

- Yorulma ömrünü geliştirmenin en etkili metodlarının birisi parça yüzeyinde kalıntı basma gerilmesi oluşturmaktır.
- Bu genellikle bilyalı dövme ya da haddelerin dış yüzeylerinin yuvarlamasıyla elde edilir.
- Bilyalı dövmenin avantajı büyük ve dış hatlara ya da düzensiz yüzeylere uygulanabilir olmasıdır.
- Bilyalı dövmede, ince çelik, dökme demir ya da cam bilyeler yüksek hızlarda yüzeyine tatbik edilir.
- Bilyalı dövme sadece hassas şekilde işlenmiş malzemelerin özelliklerini güçlendirmez, aynı zamanda yorulma dayanımı ve diğer mekanik özellikleri kötüleştiren işleme tekniklerinden kaynaklı zayıflıkları güçlendirir.

Yorulma dayanımına etki eden faktörler

- Malzemenin çekme dayanımı arttıkça (Yorulma ömrü artar)
- Ortalama gerilme seviyesi
- Ortam şartları (korozyon ortamı vs.)
- Yüzey pürüzlülüğü artarsa (Yorulma ömrü azalır)
- Sıcaklık artarsa (yorulma ömrü azalır)

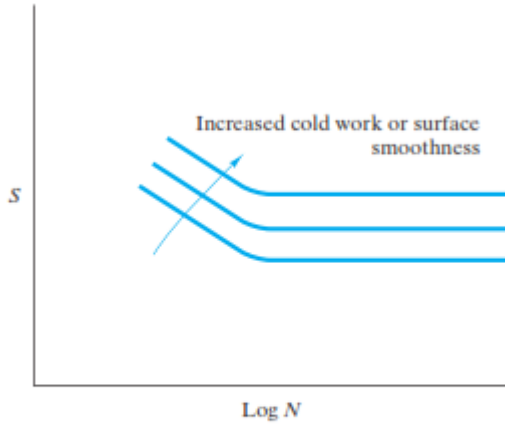


FIGURE 8.17 Fatigue strength is increased by prior mechanical deformation or reduction of structural discontinuities.

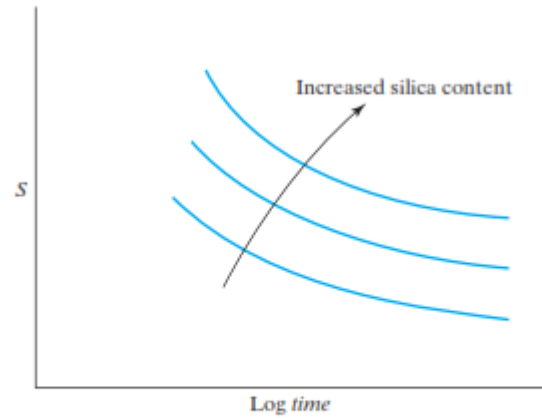


FIGURE 8.18 The drop in strength of glasses with duration of load (and without cyclic-load applications) is termed static fatigue.

Comparison of Fatigue Strength (F.S.) and Tensile Strength (T.S.) for Some of the Alloys of Table 6.1

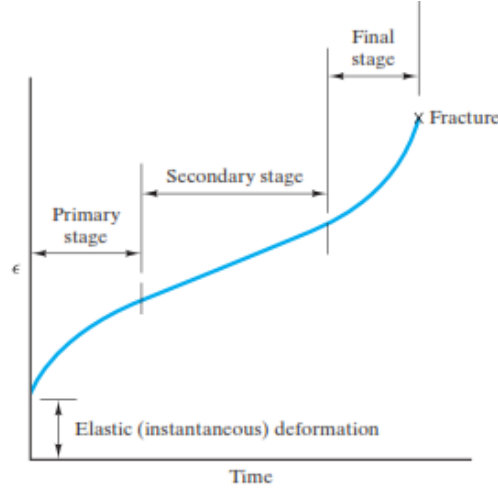
Alloy	F.S. (MPa)	T.S. (MPa)
1. 1040 carbon steel	280	750
2. 8630 low-alloy steel	400	800
3. a. 304 stainless steel	170	515
7. a. 3003-H14 aluminum	62	150
8. b. AM100A casting magnesium	69	150
9. a. Ti-5Al-2.5Sn	410	862
10. Aluminum bronze, 9% (copper alloy)	200	652
11. Monel 400 (nickel alloy)	290	579
12. AC41A zinc	56	328

Sürünme

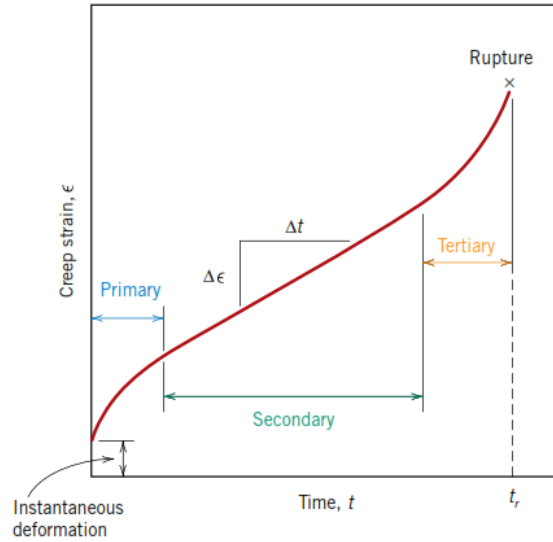
- Sabit sıcaklıkta, sabit yük veya sabit gerilme altında tutulan malzemelerin zamanla kalıcı olarak şekil değişimine uğraması olayına sürünme denir.
- Sürünme metallerde mutlak ergime sıcaklığının yaklaşık %30 u kadardır. Seramikler de ise %40 ın üzerinde meydana gelir. ($>0,4T_e$ genelleme)
- Sürünme deneyi sabit yük ve sıcaklıkta meydana gelen uzama miktarı ölçümü ile yapılmaktadır.
- Buhar kazanları, buhar türbinler, jet motorları, balistik füzeler, termokupl vs. çalışma koşullarında sürünmeye maruz kalırlar.
- Sürünme de kırılma taneler arası boşluk oluşumu ve difüzyonu ile olur.
- Sürünmede etkin 2 mekanizma vardır.
- Bunlardan biri deformasyon sertleşmesi (pekleşme), diğeri ise toparlanmadır.

Sürünme 4 evrede meydana gelmektedir.

1. Ani uzama (yüklemeyeyle beraber)
2. Birincil sürünme evresi
3. İkincil (kararlı) sürünme evresi
4. Üçüncül sürünme evresi



- Birincil sürünme evresinde pekleşme hızı, toparlanma hızından daha büyüktür. Bu nedenle bu evrede sürünme hızı giderek azalmaktadır.
- Kararlı sürünme adımında pekleşme ve toparlanma hızları yaklaşık birbirine eşittir. Bu nedenle sürünme hızı hemen hemen sabittir.
- Son evrede ise numune boyun vermeye başlar ve yük taşıyan gerçek kesit alanı azalır. Bu evrede yumuşama hızı, pekleşme hızını geçer ve bu nedenle şekil değişim hızı numune kırılıncaya kadar sürekli artış gösterir.
- Genellikle tane sınırlarının kayması ile tane köşelerindeki boşluklar kırılmaya sebep olur. Bu da sürünmede kaba taneli yapının daha uygun olduğunu göstermektedir.

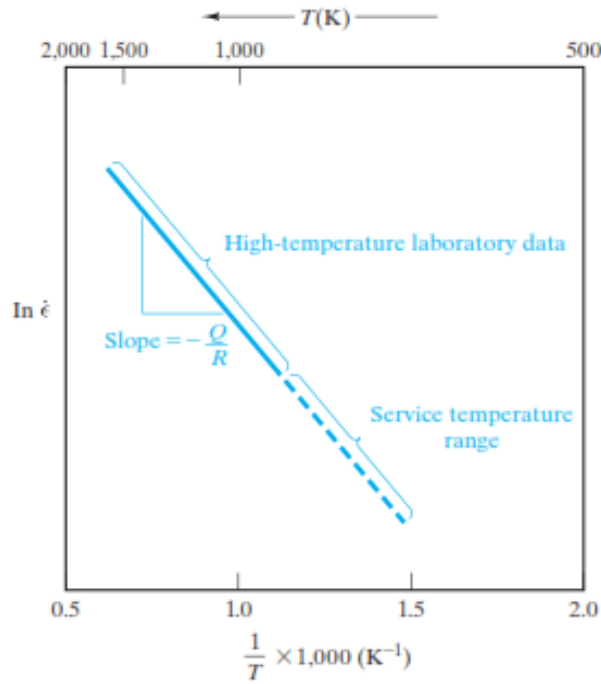


$$\dot{\epsilon}_S = K_1 \sigma^n \text{ (Kararlı sürünme hızı)}$$

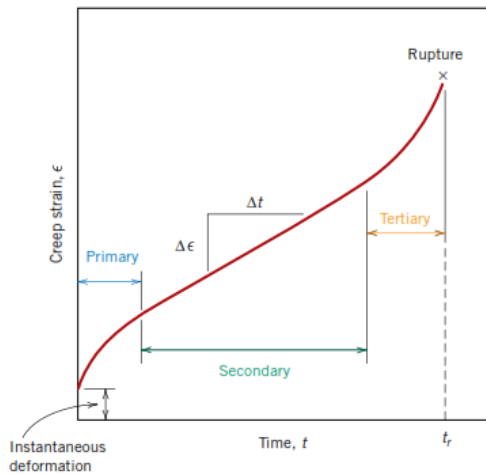
Burada K_1 ve n malzeme sabitleridir, $\dot{\epsilon}_S$ ve σ gerilmenin logaritması alınarak çizilen grafiğin eğimi alınarak n hesaplanabilir.

$$\dot{\epsilon}_S = K_2 \sigma^n \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right)$$

Burada K_2 ve Q_c malzeme sabitleridir. Q_c aktivasyon enerjisidir.



- Sünek malzemelerde sabit yük yerine, sabit gerilme uygulamak suretiyle üçüncül sürünme evresi önlenerek sürünme ömrü artırılabilir.



- Sürünme için en önemli parametre kararlı sürünme hızıdır ($\dot{\epsilon}_s$). 2. Bölgenin eğimi alınarak $(\Delta\epsilon)/\Delta t$ hesaplanmaktadır.

- Seramikler sürünme yönünden birçok metalden daha iyidir. Fakat difüzyon mekanizmaları metallere nazaran daha karışıktır.
- Anyon ve katyonların farklı difüzyonları gibi sebeplerden yorumlamak zordur.
- Tane sınırı yine seramikler içinde kritik faktördür.
- Tane sınırlarında kaymanın kolay olması ve mesela refrakter seramiklerde safsızlıklardan oluşacak camsı fazların kolay kayma göstermesi sürünmeyi olumsuz etkilemektedir.
- Polimerlerde önemli olan tasarım kriterlerinden biride gerilme gevşemesidir. Gerilme gevşemesi sabit birim şekil değiştirme altında malzemelerde zamana bağlı gerilmenin azalmasıdır. (Viskoz akış mekanizması) Örn olarak, kauçuğun yük altında uzun süre tutulduktan sonra geri eski haline gelememesi gösterilebilir.

Creep-Rate Data for Various Polycrystalline Ceramics			
Material	Load (MPa)	Temperature (°C)	$\dot{\epsilon}$ [mm/(mm·h) $\times 10^6$]
Alumina	48.9	1,300	276
Alumina	24.9	1,300	11.5
Alumina	13.1	1,300	2.7
Beryllia	12.4	1,300	300
Magnesia (slip cast)	12.4	1,300	330
Magnesia (hydrostatic pressed)	12.4	1,300	33.0
Mullite (aluminosilicate)	100	1,424	1,440
Mullite (aluminosilicate)	100	1,366	252
Mullite (aluminosilicate)	100	1,307	23.4
Spinel (magnesia aluminate)(2 – 5 μ m)	12.4	1,300	263
Spinel (magnesia aluminate)(1 – 3 mm)	12.4	1,300	1.0
Thoria	12.4	1,300	1,000
Stabilized zirconia	12.4	1,300	30.0

Sürünmeye karşı dayanım için

1. Malzeme seçimi (T_m yüksek olmalı)
2. Dislokasyon hareketlerine max. engel (alaşımlama, çökelme vs.)
3. Yüksek latis dayanımı
4. Büyük tane
5. Tane sınır kaymalarını yavaşlatıcı çökelme

Örneğin, *ampul tasarımında kullanılan filamentlerin yüksek sürünme direncine sahip olması istenir. Fakat ısıyla beraber çok hızlı şekilde tane büyümesi meydana gelerek sürünme görülür. İkinci faz ilavesi ile tane büyümesi yavaşlatılmalıdır. W filamentin tane büyümesini engellemek için ThO₂ sert refrakter maddeler ilave edilmektedir. Çok az bir miktar ThO₂ ilavesi ile bile W tane büyümesini nasıl etkilediği şekilde görülmektedir.*

Malzeme seçiminde termal, elektrik, optik ve çevresel özellikler

- Isı kapasitesi ve özgül ısı malzemenin çevresinden ısı absorplama miktarının göstergesidir ve aynı anlamda kullanılırlar. Kütlesi verilmiş olan bir malzemenin sıcaklığını değiştirmek için gerekli enerji miktarı olarak da tanımlanabilir.
- Dış kaynaktan verilen ısı malzemede atomik boyutta titreşime neden olur.
- Birçok malzeme ısı sonrası boyutsal değişimler meydana gelmektedir.
- Artan sıcaklıkla atomlar birbirlerinden uzaklaşırlar, boyutsal değişimler gözlenir. (termal genleşme)

Isı kapasitesi

- Malzeme sıcaklığı çevresinden absorbe ettiği sıcaklık kadar artar.
- C ile gösterilmektedir. 1K veya 1 °C sıcaklık artırmak için gereken enerjiyi ifade eder.

$$C = Q/\Delta T$$

C malzeme miktarına bağlıdır. (genelde 1 g veya 1 mol üzerinden tanımlanır.)

Birim kütle üzerinden tanımlanan özgül ısı $c = q/m\Delta T$ (J/(kg·K))

- Isı kapasitesi ölçümünde hacim (Cv) veya basınç (Cp) sabit tutulur.

Values of Specific Heat for a Variety of Materials	
Material	c_p [J/kg·K]
Metals^a	
Aluminum	900
Copper	385
Gold	129
Iron (α)	444
Lead	159
Nickel	444
Silver	237
Titanium	523
Tungsten	133
Ceramics^{a,b}	
Al ₂ O ₃	160
MgO	457
SiC	344
Carbon (diamond)	519
Carbon (graphite)	711
Polymers^a	
Nylon 66	1260–2090
Phenolic	1460–1670
Polyethylene (high density)	1920–2300
Polypropylene	1880
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	1050

Termal iletkenlik

- Malzemenin fonon ve elektronlar ile ısıyı malzeme boyunca iletebilme hızıdır. Özellikle elektronlar metallerin ısı iletkenliğine ciddi bir katkısı vardır. Diğer malzemelerde bu çok azdır.
- Isı iletim yönü malzemelerde yüksek sıcaklıklardan düşük sıcaklık yönüne doğrudur.
- Katılarda ısı iletimi difüzyonla benzerdir.
- Difüzivite (D) ve termal iletkenlik (k) Fourier kanunu ile tanımlanır.

$$k = - (dQ/dt) / (A(dT/dx))$$

Burada dQ/dt ısı transfer hızı, A alan, dT/dx ise sıcaklık farkıdır.

Isı taşınımı katı malzemenin yüzeyi ile yanında hareket eden sıvı veya gaz arasında olurken, ışıma ise bir cismin yüzeyinden diğer cismin yüzeyine olan ısı transferi olarak tanımlanabilir.

Values of Thermal Conductivity for a Variety of Materials

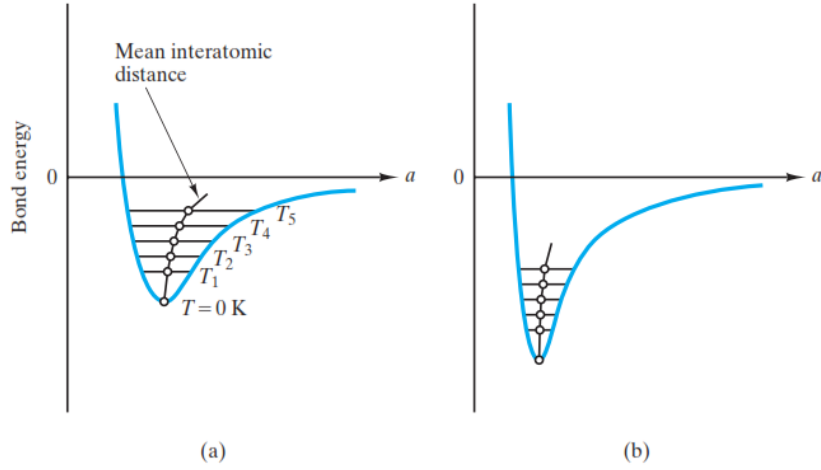
Material	k [J/(s · m · K)]			
	Temperature = 27°C (300 K)	100°C	527°C (800 K)	1,000°C
Metals^a				
Aluminum	237		220	
Copper	398		371	
Gold	315		292	
Iron	80		43	
Nickel	91		67	
Silver	427		389	
Titanium	22		20	
Tungsten	178		128	
Ceramics and glasses^{a,b}				
Mullite (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)		5.9		3.8
Porcelain		1.7		1.9
Fireclay refractory		1.1		1.5
Al ₂ O ₃		30.0		6.3
Spinel (MgO·Al ₂ O ₃)		15.0		5.9
MgO		38.0		7.1
ZrO ₂ (stabilized)		2.0		2.3
TiC		25.0		5.9
Silica glass		2.0		2.5
Soda-lime-silica glass		1.7		—
Polymers^a				
Nylon 66	2.9			
Phenolic	0.17–0.52			
Polyethylene (high-density)	0.33			
Polypropylene	2.1–2.4			
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.24			

- Zayıf iletkenliğe sahip seramik ve polimerlerde termal enerji atom titreşimleri ile taşınmaktadır.
- Elektrik iletkenliğine sahip metaller de ise iletim elektronlarının kinetik enerjisi, atomik titreşimlere oranla daha yüksektir. Bu nedenle daha iyi iletim sağlarlar.
- Artan sıcaklıkla kafes titreşimlerinin artmasından dolayı genel olarak termal iletkenlik düşer.
- Kimyasal safsızlıklarda benzer etkiyi gösterir.
- Yani saf metaller alaşımlardan daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir. (alaşım elementi iletkenliği sağlayan elektronların saçılımına sebep olduğundan iletkenliği düşürür.)
- Camlar kristalin formlara göre daha düşük termal iletkenliğe sahiptir. (düzensiz yapı saçılmayı artırır.)
- Seramik ve polimerlerde artan sıcaklıkla termal iletkenlik azalır. (sıcaklık artışı fononların saçılımını artırır.)
- Polimerlerde molekül zincirinin dönmesi ve titreşimi iletkenliği sağlar.(kristallenme iletkenliği artırır.)
- Porozite varlığı termal iletkenliği düşürür.

Termal genleşme

- Artan sıcaklıkla komşu atomlar arası artan mesafe malzemede genleşmeye sebep olmaktadır.

$$\alpha = dL/dT \text{ (lineer ter. genl. kat.) (K}^{-1}\text{)}$$



E bağ enerjisini kuyunun tabanına yakın bölgedeki eğimiyle ilişkilidir. Yani kuyu ne kadar derinse eğim o kadar yüksek olacak. Bu da yüksek ergime sıcaklığı, yüksek elastik modül demektir.

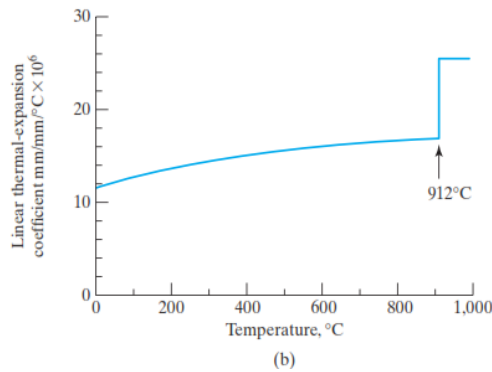
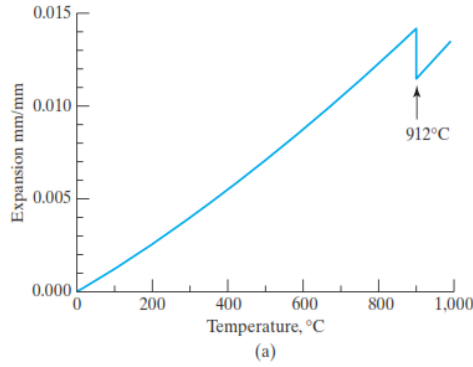
Katı malzemeler ısıtıldıklarında genişirken, soğuma esnasında ise büzülme görülür. Boyutsal olarak bu meydana gelen değişimlerin oranı termal genişleme katsayısını verir. Bu değer malzemelerin sıcaklıkla ne hızda değişeceğini söyler.

Termal olarak genişleme artan sıcaklıkla meydana gelen atomsal titreşimlerin artmasından ve bu yüzden de artan atomlar arası mesafeden kaynaklanır.

$$\Delta l/l_0 = \alpha_l \cdot (T_s - T_0)$$

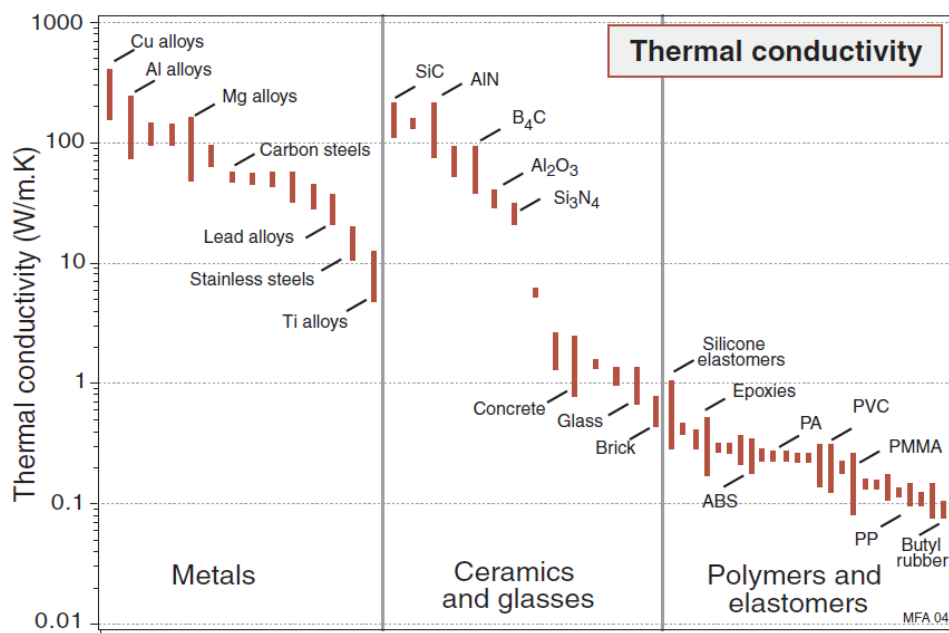
$$\Delta V/V_0 = \alpha_v \cdot (T_s - T_0)$$

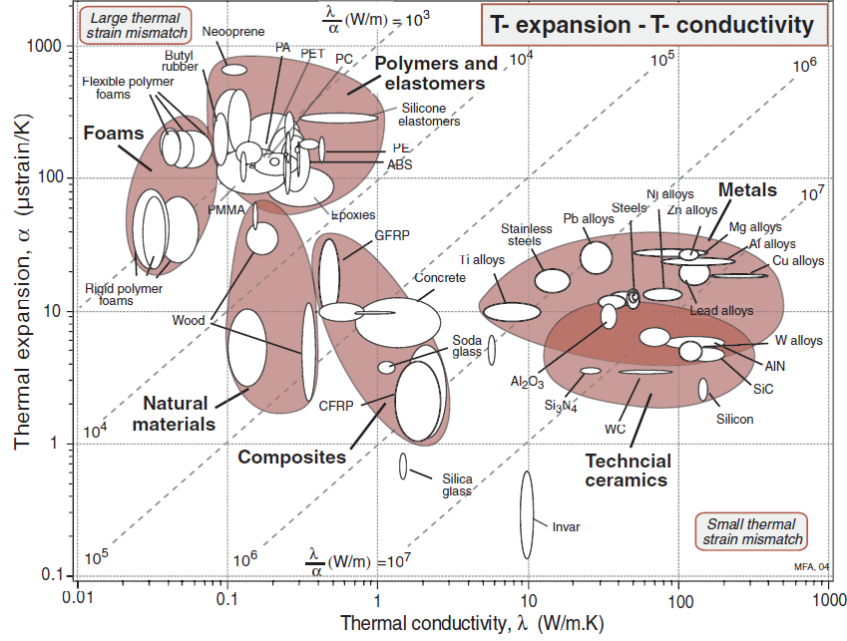
İzotropik (malzeme özelliği yönden bağımsız) malzemelerde $\alpha_v = 3 \cdot \alpha_l$



Values of Linear Coefficient of Thermal Expansion for a Variety of Materials

Material	α [mm/(mm·°C) × 10 ⁶]		
	Temperature = 27°C (300 K)	527°C (800 K)	0–1,000°C
Metals^a			
Aluminum	23.2	33.8	
Copper	16.8	20.0	
Gold	14.1	16.5	
Nickel	12.7	16.8	
Silver	19.2	23.4	
Tungsten	4.5	4.8	
Ceramics and glasses^{a,b}			
Mullite (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)			5.3
Porcelain			6.0
Fireclay refractory			5.5
Al ₂ O ₃			8.8
Spinel (MgO·Al ₂ O ₃)			7.6
MgO			13.5
UO ₂			10.0
ZrO ₂ (stabilized)			10.0
SiC			4.7
Silica glass			0.5
Soda–lime–silica glass			9.0
Polymers^a			
Nylon 66	30–31		
Phenolic	30–45		
Polyethylene (high-density)	149–301		
Polypropylene	68–104		
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	99		





Termal şok

- Termal gerilmeler malzemeden meydana gelen sıcaklık değişimlerinden kaynaklanmaktadır.

$$\sigma = E \cdot \alpha_l \cdot (T_0 - T_s)$$

- Formüle göre sıcaklık artışı meydana geldiğinde gerilme negatif değer alır yani basma gerilmeleri meydana geldiği anlaşılır.
- Yine Formüle göre sıcaklıkta meydana gelen azalma gerilmeyi pozitif yapar yani çekme gerilmeleri meydana geldiği anlaşılır. Bu da çubuğun merkeze doğru çekildiği şeklinde düşünülebilir.
- Malzemede termal yüklemeler esnasında boyut değişimini engellemek gerilme deformasyon oluşturur.
- Hızlı sıcaklık değişimi ile malzeme yüzeyinde meydana gelen yüksek ısıl gradyan kalıntı iç gerilme oluşturur.
- Örneğin fırın tasarımında refrakter tuğlaların genişleme toleransına izin verilmezse, çalışma koşullarında çatlak oluşumları gözlenebilir.
- Benzer şekilde kaplama ile altlık malzeme arasındaki termal genişleme uyumu dikkate alınmalı (metal-seramik, seramik-cam vs.)
- Metaller ve polimerler şekil değiştirme kabiliyetlerine sahip olduklarından dolayı ısı yüklemelerle kalıcı şekil değişimi gösterirler.
- Seramikler ise gevrek karakterli olduklarından şekilde değiştirme kabiliyetlerinin zayıf olmasından dolayı termal gerilmeler ile kırılma gösterirler.
- Gevrek yani kırılgan bir malzeme de hızlı soğutulduğunda termal şoktan dolayı yüzeyinde çekme gerilmeleri meydana gelir.

- Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi meydana gelen çekme gerilmesinin büyüklüğüne bağlıdır.

$$TSD = (\sigma_f \times k) / (E \times \alpha_l)$$

TSD: termal şok dayanımı

σ_f : kırılma mukavemeti

k: termal iletkenlik katsayısı

α_l : lineer termal genleşme katsayısı

- Termal şoku önlemek veya etkisini azaltmak için:
 - ✓ Isıtma ve soğutma hızları düşürülür ve malzeme içinde sıcaklık gradyanı önlenir.
 - ✓ Malzeme içinde büyük gözeneklerin ve sünek ikinci fazların varlığını artırmak

Elektriksel özellikler

- Elektriksel direnç veya öz direnç, bir birim küpün iki yüzey arasındaki potansiyel farkıdır. Birimi ($\Omega.m$)
- Elektrik iletkenliği, özdirencin yerinede kullanılan bir terimdir.
- Elektrik iletiminin olduğu yere yalıtıcı konursa, yüzeylerde polarize ve şarj meydana gelir.
- Polarize olma kabiliyeti dielektrik sabiti ile ölçülür. (ϵ_d) (birimsiz)
- Gazlar için ϵ_d 1 iken, yalıtkanlar için 2-30 arasındadır.
- Düşük yoğunluklu köpük malzemelerde ise havaya yakın yani 1 değeri alınabilir.

Electrical Conductivities of Selected Materials at Room Temperature	
Material	Conductivity, σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
<i>Metals and alloys^a</i>	
Aluminum (annealed)	35.36×10^6
Copper (annealed standard)	58.00×10^6
Gold	41.0×10^6
Iron (99.9+%)	10.3×10^6
Lead (99.73+%)	4.84×10^6
Magnesium (99.80%)	22.4×10^6
Mercury	1.04×10^6
Nickel (99.95% + Co)	14.6×10^6
Nichrome (66% Ni + Cr and Fe)	1.00×10^6
Platinum (99.99%)	9.43×10^6
Silver (99.78%)	62.9×10^6
Steel (wire)	$5.71\text{--}9.35 \times 10^6$
Tungsten	18.1×10^6
Zinc	16.90×10^6
<i>Semiconductors^b</i>	
Silicon (high purity)	0.40×10^{-3}
Germanium (high purity)	2.0
Gallium arsenide (high purity)	0.17×10^{-6}
Indium antimonide (high purity)	17×10^3
Lead sulfide (high purity)	38.4
<i>Ceramics, glasses, and polymers^c</i>	
Aluminum oxide	$10^{-10}\text{--}10^{-12}$
Borosilicate glass	10^{-13}
Polyethylene	$10^{-13}\text{--}10^{-15}$
Nylon 66	$10^{-12}\text{--}10^{-13}$

Kaynaklar

- Asby, M.F. and Jones, D.R.H. (1996) Engineering Materials 1, and Introduction to their properties and applications, 2. edition, Permagon Press, Oxford, U.K.
- F. Findık (2018), Malzeme ve Tasarım, 3. baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- J. F. Shackelford (2016), *Introduction to materials science for engineers*. Pearson.
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2015). *Callister's Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons.
- İ.Ay, Tasarım ve Malzeme Seçimi Ders Notları, Balıkesir Üniversitesi.
- D. Dışpınar, Malzeme Seçimi ve Tasarımı Ders Notları, İstanbul Üniversitesi.
- M. Demirkol, Mühendislik Malzemeler ve İmalat Teknolojisi Ders Notları, İ.T.Ü.
- G. Göller, Ö. Keleş, İ. Akın, Malzeme Bilimi ve Mühendisliğine Giriş Ders Notları, İ.T.Ü.
- Campbell, F. C. (Ed.). (2012). Fatigue and fracture: understanding the basics.Chapter 5: Fatigue of metals. ASM International.