

Sünme ve Sünme kırılması

konular

- Hedefler / Giriş
- Yüksek sıcaklık malzemeleri sorunu
- Sıcaklığa bağlı mekanik davranış
- Sünme testi
- Sünme kopma testi
- Sünme sırasında yapısal değişim
- Sünme deformasyon mekanizmaları
- Yüksek sıcaklıkta kırılma
- Yüksek sıcaklık alaşımları

Hedefler

- Bu bölüm, yüksek sıcaklıkta malzemenin deformasyon ve kırılma davranışının anlaşılmasını sağlar.
- Sünme ve Sünme kopma testleri, test verilerinin yorumlanması mühendislik uygulamaları için tartışılacak şekilde karşılaştırılacaktır.
- Bu, yüksek sıcaklıkta kullanımlar için uygun metal ve alaşımların seçimine yarayacaktır.

Giriş

Yüksek sıcaklık uygulamaları



www.bv.com

Buhar Enerji Santrali

Yüksek sıcaklıkta
yüksek gerilmeye
maruz kalır



<http://cheweb.tamu.edu/orgs>

Yağ rafinerisi



<http://en.wikipedia.org>

Enerji
santralinde
kullanılan
Buhar Türbini



www.ideas-eng.com

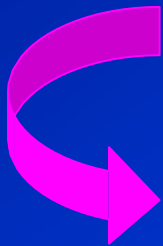
Kimya Tesisi

Yüksek sıcaklıkta malzeme problemi

Sıcaklık



- Atomlar daha hızlı hareket eder **difüzyon kontrollü süreç** .
- Bu, malzemelerin mekanik özelliklerini etkiler.
- Dislokasyonlar daha fazla hareketliliği (tırmanma).
- Artan boşluk miktarı.
- Tane sınırlarında deformasyon.
- Metalurjik değişiklikler, yani faz dönüşümü, çökelme, oksidasyon, yeniden kristalleşme.



Yüksek sıcaklık malzemeleri / alaşımları

- Geliştirilmiş yüksek sıcaklık dayanımı.
- İyi oksidasyon direnci.

Sürünme/Sünme nedir?

Creep/ Sünme, bir metal yüksek sıcaklıkta sabit bir gerilmeye maruz kaldığında meydana gelir. Zamana bağlı sürekli olarak boy artışına uğrar.

Bir malzeme hangi sıcaklıkta süner?

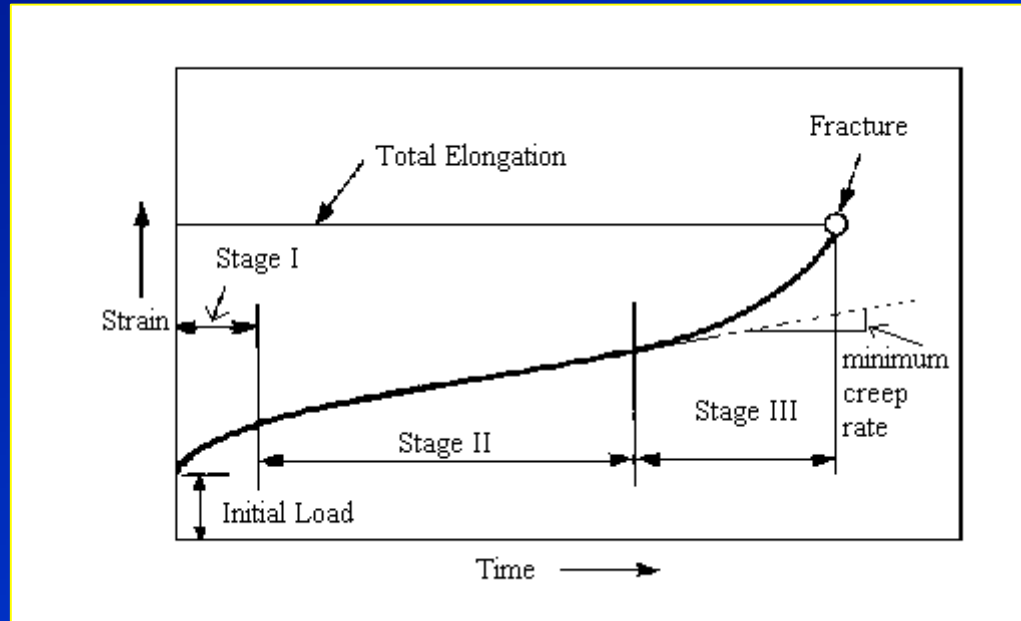
- Malzemelerin kendilerine özgü farklı erime noktaları olduğundan,
- Benzeş sıcaklık > 0.5 olduğunda her biri sünecektir.

$$\text{Homologous temp/benzeş sıcaklık} = \frac{\text{Deney Sıcaklığı}}{\text{Ergime Sıcaklığı}} > 0.5$$

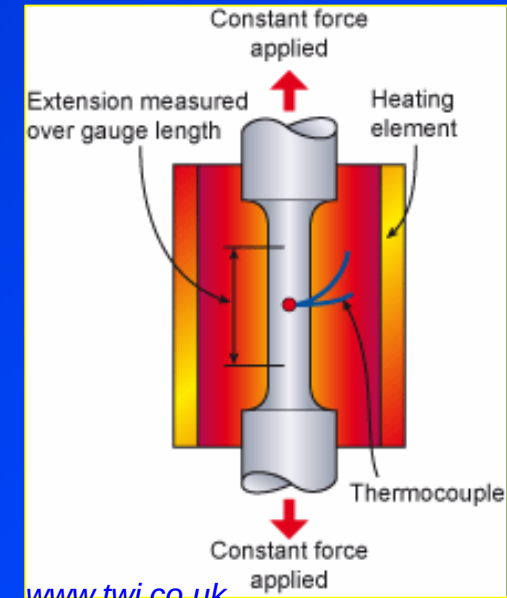
- Sünme testi , yüksek sıcaklığa maruz kaldığında meydana gelen boyutsal değişiklikleri ölçer.
- Kopma testi , sıcaklığın uzun süreli yük taşıma karakteristikleri üzerindeki etkisini ölçer.

Sünme Deneyi

Sünme deneyi **sabit bir sıcaklıkta** tutulan bir **çekme numunesine** bir sabit bir yükün bir uygulanmasıyla gerçekleştirilir (ASTM E139-70 göre).

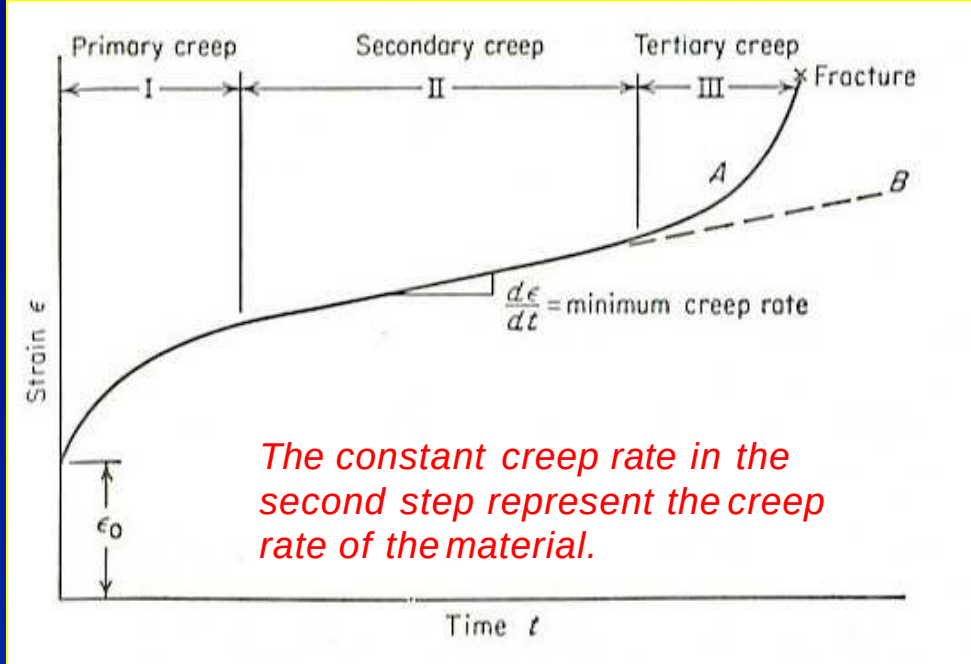


Tipik sünme eğrisi



Şematik sünme testi

Sünme Eğrisi



Sünmenin üç aşamasını gösteren tipik sünme eğrisi

Not: B eğrisi, yükten ziyade sabit gerilme uygulanırken elde edilir.

ϵ_0 ilk yükleme ile oluşan anlık şekil değişimi olup, zamanla kısmen geri dönebilir (anelastic) ile zamanla kısmen geri dönüşümsüz iki bileşenden meydana gelir.(plastik).

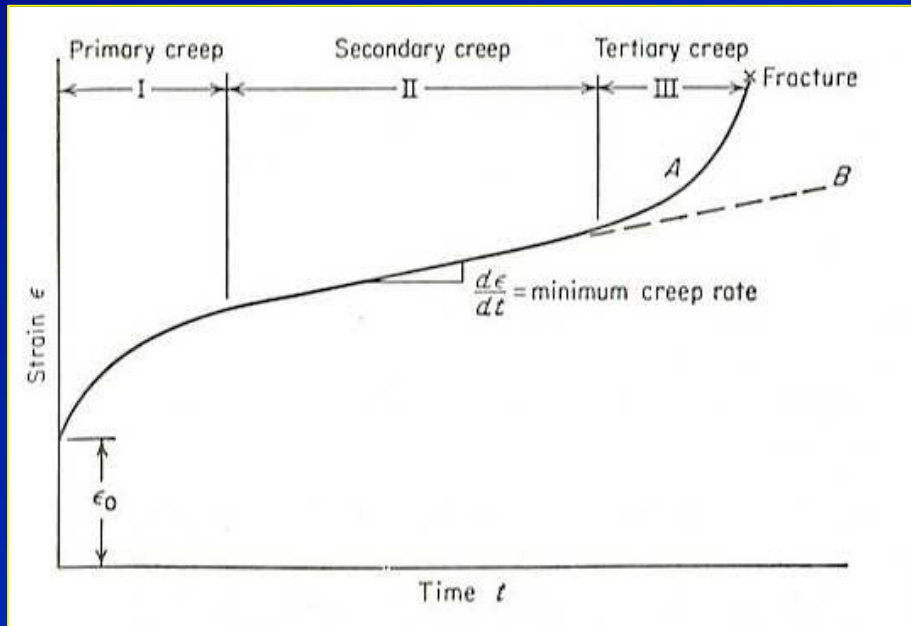
Bir **tipik sünme eğrisi** ,bize sünmenin, farklı sünme hızlarının gerçekleştiği üç farklı aşamada meydana geldiğini gösterir. İlk hızlı uzamadan ϵ_0 , sonra, sünme hızı sabit değere ulaşana kadar zamanla azalır.

Birincil sünme sünme hızı giderek azalır.

İkincil sünme , temsil eden sabit bir sünme hızı verir.

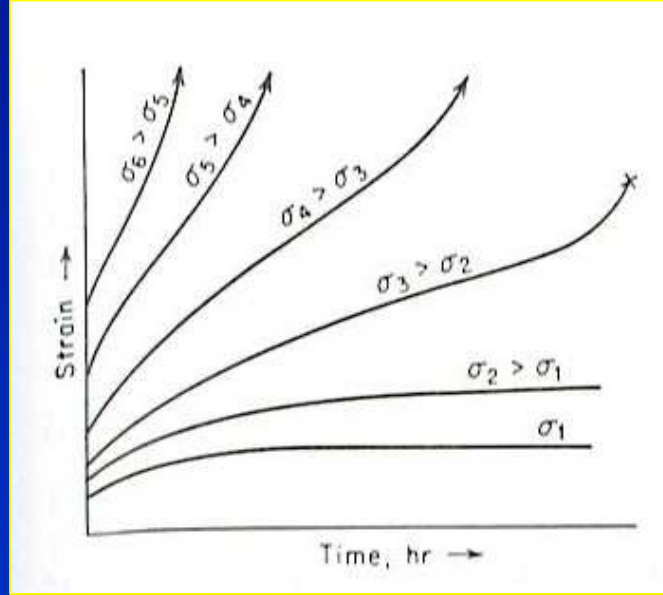
Üçüncül sünme, hasar oluşuncaya kadar hızlı bir sünme hızı verir.

Sünmenin 3 aşaması



- 1) Birincil sünme geçici bir sünme dönemidir. Malzeme deformasyonu nedeniyle malzemenin sünme direnci artar. Oda sıcaklığında kurşunun sünmesi gibi düşük sıcaklık testinde baskın olur.
- 2) İkincil sürünme neredeyse sabit bir sürünme hızı sağlar. Bu dönemde sünme hızının ortalama değerine **minimum sünme hızı** denir .
- 3) Üçüncül sünme , numunenin etkili bir şekilde azalan kesit alanına bağlı olarak sünme hızında hızlı bir artış görülür.

Sabit sıcaklıkta gerilmenin sünme eğrileri üzerindeki etkisi



Sünme eğrisinin şekli, sabit bir sıcaklıkta *uygulanan gerilmeye* göre biraz değişecektir .

Uygulanan Gerilme



Genleme



Sıcaklık



Sünme hızı



Sünme Kırılması Deneyi

Sünme Deneyi

Sünme kırılma Deneyi

Yük

Düşük Yük

Yüksek Yük

Sünme Hızı

minimum Sünme hızı

Yüksek sünme Hızı

Test süresi

2000-10000 h

1000 h

Toplam Genleme

0.5%

50%

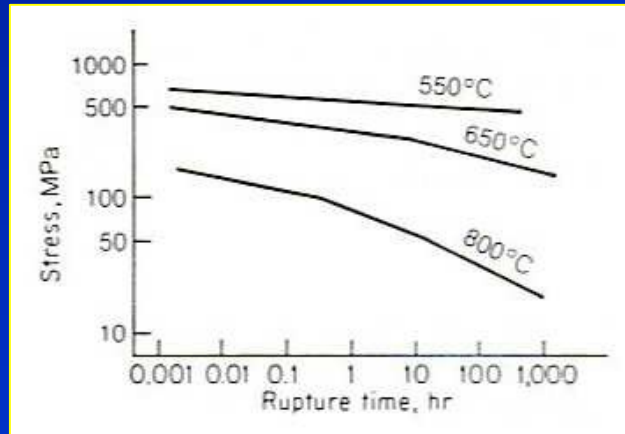
Genleme Ölçümü

İyi genleme ölçme cihazı

Basit genleme ölçme cihazı

Sünme Kırılma Testi, sünme testine benzer şekilde gerçekleştirilir ancak daha yüksek gerilme düzeyinde numune hasara uğrayana kadar geçen süre ölçülür.

• **Sünme kırılması dayanımı** ve **hasar süresi** normal olarak düz bir çizgi gösterecek şekilde çizilir .

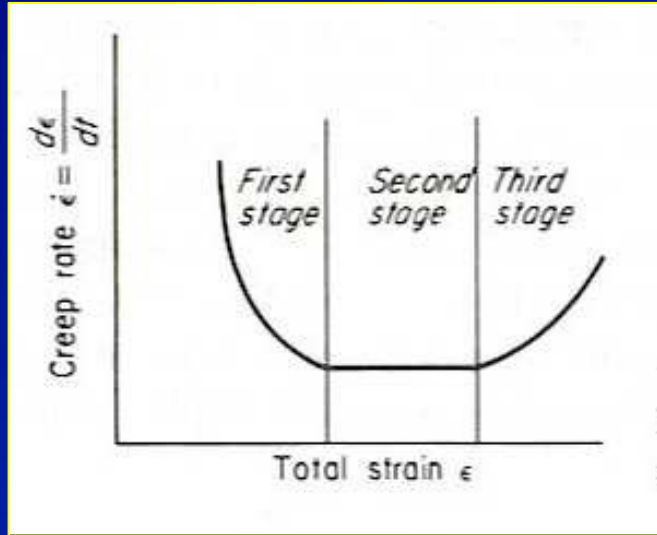


*Log-log ölçeğinde Gerilme-
hasar zamanı verileri*

• Eğimdeki değişiklikler yapısal değişimleri gösterir örn., tane içi-taneler-arası kırılma, oksitlenme, yeniden kristallenme, tane büyümesi, küreselleşme, çökme.

• **Tasarım**da doğrudan kullanılabilme.

Sünme sırasında yapısal değişiklikler



Sünme hızı ile toplan genleme ilişkisi

Farklı sünme hızları , sünme hızı ve zamanla malzemelerin iç yapısındaki değişikliklerden kaynaklanır

Yüksek sıcaklıklarda üç ana deformasyon süreci vardır.

1) Kayma ile deformasyon

- Yüksek sıcaklıkta daha fazla kayma sistemi çalışır
- Kayma bantları daha kalın ve geniş aralıklıdır.

2) Alttane Oluşumu

- Sünme deformasyonu, özellikle tane sınırları etrafında heterojenlik üretir ve dislokasyonların kendilerini düşük açılı tane sınırı meydana getirecek şekilde üst üste sıralanmasına yolaçar. Özellikle yüksek istifleme hatası enerjisine sahip metaller için kolaydır.

3) Tane Sınırı Kayması

- Kayma şekil değiştirmesi ile üretilir ve artan sıcaklık / veya azalan genleme hızı ile artar.
- Tane sınırı katlanması veya tane sınırı göçü ile sonuçlanır.

Sünme deformasyon mekanizmaları

Baş sünme deformasyon mekanizmaları;

1) Dislokasyon kayması

Kayma düzlemleri boyunca hareket eden dislokasyonları ve ısıl aktivasyon ile engelleri aşmalarını içerir. Yüksek gerilme altında oluşur.

2) Dislokasyon sürünmesi

Boşlukların veya ve arayer atomlarının yayılmasıyla engelleri aşan dislokasyon hareketlerini içerir.

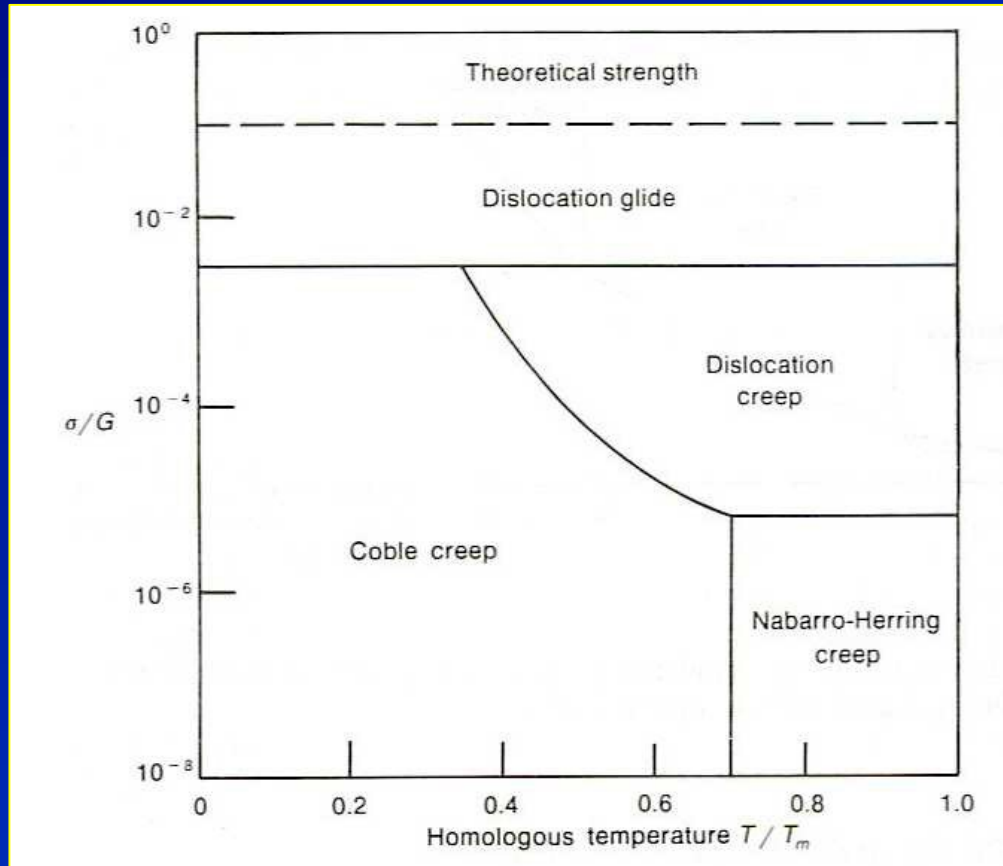
3) Difüzyon sünmesi

Uygulanan gerilmenin etkisi altında bir kristal içinden boşlukların veya ve arayer atomlarının akışını içerir.

4) Tane Sınırı Kayması

Tanelerin birbirine üzerinden kaymasını içerir.

Deformasyon mekanizması haritaları



Basitleştirilmiş deformasyon mekanizması haritası.

Not: G , kayma modülüdür

• Haritanın çeşitli bölgeleri, gerilme ve sıcaklık kombinasyonu için **baskın deformasyon mekanizmasını** gösterir.

• **Sınırdaki** iki mekanizma da meydana gelir.

Kararlı hal sünme için aktivasyon enerjisi

- *Kararlı durum sünme deformasyonu, $0.5T_m$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda baskındır.*
- *Kararlı hal sürünmesi şu şekilde ifade edilebilir:*

$$\dot{\varepsilon}_s = Ae^{-Q/RT}$$

Eq.1

Burada Q = hız kontrol süreci için aktivasyon enerjisi

A = Malzeme yapısına bağlı katsayı

T = mutlak sıcaklık

R = evrensel gaz sabiti

- *Aktivasyon enerjisi Q , sünme mekanizmalarının değişmesinin beklenmeyecek derece sıcaklık aralığının küçük olduğu varsayılarak hesaplanabilir.*

$$A = \dot{\varepsilon}_1 e^{Q/RT_1} = \dot{\varepsilon}_2 e^{Q/RT_2}$$
$$Q = \frac{R \ln(\dot{\varepsilon}_1 / \dot{\varepsilon}_2)}{(1/T_2 - 1/T_1)}$$

Eq.2

Süperplastik davranış

- **Süper plastisite** , çekme gerilmesi altında boyun vermeden çok büyük deformasyonlara dayanabilme özelliğidir.
- verilen uzama $> 1000\%$.
- Yüksek sıcaklıkta yüksek genleme hızına duyarlılık katsayısına(m) sahip malzemeler yüksek sıcaklıklarda ($T > 0.5T_m$) **superplastiktir**.
- Malzeme özellikleri: tane büyümesini engellemek ve geniş iç boşluk oluşumunu önlemek için **matrisle aynı dayanıma sahip ikinci fazın** varlığı ile **ince tane boyutu** ($< 10 \mu\text{m}$) .
- Tane sınırı kaymasını teşvik etmek ve sırasıyla yerel gerilme konsantrasyonunun oluşmasını önlemek için tane sınırı yüksek açılı ve hareketli olmalıdır .

Süperplastik şekil değiştirme

Süperplastik deformasyon için şu ifadeler verilir

$$\dot{\varepsilon} = 10^8 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^2 \frac{b D_{gb}}{\bar{L}^3}$$

Eq.3 Tane sınır difüzyonu için

$$\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^9 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^2 \frac{D_o}{\bar{L}^2}$$

Eq.3 Kafesin kendinden difüzyon için

Burada $\bar{L}$ tane büyüklüğünün ortalama doğrusal kesişim ölçüsüdür.. Bu durumda $n = 2$ ve $m = 0.5$

Süper plastik deformasyon için baskın mekanizma, *dislokasyon kaymasının eşlik ettiği tane sınırı kaymasıdır.*

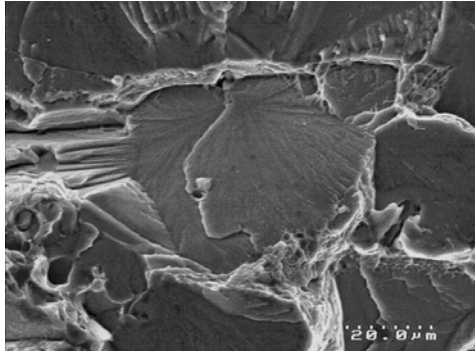
Yüksek sıcaklıkta kırılma

Taneler içi kırılma

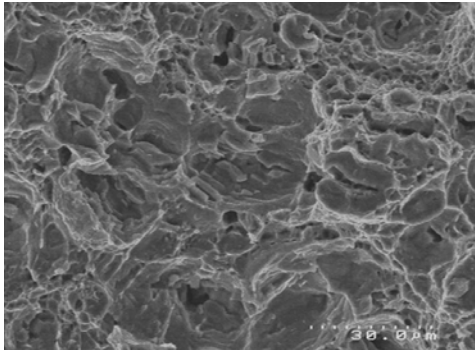
Sıcaklık

Taneler arası kırılma

Kayma düzlemleri tane sınırlarından daha zayıftır

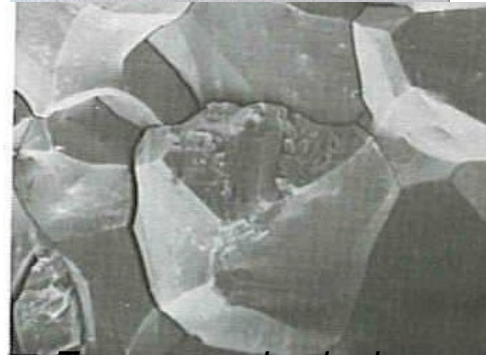
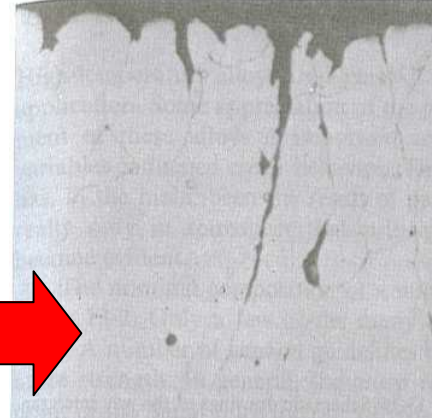


Tane içi klivaj kırılma

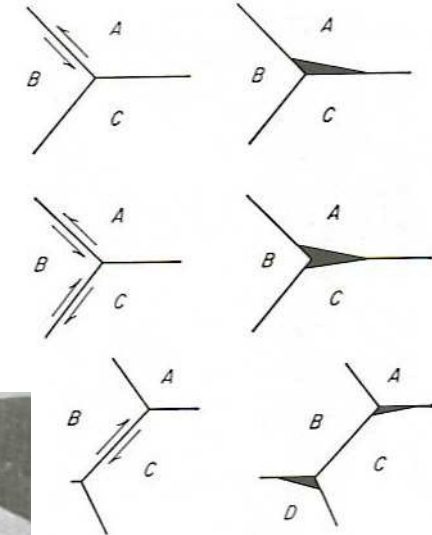


Tane içi mikro boşlukların birleşmesi

Tane sınırları kayma düzlemlerinden daha zayıftır.



Tane sınırından kırılma



Tane sınırı kayması ile taneler arası çatlak oluşumu

Not: YKS nin hemen altındaki T de tanelerarası kayma nedeniyle süneklik düşer.

EşKohezyon sıcaklığı

- (ECT)EşKohezyon sıcaklığında
- Tane sınırı Dayanımı=Tane dayanımı

Genleme Hızı



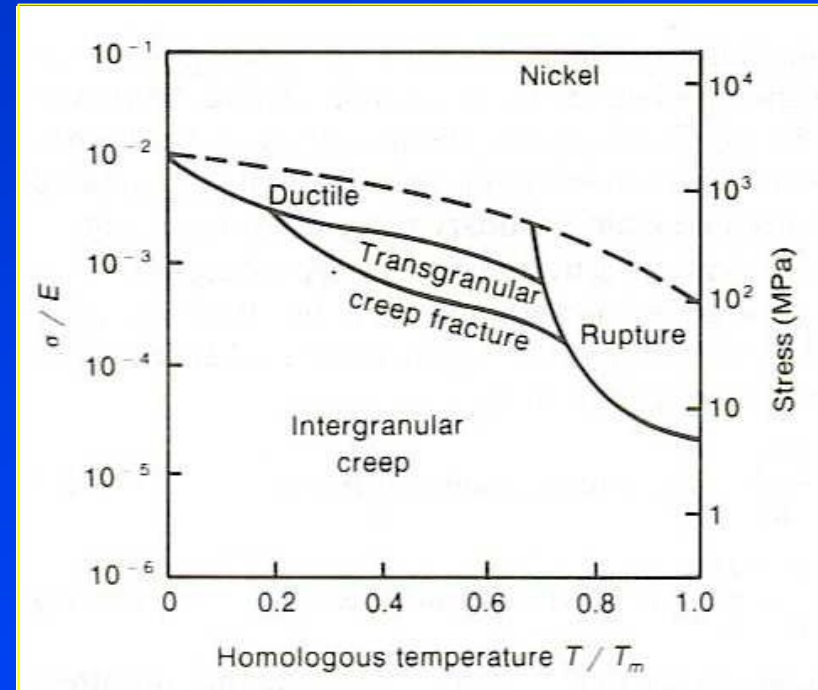
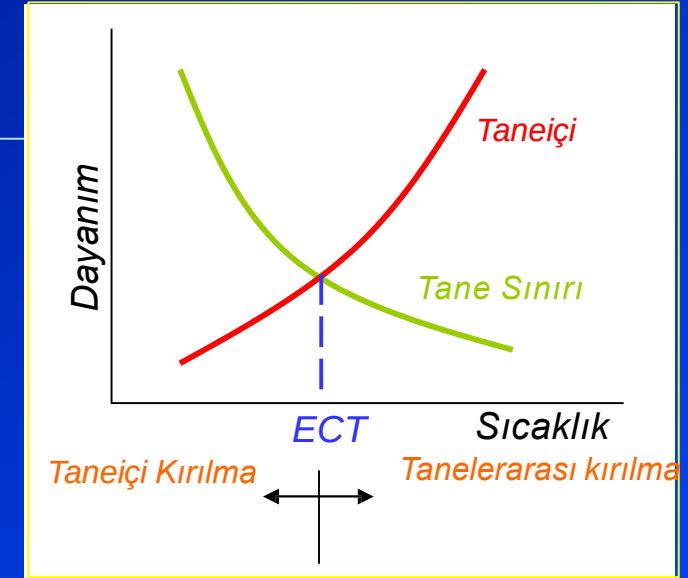
ECT



Taneler arası kırılma eğilimini artar.

- ECT'nin altında, küçük tane boyutlu malzemelerin dayanımı, tane sınırlarının yüksek yoğunluğu nedeniyle daha fazladır.
- ECT'nin üstünde, büyük tane boyutlu malzemelerin, tane sınırı kaymasına daha az eğilimli olmaları nedeniyle daha dayanıklıdırlar.

Not: Bu nedenle, yüksek sıcaklık uygulamalarında, tek kristal yapılar, önemlidir örn. nikel bazlı alaşımdan tek kristal türbin kanadı



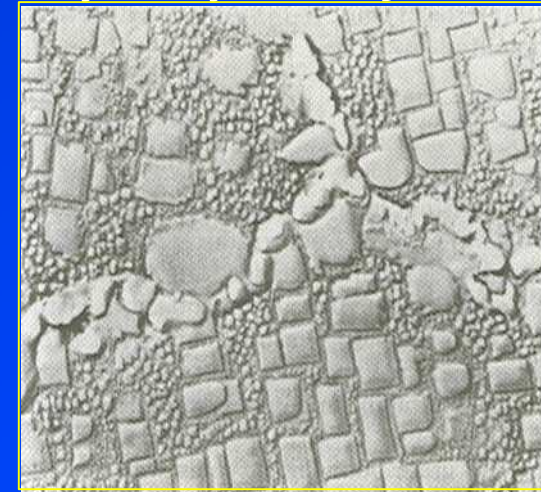
Nikel için Kırılma mekanizmaları haritası

Yüksek sıcaklık alaşımları

- **Yüksek sıcaklık alaşımları:** çalışma sıcaklıklarında gerekli özellikleri elde etmek için bunların **karmaşık mikroyapıları** vardır
- **Yüksek ergime noktalı** alaşımlar normalde yüksek sünme direncine sahiptir.
- Yüksek istiflenme hatası enerjisine sahip metaller $\Rightarrow$ kayma kolay $\Rightarrow$ **Sünme**
- Yüksek sünme direnci için yüksek termal kararlılığa sahip **ince çökeltiler** gereklidir (tane büyümesini önler) Örn(1) **Ni_3Al , Ni_3Ti or $Ni_3(Al,Ti)$** , gibi metaller arası bileşiklerin **ince çökeltilerini** içeren nikel bazlı alaşım , (2) **VC , TiC , NbC , Mo_2C veya $Cr_{23}C_6$** gibi ince karbürler içeren sünmeye dayanıklı çelikler

Drawbacks

- Sıcak iş, soğuk iş veya kaynak yaparak **imal etmek zordur** .
- **Yüksek alaşımlı metallerin** hassas döküm ile üretilmesi zordur.,



Nikel esaslı bir süper alaşımın mikroyapısı

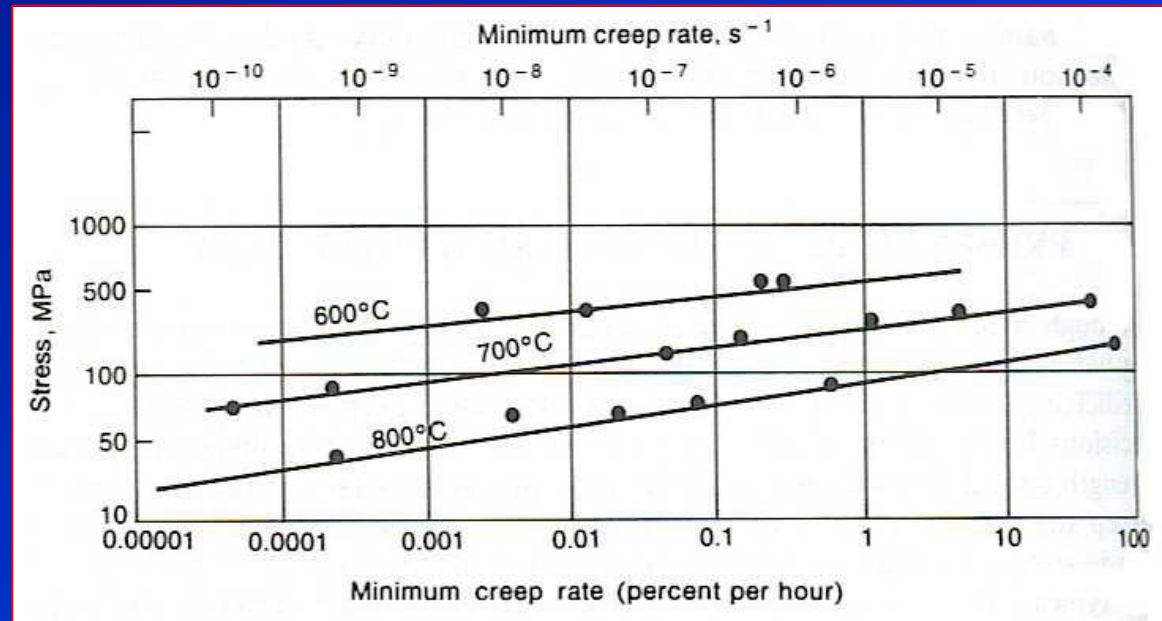
Bazı yüksek sıcaklık alaşımlarının bileşimi

Table 13-2 Compositions of some high-temperature alloys

Alloy	C	Cr	Ni	Mo	Co	W	Cb	Ti	Al	Fe	Other
Ferritic steels											
1.25 Cr-Mo	0.10	1.25	—	0.50						Bal.	
5 Cr-Mo	0.20	5.00	—	0.50						Bal.	
Greek Ascoloy	0.12	13.0	2.0			3.0				Bal.	
Austenitic steels											
316	0.08	17.0	12.0	2.50						Bal.	
16-25-6	0.10	16.0	25.0	6.00						Bal.	
A-286	0.05	15.0	26.0	1.25				1.95	0.2	Bal.	
Nickel-based alloys											
Astroloy	0.06	15.0	56.5	5.25	15.0			3.5	4.4		
Inconel	0.04	15.5	76.0							7.0	
Inconel 718	0.04	19.0	Bal.	3.0			5.0	0.80	0.60	18.0	
René 41	0.10	19.0	Bal.	10.0	11.0			3.2	1.6	2.0	
Mar-M-200	0.15	9.0	Bal.	—	10.0	12.5	1.0	2.0	5.0		
TRW 1900	0.11	10.3	Bal.	—	10.0	9.0	1.5	1.0	6.3		
Udimet 700	0.15	15.0	Bal.	5.2	18.5			3.5	4.25	1.0	
In-100	0.15	10.0	Bal.	3.0	15.0			4.7	5.5		1.0 V
TD Nickel	—	—	Bal.								2.0 ThO ₂
Cobalt-based alloys											
Vitallium (HS-21)	0.25	27.0	3.0	5.0	Bal.					1.0	
S-816	0.40	20.0	20.0	4.0	Bal.	4.0		4.0		3.0	

Mühendislik Sünme verilerinin sunumu

Sünme dayanımı, (Creep strength) kararlı bir sünme hızı (10^{-11} - 10^{-8}s^{-1}) veren belirli bir sıcaklıktaki gerilme olarak tanımlanır .



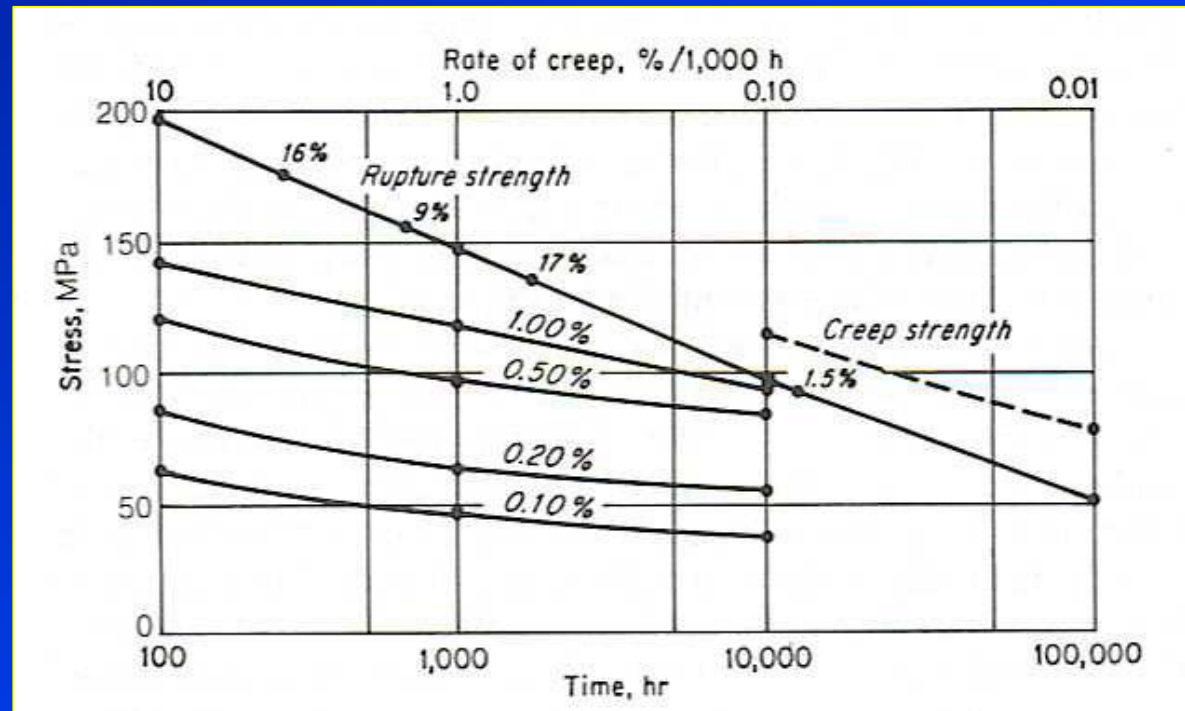
Gerilme ve minimum sünme hızı eğrisi

- **Log-log grafiği** , her bir aralıkta on - katlı bir değişikliği temsil etmesi için kullanılır

Sünme Verileri

Sürünme verileri farklı miktarlarda toplam genleme üretmek için *gerilme ve zamanın* bir grafiği olarak da sunulabilir

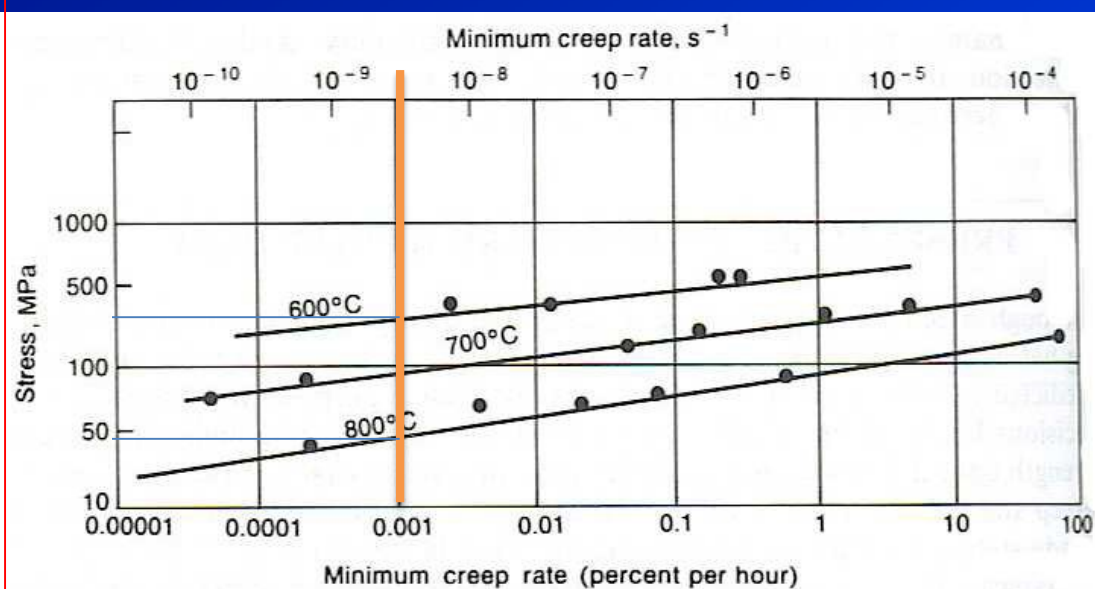
- Burada en üstteki eğri **Gerilme-Kopma eğrisidir** (Stress-Rupture).
- Her veri noktasının yanındaki yüzde, **hasarda yüzde azalmadır**.



Deformation time curve

Örnek: Tasarım kriteri 1000 saat içinde yüzde 1 uzamaya dayalı bir sünme dayanımı ise, bir 316 paslanmaz çelik için 600°C ve 800°C de çalışma gerilmesini belirleyin. Emniyet faktörü olarak 3 kullanın.

$$1000 \text{ saatte } \% 1 \text{ sünme} = 10^{-5} h^{-1} = \frac{10^{-5}}{3600} s^{-1} = 2.8 \times 10^{-9} s^{-1}$$



Gerilme ve minimum sünme hızı eğrisinden, güvenlik faktörünü 3 olarak çalışma gerilmesi aşağıdaki tablodaki gibi elde edilebilir.

Temperature	Creep strength, MPa	Working stress, MPa
600°C	210	70
800°C	30	10

Örnek: Gerilme-minimum sünme hızı eğrisi için, 100 MPa'lık bir gerilmede sünme için aktivasyon enerjisini belirleyin.

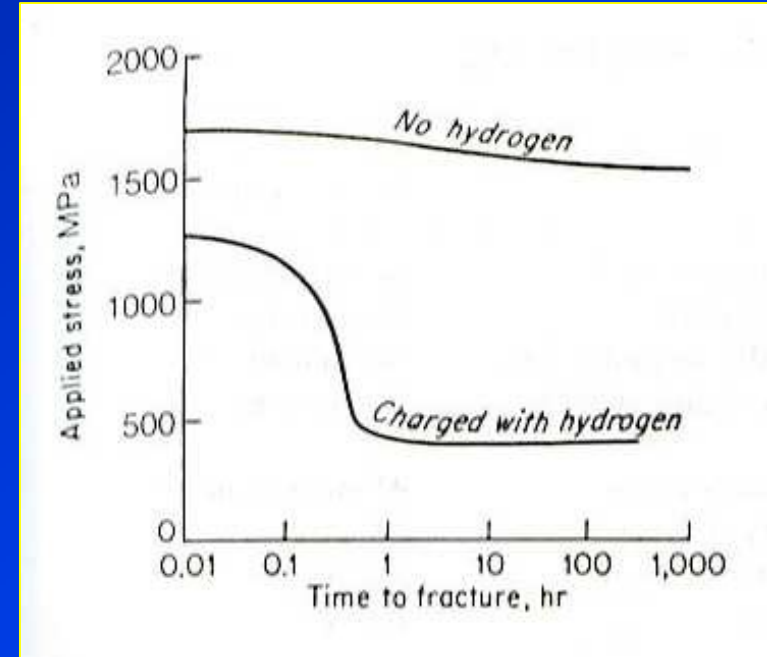
$$\begin{aligned} \text{at } T_2 = 700^\circ C = 973K; \dot{\varepsilon}_2 &= 10^{-8} s^{-1} \\ \text{at } T_1 = 800^\circ C = 1073K; \dot{\varepsilon}_1 &= 10^{-5} s^{-1} \end{aligned}$$

From Eq.2

$$Q = \frac{-R \ln(\dot{\varepsilon}_1 / \dot{\varepsilon}_2)}{(1/T_2 - 1/T_1)} = \frac{(8.3 Jmol^{-1} K^{-1}) \ln(10^3)}{1/973 - 1/1073} = 599 kJmol^{-1}$$

Metallerde Gevrekleşmeler

- *Temper gevrekliği*
- *Hidrojen gevrekliği*
- *Gerilmeli Korozyon Kırılması*
- *Sıvı metal gevrekliği*
- *Nötron gevrekliği*



Gecikmiş kırılma eğrisi

Reference

- Dieter, G.E., *Mechanical metallurgy*, 1988, SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.