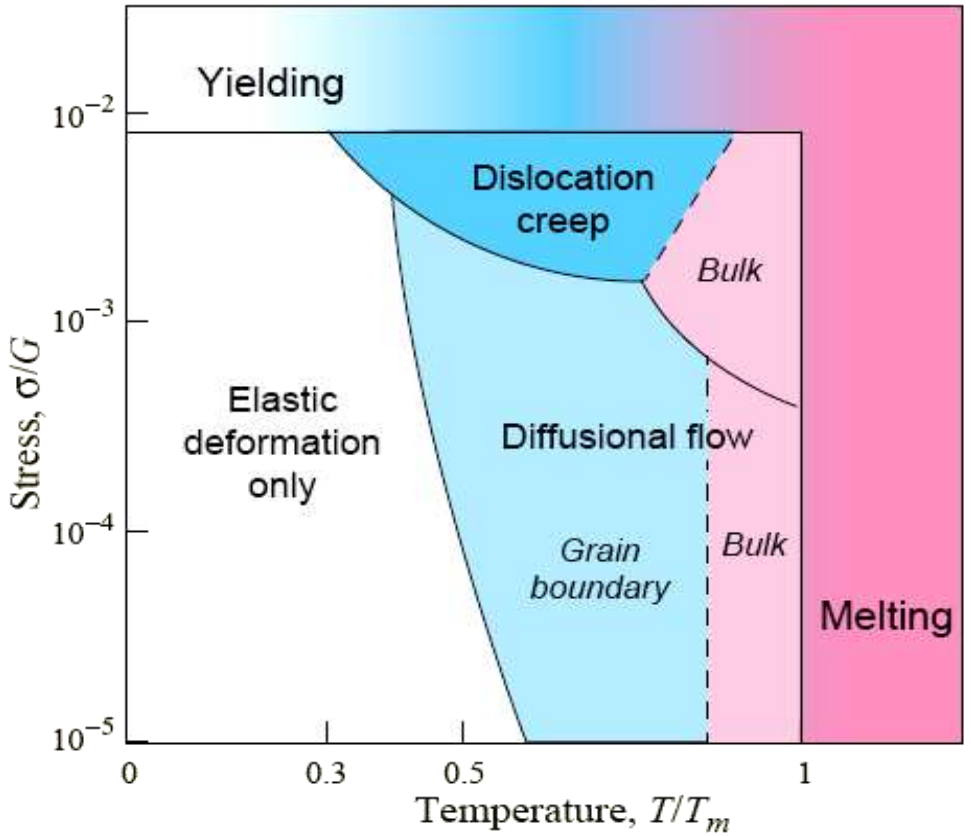


- **Scorrimento a bordo grano**. Un altro meccanismo di accumulo a creep è il grain boundary sliding. È controllato dallo sforzo anche se recentemente è stata mesa in discussione la sua effettiva esistenza come meccanismo indipendente dal dislocation creep



Deformation Mechanisms Map

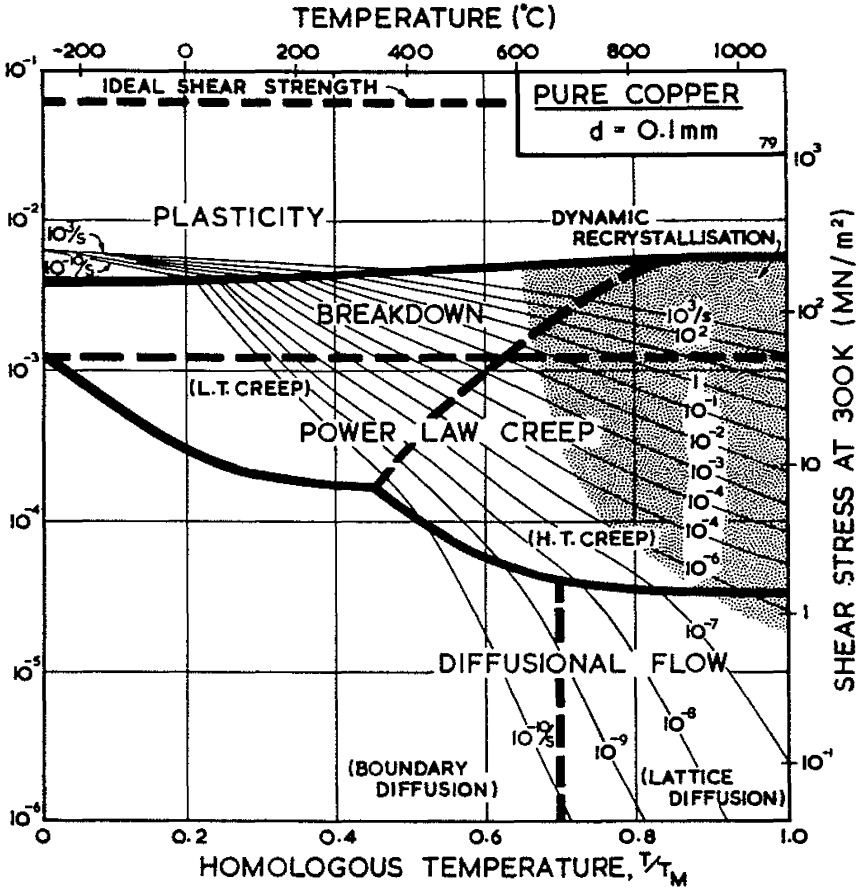
- Ashby e Frost hanno rappresentato i diversi meccanismi che controllano la deformazione ad elevata temperatura sul diagramma DMM



Deformation-mechanism diagram for metals. (After Ashby and Jones, 1981.)

Deformation Mechanisms Map

- Ashby e Frost hanno rappresentato i diversi meccanismi che controllano la deformazione ad elevata temperatura sul diagramma DMM

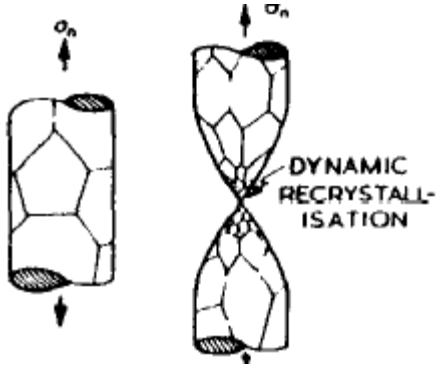


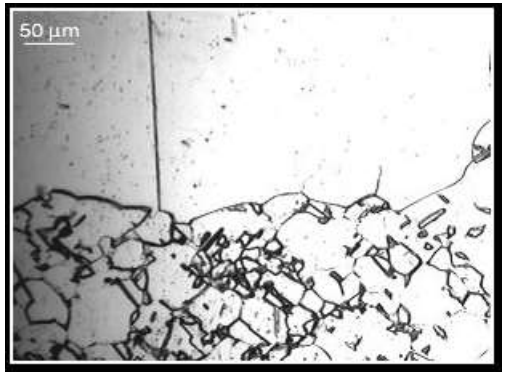
Material	*Copper*
Crystallographic and thermal data	
Atomic volume, Ω (m^3)	$1{\cdot}18 \times 10^{-29}$
Burgers vector, b (m)	$2{\cdot}56 \times 10^{-10}$
Melting temperature, T_M (K)	1356
*Modulus**	
Shear modulus at 300 K μ_0 (MN/m^2)	$4{\cdot}21 \times 10^4$
Temperature dependence of modulus, $\frac{T_M}{\mu_0}\frac{d\mu}{dT}$	$-0{\cdot}54$
Lattice diffusion†	
Pre-exponential, D_{0v} (m^2/s)	$2{\cdot}0 \times 10^{-5}$
Activation energy, Q_v (kJ/mole)	197
Boundary diffusion†	
Pre-exponential, δD_{0b} (m^3/s)	$5{\cdot}0 \times 10^{-15}$
Activation energy, Q_b (kJ/mole)	104
Core diffusion†	
Pre-exponential, $a_c D_{0c}$ (m^4/s)	$1{\cdot}0 \times 10^{-24}$
Activation energy, Q_c (kJ/mole)	117
Power-law creep	
Exponent, n	4·8
Dorn constant,‡ A	$7{\cdot}4 \times 10^5$
P-L breakdown, α'	794
Obstacle-controlled glide	
0 K flow stress, $\hat{\tau}/\mu_0$	$6{\cdot}3 \times 10^{-3}$
Pre-exponential, $\dot{\gamma}_0$ (s^{-1})	10^6
Activation energy, $\Delta F/\mu_0 b^3$	0·5

$$*\mu = \mu_0\left(1 + \frac{(T-300)}{T_M}\right)\frac{T_M}{\mu_0}\frac{d\mu}{dT}.$$

Ricristallizzazione dinamica

- La ricristallizzazione comporta la formazione di grani di piccole dimensioni a cui, a parità di sforzo, è associato un creep rate più alto (maggiore bordo grano-> processi diffusivi)



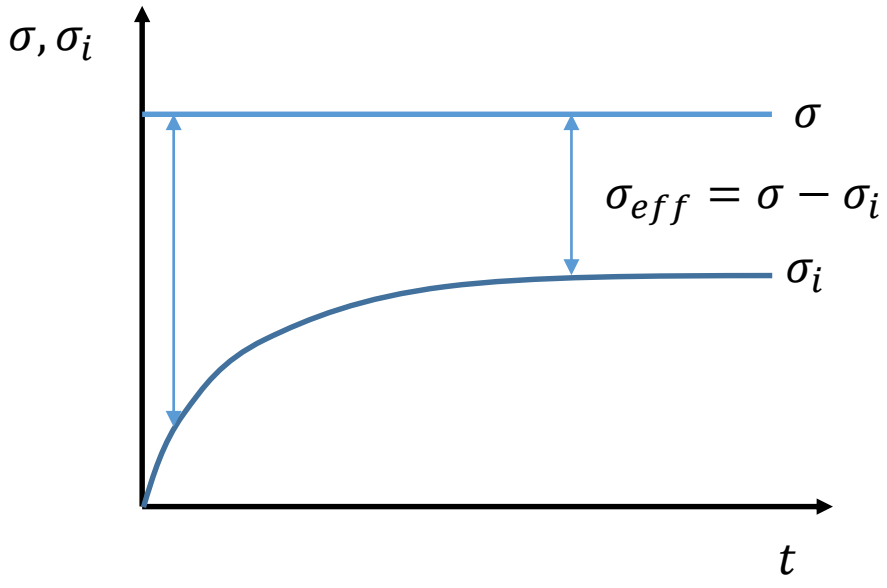


Meccanismi di danno a creep

- La presenza di tre regimi nella risposta a creep uniassiale può essere spiegata sulla base dei meccanismi responsabili della deformazione ad alta temperatura.
- Il regime primario (o transient creep) è il risultato della risposta viscoelastoplastica del materiale: in seguito all'applicazione della sollecitazione, è necessario un certo tempo prima che lo sforzo effettivo raggiunga una condizione di stazionarietà.
- Nel regime secondario si raggiunge la condizione di equilibrio dinamico

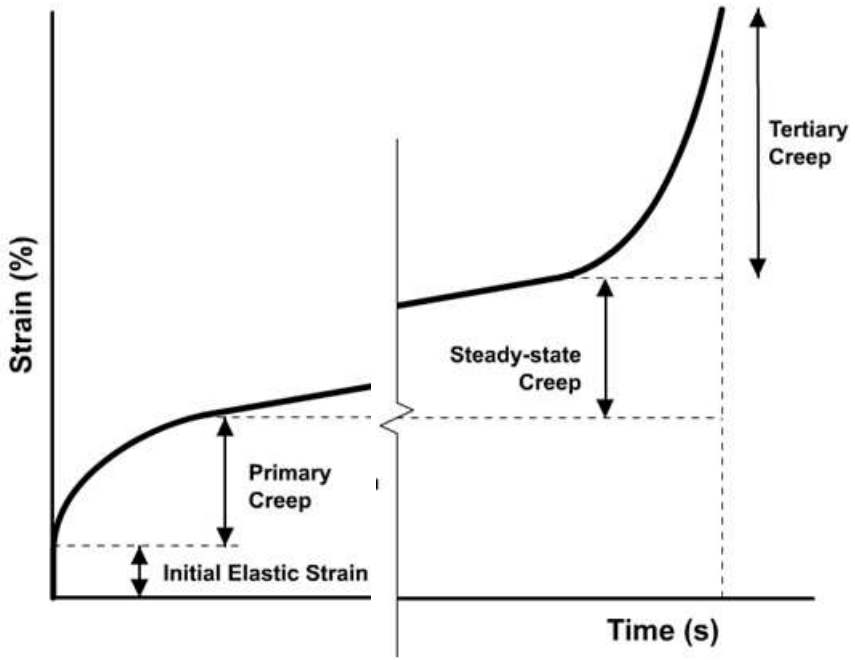
$$\dot{\varepsilon}_c = \rho b v$$

- Nel regime terziario, si ha la perdita della condizione di equilibrio dinamico



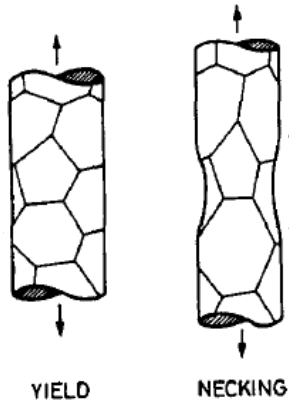
Meccanismi di danno a creep: regime terziario

- Il processo di accumulo di deformazione dovuto a creep è anche responsabile di processi di danneggiamento che prima o dopo portano a rottura il materiale
- La presenza del danno modifica la microstruttura e pertanto ha un effetto sul creep rate che aumenta portando il materiale ad accumulare grandi deformazioni in poco tempo e quindi alla rottura
- Sulla curva di creep questo regime si manifesta come creep terziario
- I meccanismi responsabili dell'incremento del creep rate sono diversi:
  - modifica della geometria (necking, aumento dello sforzo effettivo)
  - modifica della microstruttura (rimozione delle barriere)
  - vuoti e cricche (riduzione della sezione, aumento dello sforzo effettivo

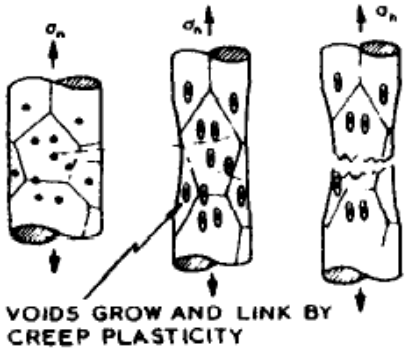


Meccanismi di danno a creep: regime terziario

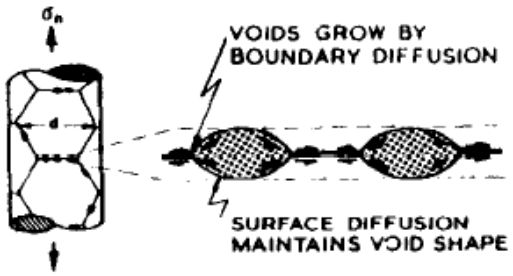
- *Effetti Geometrici*. In una prova a carico costante, la localizzazione delle deformazioni provoca il necking con conseguente aumento della tensione effettiva



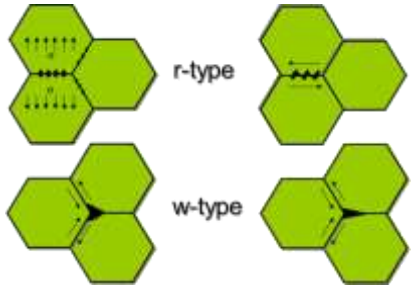
- *Danno intercristallino*. La formazione di cavità, preferibilmente a bordo grano, riducono la sezione netta resistente e provocano un incremento dello sforzo locale. La comparsa di cavità può essere sorgente per l'emissione di dislocazioni.



Low temperature



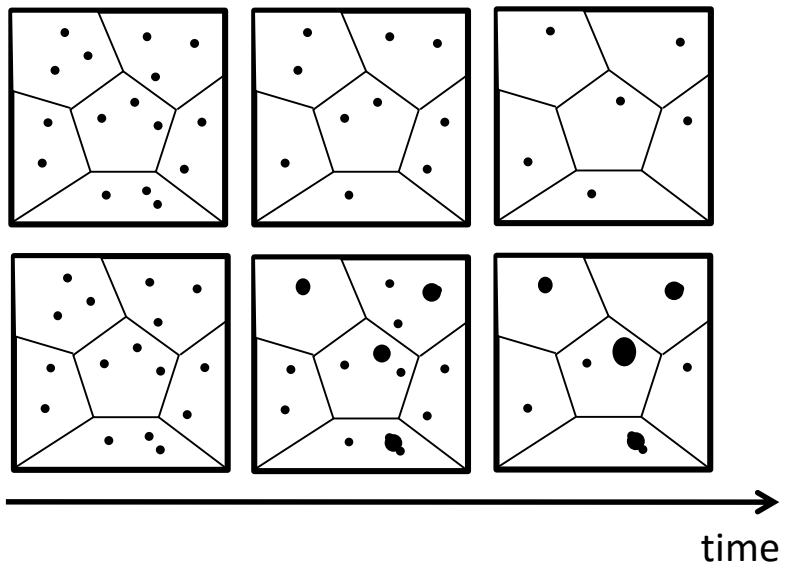
High temperature



Meccanismi di danno a creep: regime terziario

- *Precipitazione o risoluzione*. La soluzione di seconde fasi comporta la scomparsa di barriere per le dislocazioni; la precipitazione e il coarsening implicano la crescita di danno analoga a cavità

- A sforzi elevati, l'inizio del terziario è di solito controllato dal necking e non sempre c'è evidenza di danno. Studi su Al-2.6%Mg hanno evidenziato che il terziario non coincide con la comparsa di un necking apprezzabile ma inizia prima. Questo può dipendere dalla pendenza della curva di incrudimento
- A sforzi intermedi, il terziario è controllato dalla **nucleazione e crescita di cavità a bordo grano**: la comparsa di cavità al di sotto della superficie del provino ha un effetto sulla strizione
- La comparsa di cavità al centro del provino è successiva allo sviluppo del necking e questo indica la **triassialità** dello sforzo come parametri di nucleazione e crescita.



Meccanismi di danno a creep: regime terziario

- THERMAL DAMAGE VS MECHANICAL DAMAGE

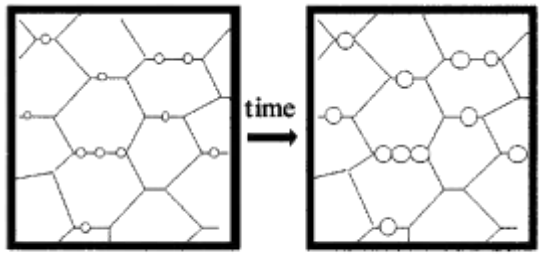


Fig. 1 Damage caused by growth of a constant density of grain boundary cavities

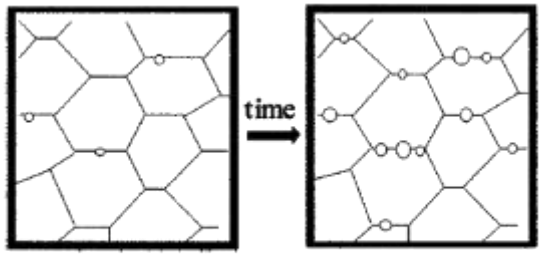


Fig. 2 Damage caused by continuous nucleation and growth of grain boundary cavities

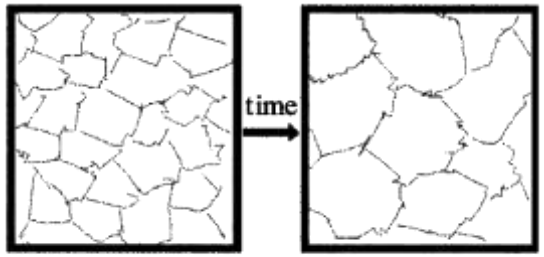


Fig. 3 Damage caused by dynamic coarsening of the subgrain microstructure

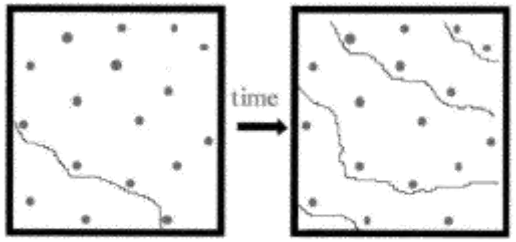


Fig. 4 Damage caused by multiplication of the mobile dislocation density

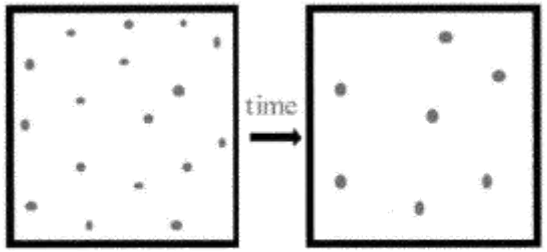


Fig. 5 Damage caused by coarsening of a constant volume fraction of creep-strengthening particles

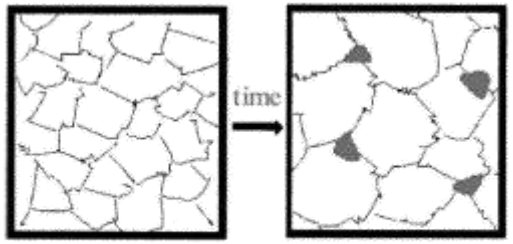


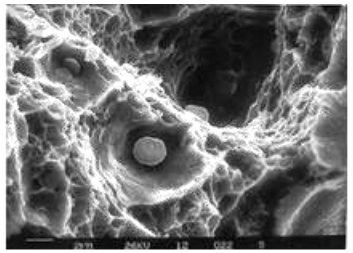
Fig. 6 Damage caused by matrix-solute depletion due to precipitation and growth of creep-benign particles

Meccanismi di danno a creep: regime terziario

- THERMAL DAMAGE VS MECHANICAL DAMAGE

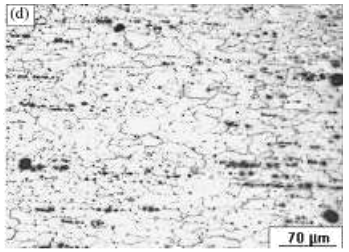
Microvoids/cracks nucleation and growth at

Inclusions



22NiMoCr37 steel, Bonora, 1992

Precipitates

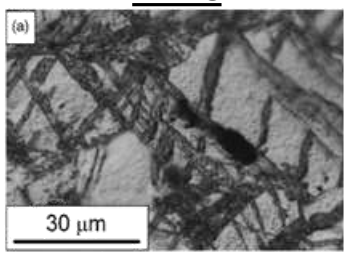


AA5182 alloy, Wen et al , 2004

Grain boundaries

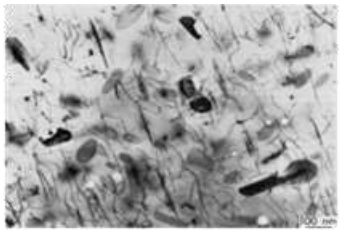
99.99 Cu, Zureck et al., 2000

Twins



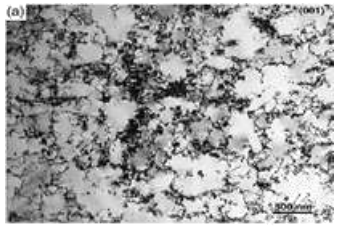
Magnesium, RT, Barnett, 2007

Dislocation loops



300SS steel, Mansur, 1994

Dislocation tangles



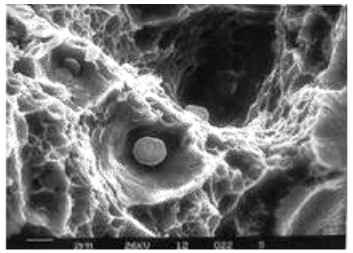
Cu, Mayers et al., 2003

Meccanismi di danno a creep: regime terziario

- THERMAL DAMAGE VS MECHANICAL DAMAGE

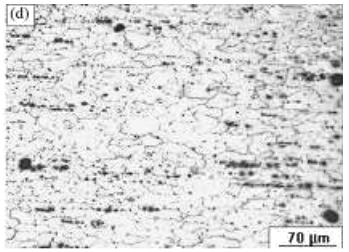
Microvoids/cracks nucleation and growth at

Inclusions



22NiMoCr37 steel, Bonora, 1992

Precipitates

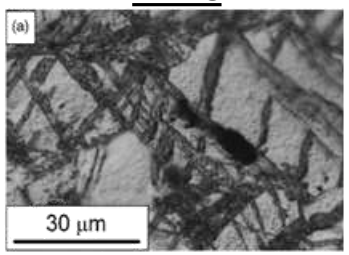


AA5182 alloy, Wen et al , 2004

Grain boundaries

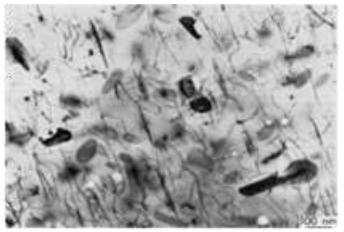
99.99 Cu, Zureck et al., 2000

Twins



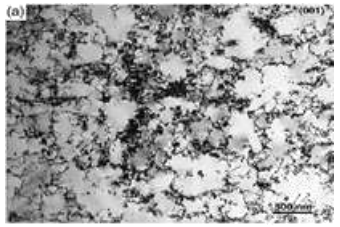
Magnesium, RT, Barnett, 2007

Dislocation loops



300SS steel, Mansur, 1994

Dislocation tangles

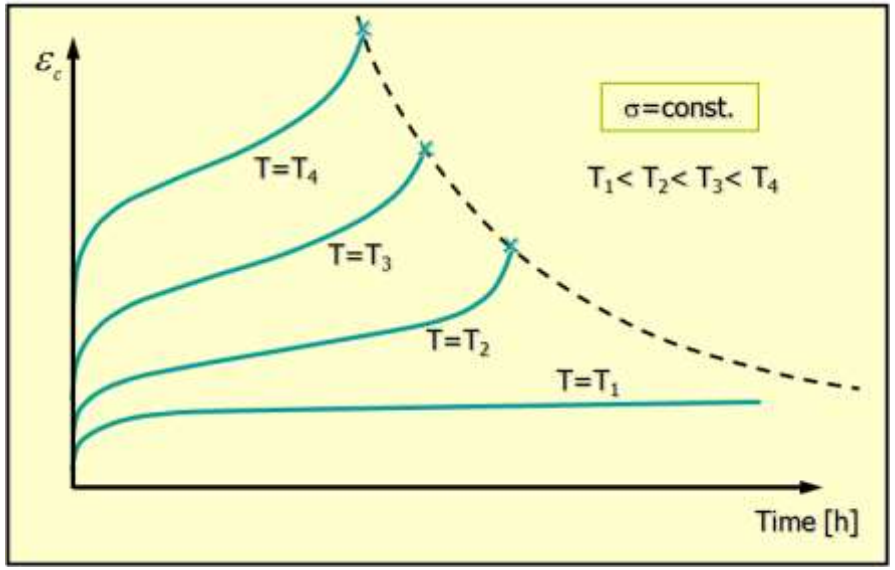


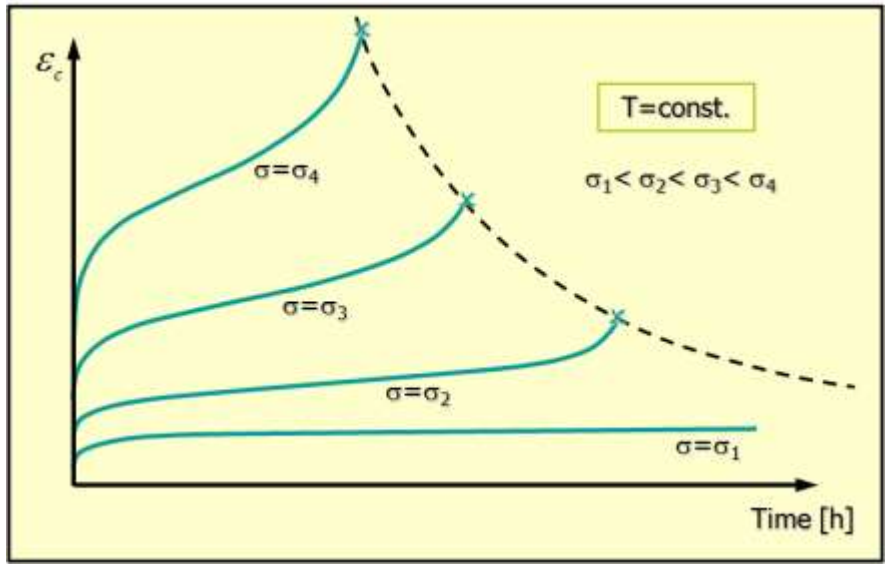
Cu, Mayers et al., 2003

Engineering approach

Rappresentazione dei dati.

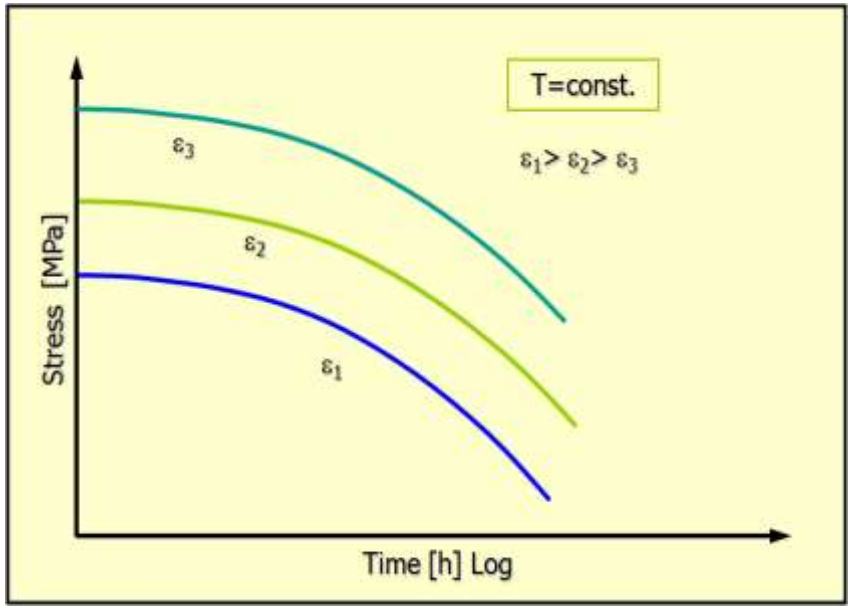
A parità di sforzo, un aumento di temperatura ha l'effetto di aumentare il creep rate e ridurre la vita complessiva. Lo stesso avviene a parità di temperatura, per un aumento di sforzo

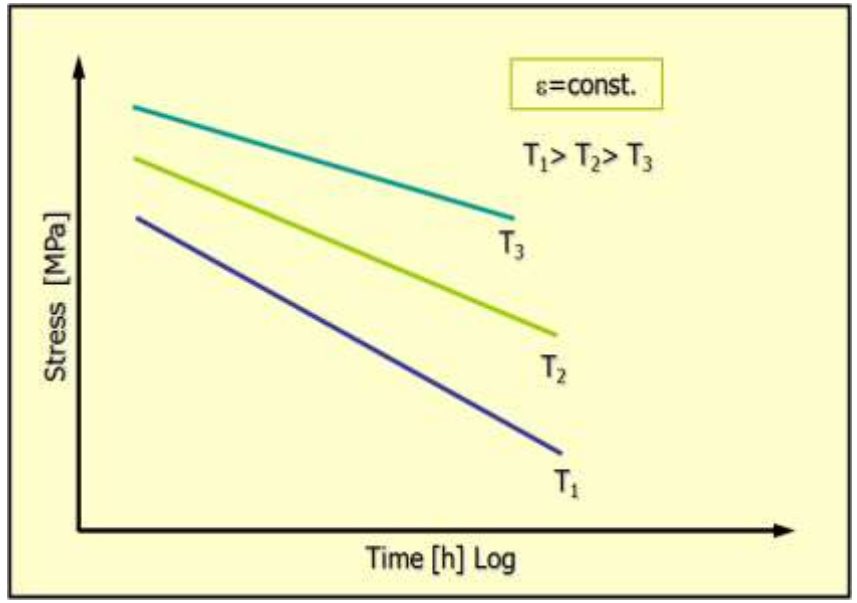




Engineering approach

Rappresentazione dei dati.





Engineering approach: metodi di estrapolazione

Le linee guida e le normative stabiliscono che test di durata inferiore all'1% della vita attesa non sono in grado di fornire informazioni significative sull'effettiva resistenza a creep del materiale

È necessario disporre di dati relativi a durate di almeno il 10%

Le linee guida per la progettazione richiedono test della durata di almeno il 25-30% della vita di progetto

Problemi: su una vita attesa di 100.000h (11 anni), il 30% significa prove della durata di almeno 3.5 anni

Necessità di disporre di prove accelerate

Engineering approach: metodi di estrapolazione

Per la riduzione della durata di una prova di creep è possibile:

A) Aumentare lo sforzo a parità di temperatura

B) Aumentare la temperatura a parità di sforzo

C) Aumentare entrambi

Problemi:

Aumentare la temperatura può attivare fenomeni relativi alla stabilità microstrutturale e portare a risultati non consistenti

Aumentare troppo lo sforzo attiva meccanisimi di deformazione che possono essere molto diversi da quelli attesi in esercizio (es. power law breakdown)

Approcci disponibili :

Metodo Abridged **Mechanical Acceleration** **Thermal Acceleration**

Engineering approach: metodi di estrapolazione

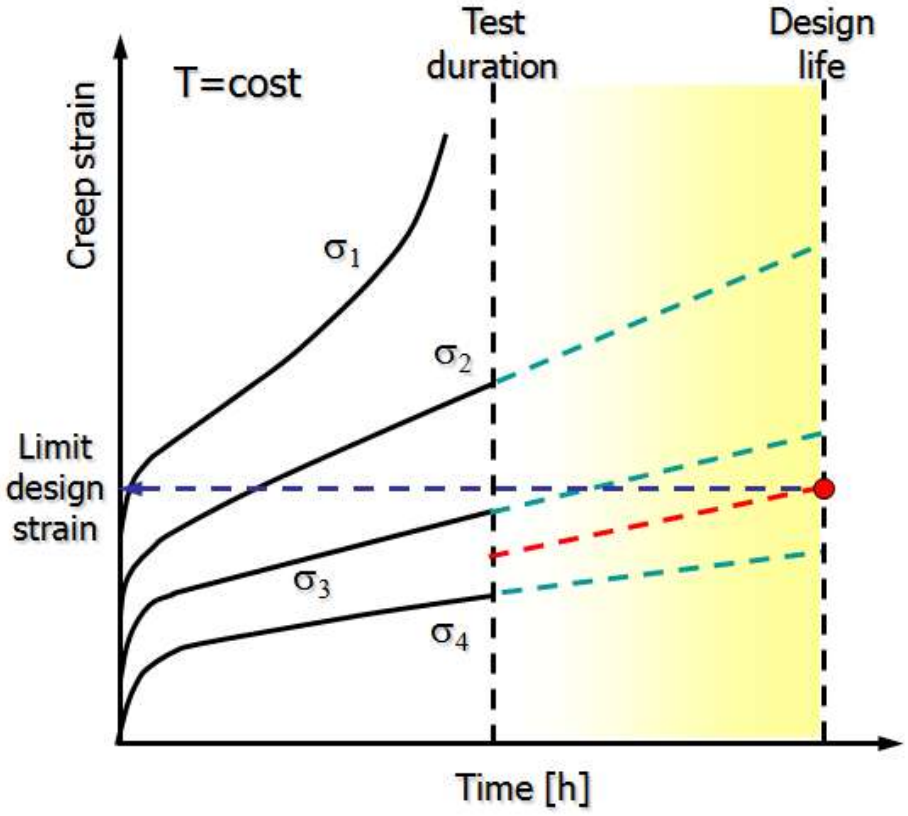
Metodo Abridged

Nel metodo Abridged i test di laboratorio sono condotti a diversi livelli di sforzo ed allae temperature previste in esercizio

Le curve di creep sono di laboratorio sono interrotte ad una durata prefissata (tale che si raggiunga il secondario) e sono poi estrapolate alla vita di progetto.

Sulla base delle specifiche di progetto che stabiliscono ***la massima deformazione ammissibile***, si determina lo sforzo massimo ammissibile

Limiti: con questo approccio non è possibile prevedere potenziali rotture che possano aver luogo nell'intervallo di tempo in cui si estrapola



Engineering approach: metodi di estrapolazione

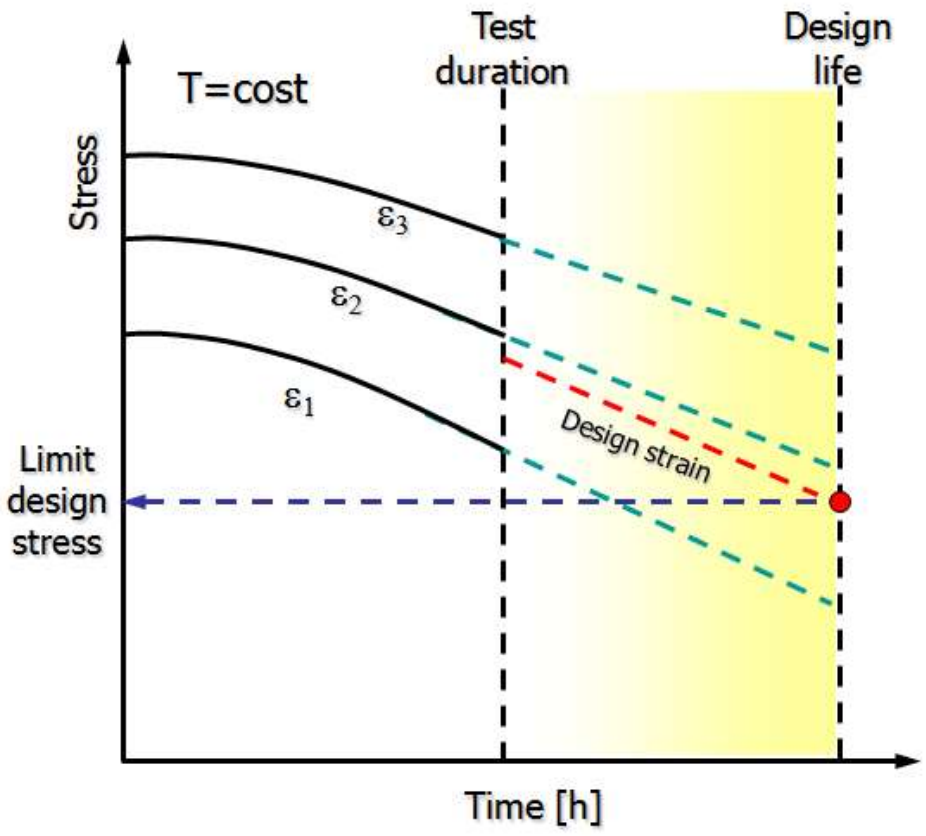
Metodo Mechanical Acceleration

Nel metodo dell'accelerazione meccanica i test di laboratorio sono condotti a livelli di sforzo superiori a quelli attesi in esercizio e e sono poi estrapolate alla vita di progetto.

I dati sono riportati in termini di famiglie di curve isodeformazione sforzo vs tempo.

Sulla base delle specifiche di progetto che stabiliscono ***la massima deformazione ammissibile***, si determina lo sforzo massimo ammissibile

Limiti: con questo approccio non è possibile prevedere potenziali effetti di accelerazione dovute all'insorgere del necking, rotture transgranulari, etc.



Engineering approach: metodi di estrapolazione

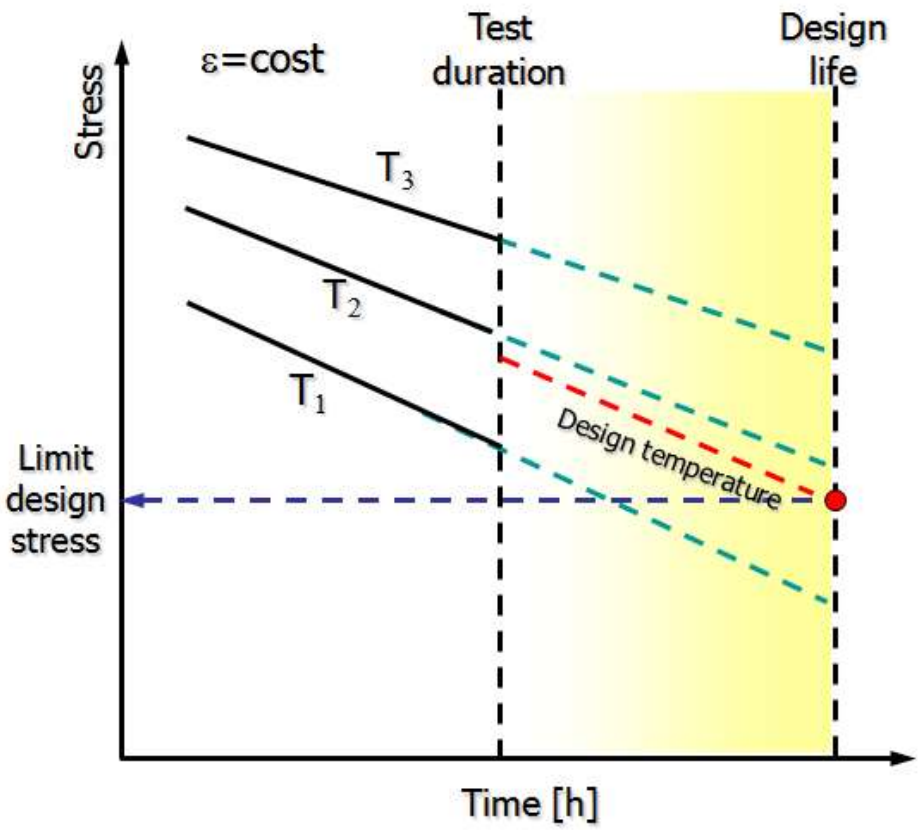
Metodo Thermal Acceleration

Nel metodo dell'accelerazione meccanica i test di laboratorio sono condotti a temperature superiori a quelli attese in esercizio e sono poi estrapolate alla vita di progetto.

I dati sono riportati in termini di famiglie di curve isotemperatura sforzo vs tempo per il valore di deformazione ammissibile di progetto.

Sulla base delle specifiche di progetto che stabiliscono ***la temperatura operativa***, si determina lo sforzo massimo ammissibile

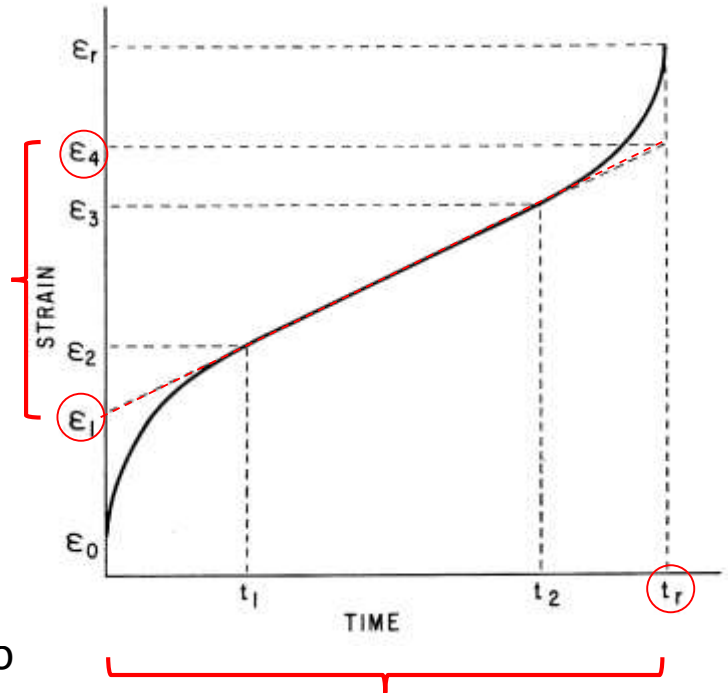
Limiti: con questo approccio non è possibile prevedere potenziali effetti dovuti all'instabilità della struttura, ossidazione, etc.



Relazioni tra *creep life* e *secondary creep rate*

Il processo di creep nei vari regimi è un processo evolutivo.

Molti autori hanno cercato di trovare delle correlazioni tra l **vita a rottura** e caratteristiche fondamentali della risposta a creep quali il **creep rate del secondario**.



Il creep secondario è esprimibile come:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = \frac{\varepsilon_4 - \varepsilon_1}{t_r}$$

Se la quantità ε_4-ε_1 rimane ragionevolmente costante con lo sforzo, ne consegue che il tempo a rottura è inversamente proporzionale al creep rate minimo o secondario (French, 1931)

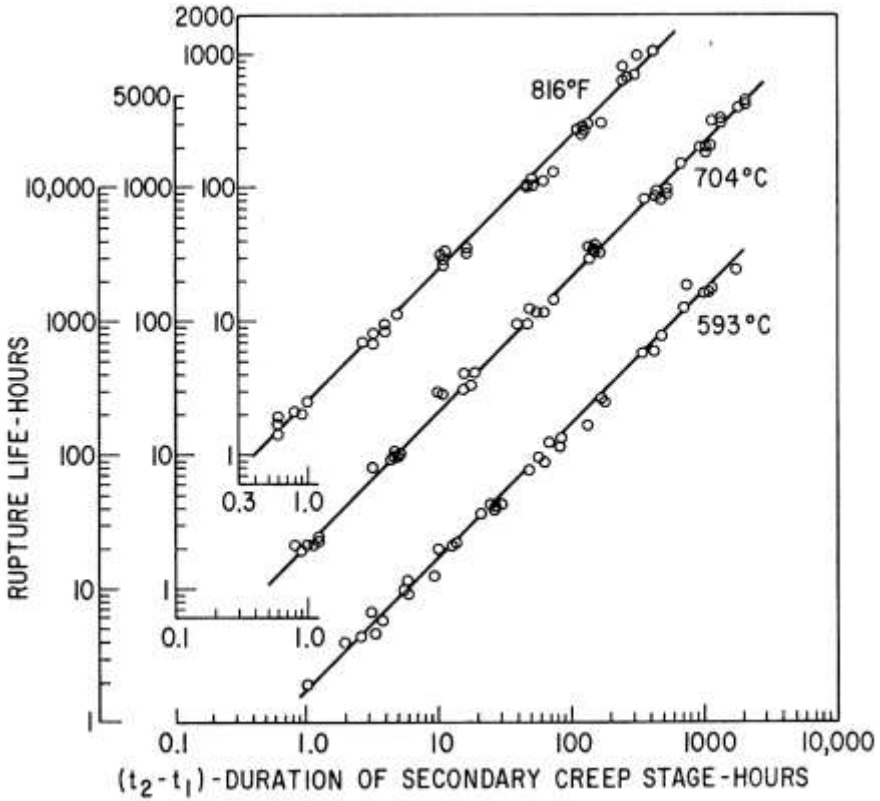
Relazioni tra *creep life* e *secondary creep rate*

Questa relazione è stata verificata da Tapsel (1931), Monkman (1956), Garofalo (1961) per il ferro, l'alluminio, e diversi tipi di acciaio

$$\boxed{t_r = \frac{C}{\dot{\varepsilon}_{ss}}}$$

$$\ln t_r = \ln C - \ln \dot{\varepsilon}_{ss}$$

Tuttavia, non fornisce alcuna informazione né sull'inizio del regime terziario né sulla sua natura



Austenitic stainless steel

Dipendenza della vita a creep dallo sforzo e temperatura

Quindi, il tempo a rottura è in correlato all'inverso del creep rate secondario, è allora evidente che lo sforzo e la temperatura hanno un effetto sulla durata complessiva a creep.

A sforzi elevati, se supponiamo che ci sia la costanza rispetto alla temperatura sostituendo con l'equazione sinh (Barret e Nix) si ottiene

$$\boxed{t_r = \frac{\alpha_0}{A''}\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]^{-n}}$$

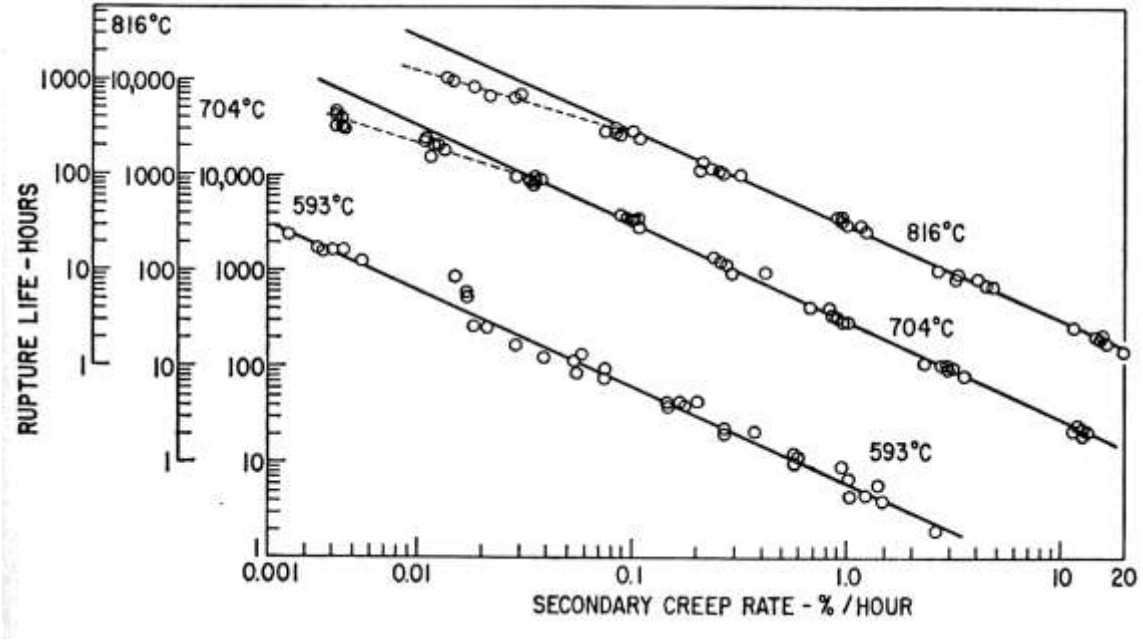
Che trova buona conferma per il rame (vite brevi) e per il ferro.

Dipendenza della vita a creep dallo sforzo e temperatura

La rappresentazione dei dati viene di solito data in termini di **log σ-log t_r**

Da osservare come, ad esempio per un acciaio austenitico, a 593°C sia confermato l'andamento lineare mentre a temperature più elevate si osservino delle non linearità: **ovvero vite più brevi di quanto atteso**.

Se ricordiamo che per valori bassi si sollecitazione vale la relazione di Norton, sostituendo nella relazione di Monkmant-Grant, si ottiene:



$$t_r = A_0 \exp\left(\frac{Q_{app}}{RT}\right)\sigma^{-n}$$

$$t_r \exp\left(-\frac{Q_{app}}{RT}\right) = A_0\sigma^{-n} = m_{SD}$$

Parametro di Sherby-Dorn

Il Parametro di Larson-Miller

Adottando per il creep secondario la relazione di Garofalo,

$$t_r = \frac{C_0}{\dot{\varepsilon}_{ss}} = \frac{C_0}{A'\exp(\beta\sigma)} = \frac{C_0}{A_0^{'}\exp\left(-Q_{app}/RT\right)\exp(\beta\sigma)}$$

$$t_r = \frac{C_0}{A_0^{'}}\exp\left(\frac{Q_{app}}{RT}\right)\exp\left(-\beta\sigma\right)$$

$$\log(t_r) = \log\left(\frac{C_0}{A_0^{'}}\right) + \frac{Q_{app}\left[\exp(-\beta\sigma)\right]}{\mathrm{R}\log(\mathrm{e})}\frac{1}{T}$$

$$T\left[\log(t_r) - \log\left(\frac{C_0}{A_0^{'}}\right)\right] = \frac{Q_{app}\left[\exp(-\beta\sigma)\right]}{\mathrm{R}\log(\mathrm{e})}$$

$$\boxed{T\left[\log(t_r) + C_{pM}\right] = m_{LM}}$$

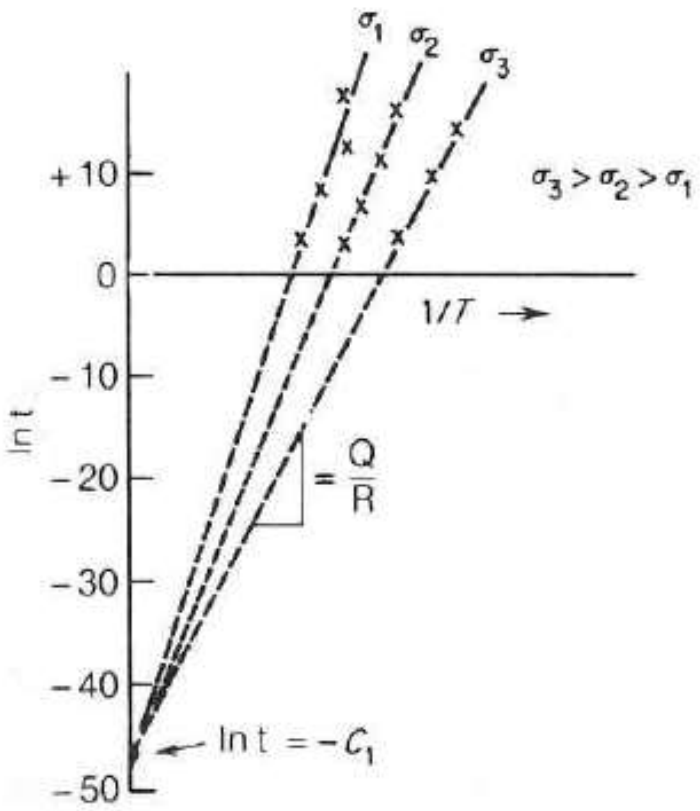
Parametro di Larson-Miller

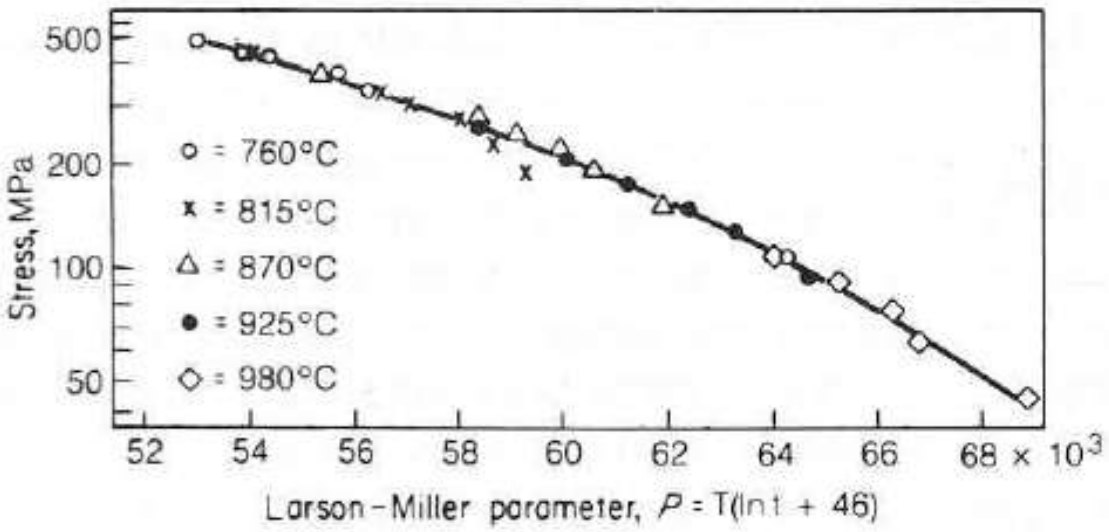
Il parametro m_{LM} è costante per un assegnato livello di sforzo in quanto,

$$\boxed{Q_{app} = Q_0 - Vf(\sigma)}$$

Il Parametro di Larson-Miller

$$\log(t_r) = \frac{m_{LM}}{T} - C_{pM}$$





Parametri per la previsione di vita a creep

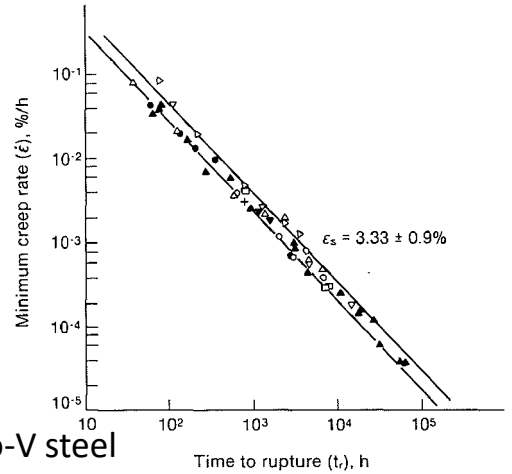
Altre relazioni

$$\frac{\log t_r - \log t_a}{T - T_a} = m_{MH}$$

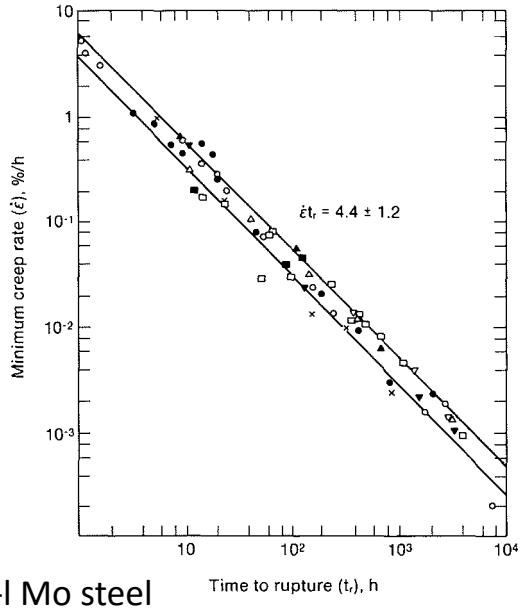
Manson-Harferd

$$\log t_r - 0.43\frac{Q_{app}}{RT} = m_{MG}$$

Monkman-Grant



Cr.Mo-V steel



2V4 Cr-l Mo steel

Poiché il parametro di Monkman-Grant è per alcune classi di materiali molto prossimo a 1, il criterio è equivalente a scrivere:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} t = C$$

Creep Multiassiale

- I componenti reali si trovano ad operare in condizioni di sforzo multiassiale per effetto delle variazioni di geometria anche se soggetti a sollecitazioni semplici

- Nel caso di componenti in pressione che operino ad elevata temperatura lo stato di sforzo è sempre multiassiale e si possono avere le condizioni per cui si sia in regime di creep

- Per determinare l'accumulo di deformazione a creep in tali condizioni è possibile procedere come illustrato di seguito

Creep Multiassiale

Ricordiamo le equazioni per uno stato di deformazione plastica (total deformation theory):

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{D}\left[\sigma_1 - 0.5\left(\sigma_2 + \sigma_3\right)\right]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{D}\left[\sigma_2 - 0.5\left(\sigma_3 + \sigma_1\right)\right]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{D}\left[\sigma_3 - 0.5\left(\sigma_2 + \sigma_1\right)\right]$$

Dividendo per il tempo otteniamo i *creep rate*

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{Dt}\left[\sigma_1 - 0.5\left(\sigma_2 + \sigma_3\right)\right]$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{Dt}\left[\sigma_2 - 0.5\left(\sigma_3 + \sigma_1\right)\right]$$

$$\dot{\varepsilon}_3 = \frac{1}{Dt}\left[\sigma_3 - 0.5\left(\sigma_2 + \sigma_1\right)\right]$$

Creep Multiassiale

Come caso particolare, possiamo ricavare le relazioni per caso uniassiale di sforzo,

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_3 = 0$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\sigma_1}{Dt} \qquad (1)$$

Ricordando il criterio di von Mises, possiamo definire uno sforzo vero equivalente a creep,

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2}\left[\left(\sigma_1 - \sigma_2\right)^2 + \left(\sigma_2 - \sigma_3\right)^2 + \left(\sigma_3 - \sigma_1\right)^2\right]^{1/2}$$

che per il caso uniassiale diventa,

$$\sigma_e = \sigma_1$$

Creep Multiassiale

Ricordando eqn (1), possiamo scrivere:

$$\sigma_e = \sigma_1 = \dot{\varepsilon}_1 Dt$$

Supponendo di trascurare il creep primario e che il comportamento del materiale obbedisca ad una legge di tipo Norton,

$$\dot{\varepsilon}_1 = B\sigma_1^n$$

che sostituita nella precedente,

$$\sigma_1 = B\sigma_1^n Dt$$

Permette di ricavare il modulo *Dt*,

$$\frac{1}{Dt} = B\sigma_1^{n-1} = B\sigma_e^{n-1}$$

Creep Multiassiale

Risostituendo nelle relazioni iniziali possiamo esprimere i ratei di crep in funzione della sola tensione equivalente e dei parametri di Norton (misurati in condizioni di sforzo uniassiale)

$$\dot{\varepsilon}_1 = B\sigma_e^{n-1}\left[\sigma_1 - 0.5\left(\sigma_2 + \sigma_3\right)\right]$$
$$\dot{\varepsilon}_2 = B\sigma_e^{n-1}\left[\sigma_2 - 0.5\left(\sigma_3 + \sigma_1\right)\right]$$
$$\dot{\varepsilon}_3 = B\sigma_e^{n-1}\left[\sigma_3 - 0.5\left(\sigma_2 + \sigma_1\right)\right]$$

È prassi normalizzare le componenti 2 e 3 rispetto a 1 $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}; \beta = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ e quindi esprimere il tutto secondo,

$$\varepsilon_1 = B\sigma_e^n\left[\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta\right]^{\frac{n-1}{2}}\left[1 - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right]$$

$$\varepsilon_2 = B\sigma_e^n\left[\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta\right]^{\frac{n-1}{2}}\left[\alpha - \frac{\beta}{2} - \frac{1}{2}\right]$$

$$\varepsilon_3 = B\sigma_e^n\left[\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta\right]^{\frac{n-1}{2}}\left[\beta - \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2}\right]$$

Creep Multiassiale

Altre relazioni per il creep multiassiale: sforzo effettivo

$$\sigma_{eff} = \mu\sigma_{eq} + (1-\mu)\sigma_m$$

σ_m = tensione idrostatica, σ_{eq} = von Mises