

# **METAL ESASLI MALZEMELERİN MEKANİK TESTLERİ**

## **SÜRÜNME**

**Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN**

# Sürünme deneyleri

Mühendislik uygulamalarında, oda sıcaklığında çalışan cihaz ve aletler için kullanılacak malzeme cinsinin seçimi genellikle çekme deneyi sonuçları göz önünde bulundurularak yapılır. Örneğin mukavemet hesaplarında malzemenin akma dayanımı belirli bir emniyet katsayısına bölünerek hesaplarda kullanılır. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda çalışan alet ve cihazlar için malzeme seçiminde malzemenin çalışma sıcaklığındaki mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan makine ve makine parçalarına örnek olarak:

- a) Buhar türbinleri, kazanlar ve reaktör parçaları
- b) Jet motoru parçaları
- c) İçten yanmalı motorlar
- d) termokupullar
- e) Roket motorları ve balistik füze gövde parçaları gösterilebilir.

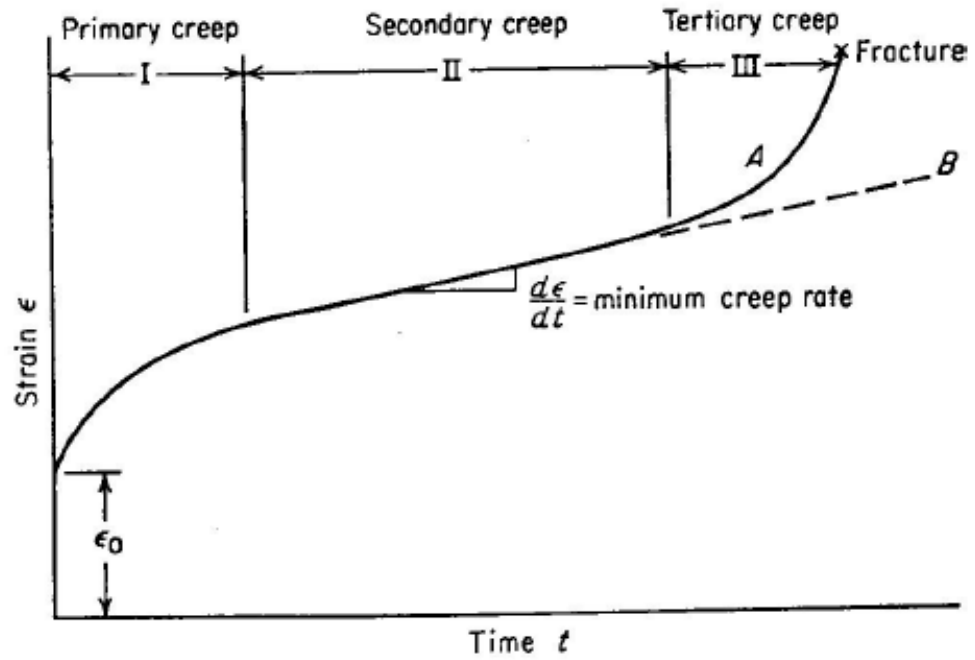
Metallerin yüksek sıcaklıklardaki özellikleri incelendiğinde, sıcaklık seviyesinin yanı sıra metallerin o sıcaklıkta tutulma süresinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, malzemenin yüksek sıcaklıklardaki dayanım, o malzemenin uğradığı birim şekil değiştirme hızı ve o sıcaklıktaki tutuma süresiyle yakından ilgilidir. Metalik malzemelerin çoğu bu şartlar altında *viskoelastik* malzeme özelliği gösterirler. Bu özellik ise metallerin bir çekme gerilmesi altında Sürünme (Creep) mekanizmasıyla şekil değiştirmesine neden olur. Bu olay benzeş sıcaklığın çok kaba olarak 0.5 veya üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Malzemelerin yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışları sürünme deneyi adı verilen bir deneyle belirlenir.

Sabit bir sıcaklık ve sabit bir gerilme (veya yük) altında, malzemedeki zamanla meydana gelen kalıcı deformasyona sürünme (creep) denir. Sürünme zamanla gelişen bir plastik deformasyon şeklidir. Sürünme deneyi için “sürekli uzama deneyi” terimi de kullanılmaktadır. Bu olay yüksek sıcaklıklarda daha hızlı meydana geldiği için, sürünme bir yüksek sıcaklık deformasyon mekanizması olarak da bilinir. Metalik malzemelerde atomların sıcaklıkla artan hareketliliği ile kristal kusurlarının sayısı ve davranışına bağlı olan sürünmede, yaygınla ağırlıkla ısıl aktive yer değiştirmeler etkin rol oynar.

Yüksek sıcaklıklarda içyapıda ve malzeme özelliklerinde meydana gelen bazı değişimler aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- a) Boş nokta yoğunluğu artar ve yayınma kolaylaşır,
- b) Dislokasyonların tırmanması ve çapraz kayması gibi yeni kayma sistemleri aktif hale gelir,
- c) Mikroyapısal kararlılık azalır. Soğuk şekil değiştirmiş malzeme yeniden kristalleşir, çökme sertleşmesine uğramış malzeme aşırı yaşlanır,
- d) Parça yüzeyi sıcaklığın da etkisiyle ortamla daha kolay reaksiyona girer ve korozyon ve tufal sorunu ortaya çıkar.

Sürünme deneyinde, standart olarak hazırlanmış numune, sabit bir T sıcaklığındaki bir fırın içerisinde çekme veya basma gerilmesi altında deformasyona uğratılır. Deformasyon miktarı zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenir. Deney prensip itibarıyla basit görünmesine karşın önemli laboratuvar koşullarının sağlanmasını gerekli kıldığından oldukça zahmetli ve maliyetlidir. Örneğin, yük ve sıcaklığın çok uzun süreler boyunca sabit kalabilmesinin sağlanabilmesi gerekmektedir. Ayrıca deneyler birkaç ay veya senelerce sürebilir. Deney süresini kısaltmak için deneyler hızlandırılmış koşullarda (yüksek sıcaklık ve yüksek gerilme değerlerinde) yapılır ve elde edilen değerlerden elverişli diyagramlar çizilir. Bu diyagramlardan okunabileceği gibi, daha uzun sürelerdeki özellikler uygun uzatmalar (ekstrapolasyon) yapılarak elde edilebilir. Sürünme deneyleri genellikle ASTM E139 standardına uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Aşağıdaki şekilde, sürünme deneyi sonucunda elde edilen tipik bir sürünme (uzama-zaman) eğrisi ile bu eğride yer alan bölgeler verilmiştir.



Tipik bir sürünme eğrisi

Şekilde görüldüğü gibi, düşük sıcaklıkta ( $T < 0.3T_m$ ) malzemeye elastik sınır altında kalacak şekilde bir  $F$  çekme yükü uygulanacak olursa elastik uzama hemen meydana gelir ve yük artırılmadığı sürece uzama sabit kalır. Aynı  $F$  çekme yükü nispeten daha yüksek bir sıcaklıkta ( $T > 0.3T_m$ ) uygulandığında,  $\epsilon_0$  uzaması meydana gelir.  $\epsilon_0$ 'nin büyük olması, sıcaklığın artması ile akma sınırının düşmesine bağlıdır.  $\epsilon_0$  uzama miktarı tümüyle elastik olabileceği gibi, elastik-plastik de olabilir. Sıcaklığın ve uygulanan yükün etkisi ile zamana bağlı olarak uzama devamlı artış gösterir ve sürünme eğrisi olarak bilinen şekildeki eğri oluşur. Söz konusu eğrinin herhangi bir noktasındaki eğimi, sürünme hızını ( $\dot{\epsilon}_s = d\epsilon/dt$ ) vermektedir.

Sürünme eğrisi incelendiğinde, üç değişik safha içerdiği görülür. Aşağıda bu bölgeler detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

**I. Sürünme Bölgesi:** Bu bölgede sürünme hızı deney süresiyle birlikte azalır. Geçici (transient) sürünme safhası da denilen bu bölgede malzemenin sürünmeye karşı olan direnci artmaktadır. Bu bölgede malzeme yükün etkisi altındadır ve deformasyonla dislokasyonların yoğunluğu artar ve buna bağlı olarak deformasyon sertleşmesi meydana gelir. Fakat öte yandan, malzeme yüksek sıcaklık olduğundan, iç gerilmeleri de bir taraftan giderilmekte ve malzeme kendine gelme imkanını kazanmaktadır. Bu nedenle malzeme birinci bölgede, deformasyon nedeniyle deformasyon sertleşmesine ve aynı zamanda yüksek sıcaklık nedeniyle toparlanma (poliganizasyon ve çapraz kayma) etkisine maruz kalır. Ancak, bu bölgede dislokasyon yoğunluğunun artmasına ve birbirlerini etkilemelerine bağlı olarak

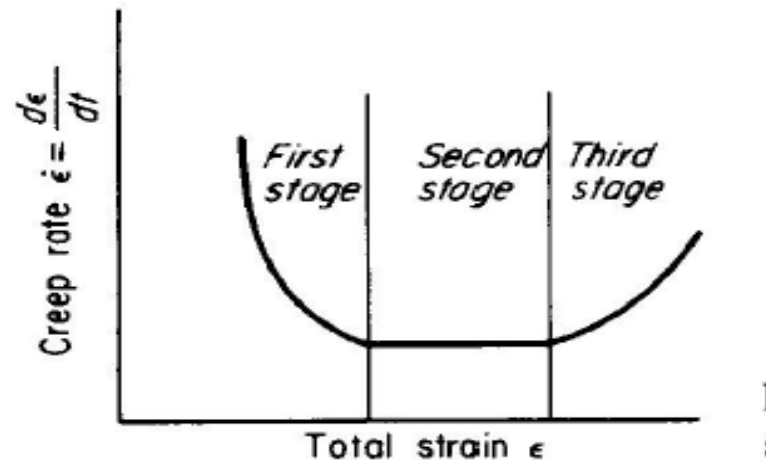
deformasyon sertleşmesi daha etkili olup sürünme hızı gittikçe düşer, yani malzemenin deformasyona karşı direnci artar. Bu aşamada yayınmanın etkisi önemsizdir.

**II. Sürünme Bölgesi (kararlı sürünme bölgesi):** Bu safha sürünme hızının sabit kaldığı devredir. Bunun nedeni, bu bölgede deformasyon sertleşmesi ile kendine gelme (toparlanma) hızlarının birbirine eşit olmasıdır. Bu nedenle bu bölgeye, “kararlı sürünme (steady state creep)” bölgesi veya “vizkoz sürünme (viscous creep)” denilmektedir. Bu devrede, deformasyonun sağladığı dayanım artışı (deformasyon sertleşmesi), yapıdaki toparlanma ve gevşeme mekanizmalarının devreye girmesiyle dengelenerek sürünme hızının sabit kalması sağlanmaktadır. Sürünme hızının kazandığı bu kararlı değer aynı zamanda deney sırasında ulaşılabilecek en düşük değer olduğundan bu bölgedeki sürünme hızı “en düşük sürünme hızı (minimum creep rate)” olarak isimlendirilir. Bu değer, sürünmenin esas alındığı tasarımlarda çok yararlanan bir özelliktir. Teknik uygulamalarda kararlı sürünme bölgesi büyük önem taşır. Çünkü öngörülen işletme koşulları ve süresine göre I.bölgede kalınması ekonomik açıdan, III. bölgeye girilmesi de kırılmaya karşı güvenlik azalacağı için istenmez. Bu bölgede temel mekanizma olan dislokasyonların tırmanması yardımıyla engeller ve hareketsiz dizlokasyonlar aşılabilir şekilde şekil değiştirmenin devamı (sürünme) sağlanır.

Bir malzemede belirli bir sıcaklıkta, genellikle %0.00001 veya %0.001 olarak kabul edilen sabit bir kararlı sürünme hızına ( $\dot{\epsilon} = 10^{-7} - 10^{-5}$  1/saat) sebep olan gerilme “sürünme mukavemeti” olarak isimlendirilir. Alternatif olarak sürünme mukavemeti, belirli bir sıcaklıkta %1 birim şekil değişimine neden olan gerilme olarak da tarif edilebilir.

**III. Sürünme Bölgesi:** Bu bölge numunenin boyun vermesiyle başlar ve kopuncaya kadar devam eder. Bu devrede giderek artan sürünme hızı kısa zamanda kırılmaya neden olur. Boş yer oluşumu ve tane sınırlarındaki şekil değişiminin kuvvetlenmesi (tane sınırı çatlakları) hız artışının en önemli nedenidir. Bu safhada, parçanın tane sınırlarında çatlaklar ve boşluklar oluşmaya başlar ve bu da etkin yük taşıma kesitini azaltır. Parçanın bir yerinde büzülme başlar ve yük taşıyıcı gerçek kesit alanı azalır, sonra yumuşama olayı pekleşmeden daha yüksek bir hızla ilerlemeye başlar. Ayrıca bu safhada, yapıdaki çökeltilerin aşırı büyümesi, yeniden kristalleşme veya fazlar arası yayınma karakteristiğinin değişmesi gibi olayların varlığı da görülmektedir. Bu bölgenin sonunda, kesit öyle bir noktaya gelir ki, artık uygulanan yük taşınmaz ve numune kırılır.

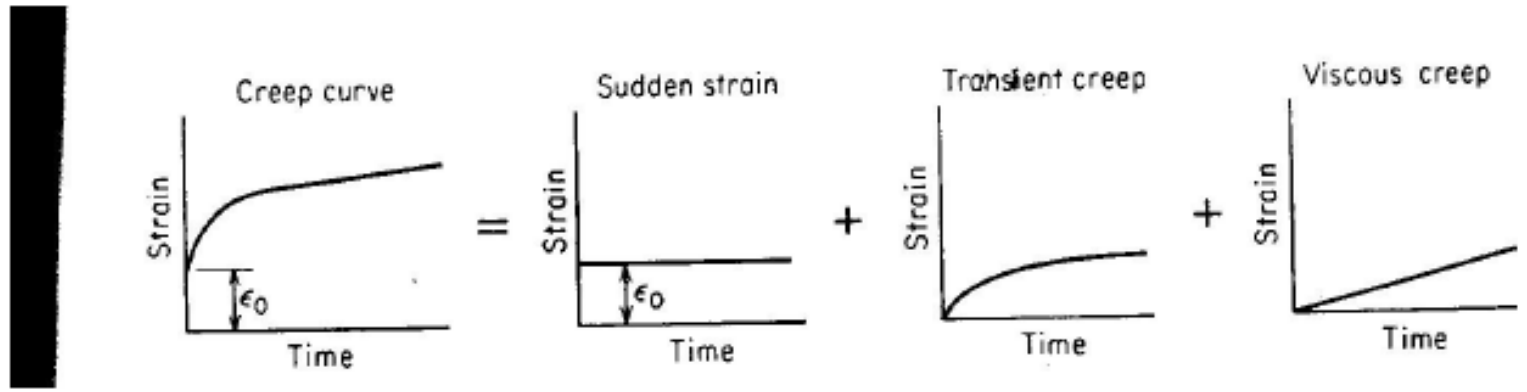
Aşağıdaki şekilde, deformasyon hızının deformasyon miktarı ile değişimi verilmiştir. Deformasyon hızındaki bu değişim yukarıda açıklanan yapısal değişimler ile ilgilidir.



Şekil 4.2. Sürünme hızının toplam deformasyon miktarı ile değişimi.



Aşağıdaki şekilde karakteristik sürünme eğrisinin üçüncül sürünme bölgesi dışında kalan bölümü ve bunu oluşturan bileşenleri verilmiştir. Burada birincil bileşen  $\epsilon_0$  ile gösterilen ani birim şekil değişimidir ve bu malzemenin deney için ilk yüklendiği anda meydana gelmektedir. İkinci bileşen ise geçici sürünme sırasında oluşan şekil değişimi miktarını vermektedir. Son bileşen ise viskoz sürünme ile oluşan sabit hızdaki sürünme birim şekil değişimini şematik olarak vermektedir. Her üç safhada gerçekleşen birim şekil değişimlerinin süperpozisyonu neticesinde karakteristik sürünme eğrisi elde edilmektedir. Bu eğri matematiksel olarak Garafalo tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.



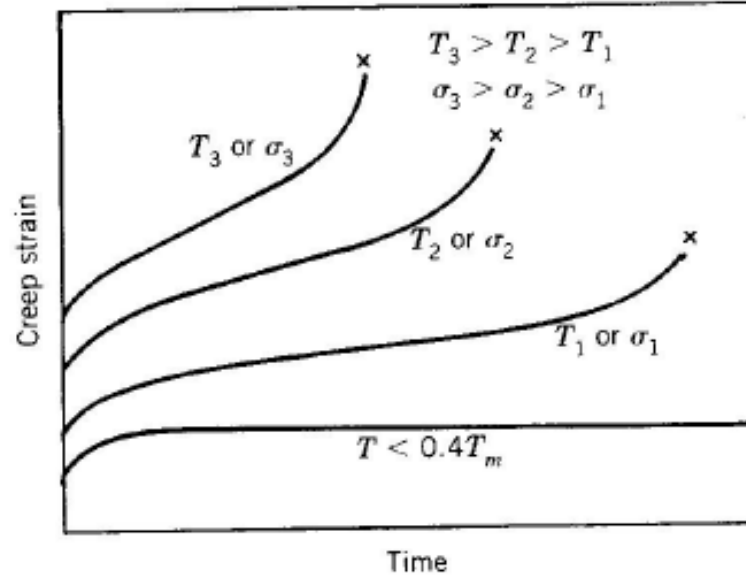
Şekil 4.3. Sürünme eğrisinin bölgelerine denk gelen uzama-zaman eğrileri

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_t(1 - e^{-r.t}) + \varepsilon_s t$$

Burada,  $\varepsilon_t$ : geçici sürünmedeki birim şekil değiştirme miktarı  
 $r$ : bir malzeme sabiti

$\varepsilon_s$  : kararlı bölgedeki sürünme hızı (en küçük sürünme hızı)

Sürünme eğrisi, uygulanan deney sıcaklığı ve gerilmeden önemli ölçüde etkilenmektedir. Aşağıda, gerilme ve sıcaklığın sürünme eğrisi üzerindeki etkileri verilmiştir.

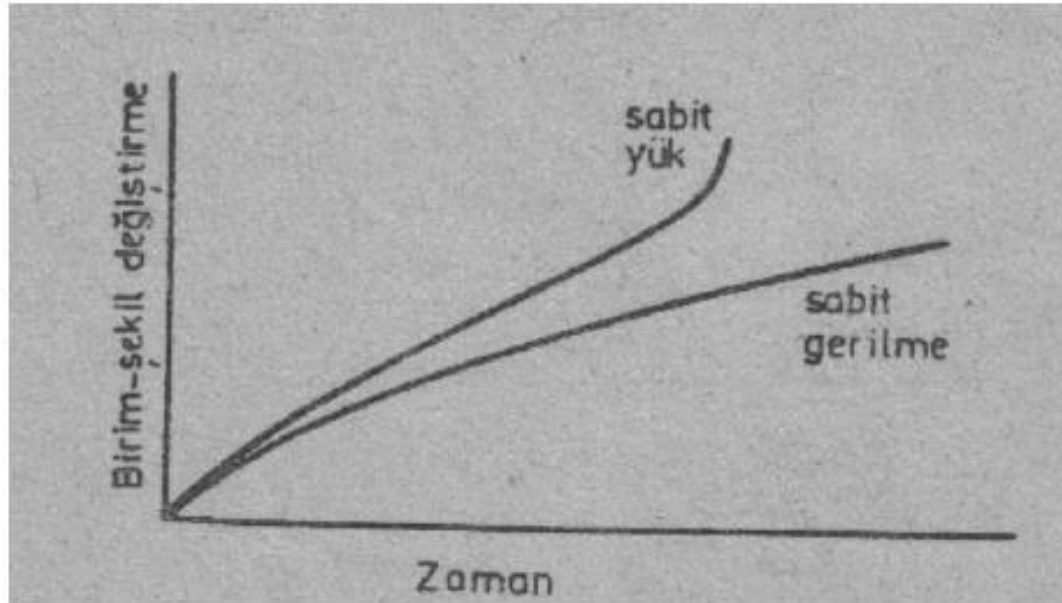


Gerilme ve sıcaklığın sürünme eğrisine etkisi

Bu eğrilerden görüldüğü gibi, birincil sürünme daha çok düşük gerilme seviyelerinde etkin rol oynamaktadır. Gerilme artırıldıkça, ikincil ve hatta üçüncül safhalar kendilerini hissettirmeye başlamaktadır. Gerilme artışı aynı zamanda, en düşük sürünme hızının da artmasına neden olmaktadır. Aynı durum, sıcaklık artışında da gözlenmektedir.

Sürünme olayında, malzemenin şekil değiştirmesi ve şekil değişiminin neden olduğu deformasyon sertleşmesi birbirine ters yönde etki ederler. Düşük sıcaklıklarda deformasyon sertleşmesi hakim olduğundan, sürekli bir sürünme olayı ancak uygulanan gerilmenin deformasyon sertleşmesini yendiği durumlarda görülür. Deformasyon sertleşmesinin hakim olduğu durumlarda ikinci bölgeye ait eğri yatay bir çizgi olur. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin deformasyon hızı, deformasyon sertleşme hızına göre daha büyük olduğundan sürünme daha düşük gerilmelerde olur.

Sürünme deneyleri sabit yük veya sabit gerilme uygulanarak yapılmaktadır. Bu iki tür deney arasında önemli farklar mevcuttur. Yükün sabit olduğu sürünme deneylerinde numunenin kesit alanının sürekli olarak daralması nedeniyle, gerçek gerilme ve sürünme hızı artan birim şekil değişimi ile artmaktadır. Bu nedenle, sabit yük ve sabit gerilme altında yapılan sürünme deneylerinden elde edilen eğriler birbirinden oldukça farklıdır. Söz konusu iki sürünme değerleri arasındaki diğer önemli fark, sürünme eğrisindeki III. Bölgenin, sabit gerilme altında yapılan deneylerde oldukça gecikmesidir.



Şekil 4.5. Sabit yük ve sabit gerilme altında yapılan sürünme deneylerinden elde edilen sürünme eğrileri

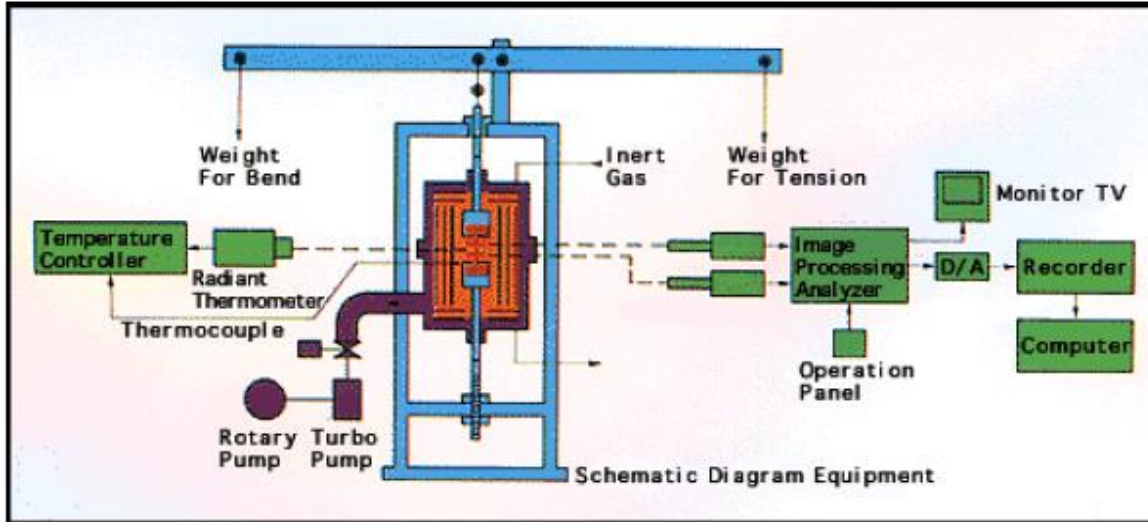
Sabit gerilme altında yapılan sürünme deneylerinde, numuneye uygulanan yük, numunenin kesit alanındaki azalmaya bağlı olarak düşer. Sabit gerilmeli sürünme deneyleri bilimsel çalışmalar açısından oldukça önemlidir. Mühendislik uygulamalarında ise sabit yük altında yapılan sürünme deneyleri çok daha fazla önem kazanmaktadır.

#### 4.1. Sürünme deney makinesi

Sürünme deneylerinin gerçekleştirildiği makinelerde,

- Bir sıcaklık ortamı (elektrik dirençli fırın) ve sıcaklığın kontrolünü sağlayan kontrol sistemi,
- Deney sırasında meydana gelen uzamayı sürekli algılayacak sistem (ekstansometre ve bilgisayar)
- Kuvvet uygulama sistemi

Aşağıdaki şekilde tipik bir sürünme deney makinesinin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 4.6. Sürünme deney sistemi

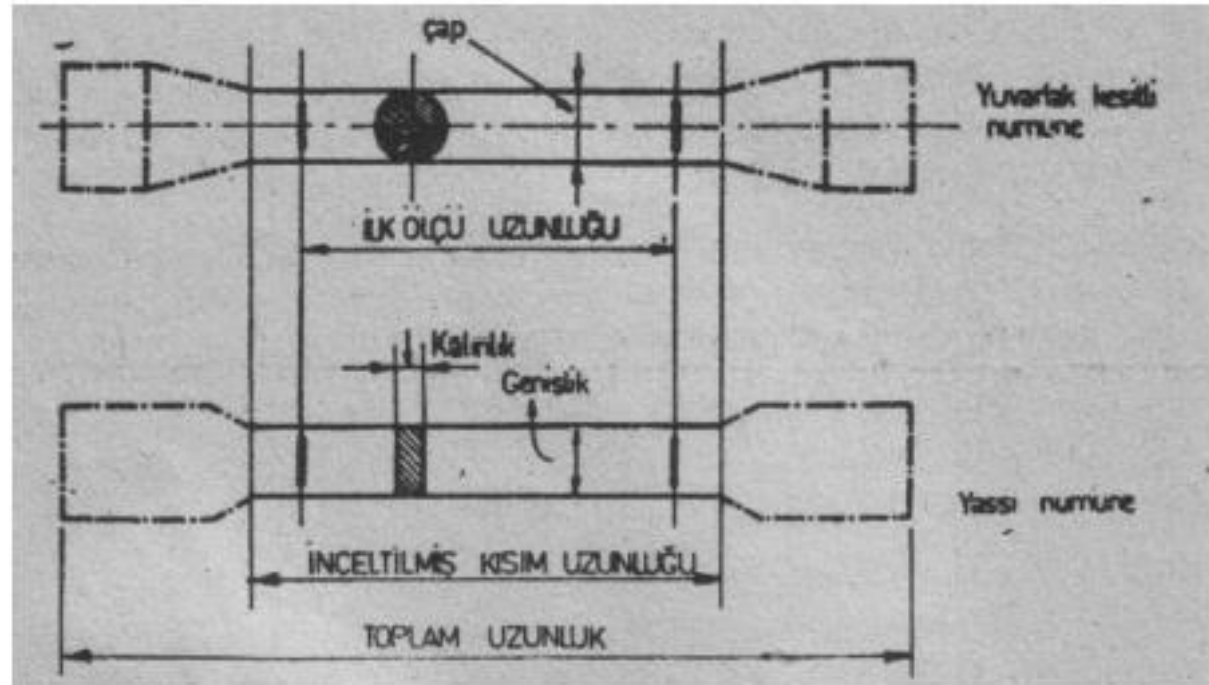
Fırın içerisinde oksitlenmenin meydana gelmesi istenmiyorsa, sisteme vakum veya soy gaz verme sistemi de ilave edilir. Fırın iki ucundan kapatılarak havanın dolaşımı engellenir ve bu sayede hem oksitlenme önlenir hem de fırının sabit sıcaklıkta kalması sağlanır.

Sıcaklık ölçümleri genellikle termokupl ile yapılır. Ortam sıcaklığı, termokupl ile ölçülen sıcaklığın bir kontrol ünitesi ile işlenmesi sayesinde sıcaklık sabit tutulur.

Kuvvet mümkün olduğu kadar numune ekseninde uygulanır ve yük değişimleri  $\% \pm 1$  mertebelerinden fazla olmamalıdır.

### 4.3. Deneysel Numuneleri

Numuneler, iç yapı ve özellikler açısından kullanılacak malzemeyi tam yansıtmalıdır. Çekme deneyi için kullanılan numuneler sürünme deneyi için de uygundur. Diğer boyutlar aynı kalmak şartıyla, ölçü kesiti ile baş kısmın birleşme yerlerinde kavis yerine uygun ölçülerde koniklik bir kısımda bulunabilir. Baş kısmın kesit alanı diğer kısmın kesit alanından %50 daha fazla olmalıdır. Böylece özellikle çentik duyarlılığı yüksek olan malzemelerin baş kısımdan kopmaları önlenir. Daire kesitli numunelerin çeneler tarafından daha iyi kavranması için numunenin baş kısımlarında vida açılması veya basamaklar yapılması yararlı olabilir.



Şekil 4.7. Sürünme deneylerinde kullanılan daire ve dikdörtgen kesitli numuneler.

#### 4.4. Sürünme Mekanizmaları

Sürünmeye olayı sırasında etkin rol oynayan mekanizmalar şu şekilde sıralanabilir.

- a) Kayma
- b) Dislokasyon sürünmesi (dislocation creep)-üssel ilişkili sürünme
- c) Yayınma sürünmesi (diffusion creep)
- d) Tane sınırı kayması (grain boundary sliding)
- e) Alt tane oluşumu (sub-grain formation)

#### 4. 5. Sürünme hasarı ve sürünme kırılması

Sürünme olayında hasar, iç boşlukların oluşumu ile çoğalır. Hasar öncelikle sürünme eğrisinin III. Bölgesinde başlar ve artan bir hızla ilerler. Boşluklar büyüdükçe numunenin kesiti de daralır ve sabit yük altında gerilme artar. Metallerin düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe tane içi kırılma karakteri taneler arası kırılma karakterine dönüşmektedir. Tane içi kırılma, kristalin kayma düzlemlerinin tane sınırlarına göre daha zayıf olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Aynı şekilde taneler arası kırılma da tane sınırlarının kayma düzlemlerine göre daha zayıf olma durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu durum aşağıda şematik olarak verilen “*eş bağlilik sıcaklığı* (equi-cohesive temperature) kavramıyla açıklanmaya çalışılmaktadır.



#### 4.6. Sürünme deneyinden elde edilen veriler

a) **Sürünme Dayanımı (Creep strengt):** Sürünme aralığındaki belirli bir sıcaklıkta, bir saatte %0.00001 veya %0.001'lik sürünme birim şekil değişimine neden olan gerilme değerine sürünme dayanımı denir.

c) **Sürünme kırılması dayanımı (Creep repture strengt)**

Sürünme aralığındaki belirli bir sıcaklıkta, genellikle 1000, 10.000 veya 100.000 saatte sürünme kırılması hasarını oluşturan gerilme değeridir.

c) **İkincil veya kararlı (en küçük) sürünme hızı (Minimum creep rate)**

Sürünme aralığında belirli bir sıcaklıkta, sabit bir gerilmenin kararlı sürünme bölgesinde oluşturduğu sürünme hızıdır. Genellikle bu değer uzun süren deneyler sonucunda elde edilir. Kararlı sürünme hızı sürünme eğrisinin doğrusal kısmının eğimi olup,  $\dot{\epsilon}_k = \frac{d\epsilon}{dt}$  bağıntısı ile verilir. Ancak metalik malzemelerin çoğunda ikincil sürünme hızı aşağıdaki üniversal bağıntıyla hesaplanır.

$$\dot{\epsilon}_k = A \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_s}{RT}\right)$$

Burada;  $\dot{\epsilon}_k$  : kararlı sürünme hızı

A : malzeme sabiti

$\sigma$  : uygulanan gerilme

n : gerilme üssü

$Q_s$  : sürünme için aktivasyon enerjisi

R : gaz sabiti

T : mutlak sıcaklık

### 5.7. Sürünmeye Dayanıklı Malzemelerin Dizaynı

Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen alaşımların geliştirilmesi esas itibariyle zahmetli ve uzun deneysel çalışmaları gerektiren bir olaydır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, yüksek sıcaklıklarda dayanımın artırılmasını sağlayacak aşağıdaki önlemler alınabilir.

- a) Malzeme olarak yüksek ergime noktasına ve düşük yayınma özelliğine sahip alaşımlar seçilmelidir.
- b) Tane sınırı kayması mekanizmasının sürünme olayındaki etkisinin azaltılması için toplam tane sınırı miktarının en düşük olduğu büyük taneli malzemeler seçilmeli veya elde edilmelidir. Teorik olarak, sürünme açısından en elverişli malzeme tek taneli olmalıdır.
- c) Taneleri, uygulanan gerilme yönünde uzatılmış yapı oluşturularak gerilmeye dik ve 45°'lik açılarda uzanan tane sınırları sayısının en aza indirilmesi sağlanmalı, böylece tane sınırı kayması mekanizmasının etkin bir şekilde çalışmasına mani olunmalıdır.

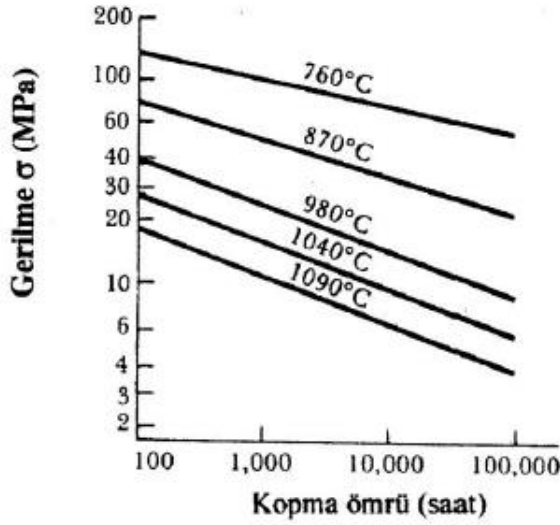
- d) Tane sınırlarında ve tane içerisinde kararlı çökelti (ikinci faz parçacıkları) oluşturarak tane sınırı kayması ve dislokasyon sürünmesi mekanizmalarının etkin bir şekilde çalışmasına mani olunmalıdır.
- e) Alaşımların yüksek sıcaklıktaki ortamın aşırı oksitleyici etkisinden bir ölçüde kurtulabilmesi için yüzeyine koruyucu kaplama uygulanması yapılmalıdır.
- f) Alaşıma yüksek sıcaklıkta özelliğinin kolay kaybetmeyen,  $Al_2O_3$  (alümina),  $SiO_2$  (silika)  $ThO_2$  (torya) gibi oksit tozları katılmak suretiyle dispersiyon sertleşmesi sağlanabilir.
- g) Alaşım vakum ortamında dökülerek bileşimi ve katışkı miktarı daha kolay kontrol edilebilir.

Sürünme ihtimali olan ortamlarda oldukça yaygın olarak kullanılan gerek kullanıldıkları sıcaklık ve gerekse içerdikleri alaşım elementleri itibariyle aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler.

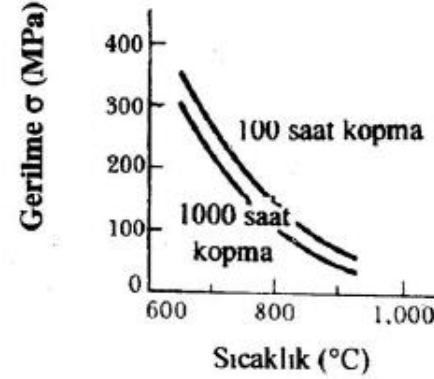
- a) Ferritik çelikler (500 °C'ye kadar)
- b) Ostenitik çelikler (650 °C'ye kadar)
- c) Nikel esaslı süper alaşımlar (1000 °C'ye kadar)
- d) Kobalt esaslı süper alaşımlar (1100 °C'ye kadar)
- e) Seramik malzemeler

Sıcaklık aralıkları ve bu aralıklarda kullanılan tipik malzemeler [Ashby-195]

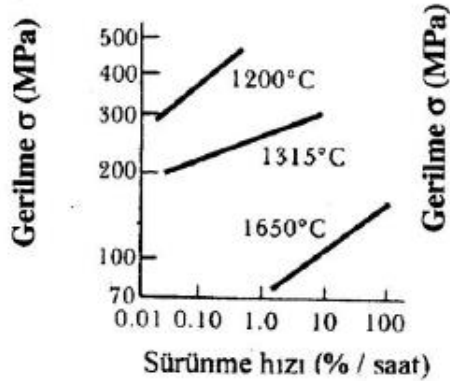
<i>Temperature range</i>	<i>Principal materials*</i>	<i>Applications</i>
Cryogenic: -273 to -20°C	Copper alloys Austenitic (stainless) steels Aluminium alloys	Superconduction Rocket casings, pipework, etc. Liquid O <sub>2</sub> or N <sub>2</sub> equipment
-20 to 150°C	Most polymers (max temp: 60 to 150°C) Magnesium alloys (up to 150°C) Aluminium alloys (up to 150°C) Monels and steels	Civil construction Household appliances Automotive Aerospace
150 to 400°C	PEEK, PEK, PI, PPD, PTFE and PES (up to 250°C) Fibre-reinforced polymers Copper alloys (up to 400°C) Nickel, monels and nickel-silvers	Food processing Automotive (engine)
400 to 575°C	Low alloy ferritic steels Titanium alloys (up to 450°C) Inconels and nimonics	Heat exchangers Steam turbines Gas turbine compressors
575 to 650°C	Iron-based super-alloys Ferritic stainless steels Austenitic stainless steels Inconels and nimonics	Steam turbines Superheaters Heat exchangers
650 to 1000°C	Austenitic stainless steels Nichromes, nimonics Nickel based super-alloys Cobalt based super-alloys	Gas turbines Chemical and petrochemical reactors Furnace components Nuclear construction
Above 1000°C	Refractory metals: Mo, W, Ta Alloys of Nb, Mo, W, Ta Ceramics: Oxides Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO etc. Nitrides, Carbides: Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiC	Special furnaces Experimental turbines



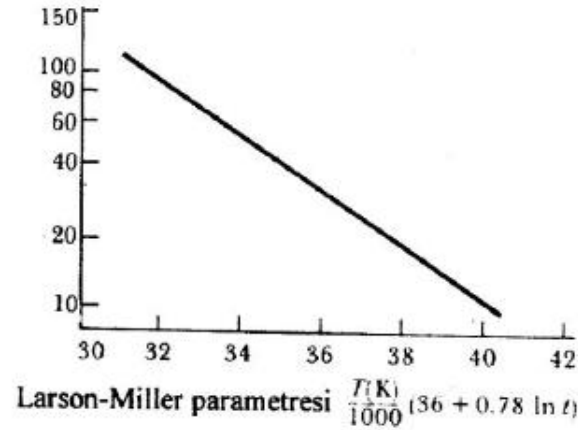
(a)



(b)



(c)



(d)

Bir dizi sürünme deneylerinden elde edilen sonuçlar. (a) Bir demir-krom-nikel alaşımı için gerilme-kopma eğrisi, (b) Isı-dirençli bir nikel alaşımı için 100 saat veya 1000 saat kopma eğrileri, (c) bir titanyum alaşımı için minimum sürünme hızı eğrisi, (d) sünek (sfero) dökme demir için Larson-Miller parametresi.

## KAYNAKÇA

- 1) Chandler, H; Hardness Testing, Second Edition, ASM International, United States of America, 1999.
- 2) Kayalı, E.S.; Ensari, C. ve Dikeç, F.; Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, İ.T.Ü. Kimya Metalürji Fa. Ofset Atölyesi, İstanbul, 1990.
- 3) Güleç, Ş. ve Aran, A.; Malzeme bilgisi, Cilt 1, TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Gebze, 1988.