

# DEFORMASYON SICAKLIĞININ VE DEFORMASYON HIZININ AI 99.0'UN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Cevdet MERİÇ, Enver ATİK, Erdoğan ÖZKAYA

Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Manisa

## ÖZET

Alüminyum (Al 99.0), çeşitli deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızlarında çekme deneyine tabi tutularak, deformasyon hızı ve deformasyon sıcaklığının bu malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. İnceleme sonucunda; artan deformasyon sıcaklığı ile malzemenin akma ve çekme mukavemeti değerlerinin azaldığı, birim şekil değiştirme ve kopma büzülmesinin arttığı, plastik deformasyon üssü (n)'in azalırken deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m)'in arttığı tesbit edilmiştir. Sabit bir sıcaklıkta ise deformasyon hızının artması, tüm mekanik özellik değerlerini arttırmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Al 99.0, Deformasyon hızı, Deformasyon sıcaklığı, Mekanik özellikler

## INVESTIGATION OF DEFORMATION TEMPERATURES AND STRAIN RATE EFFECTS' ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AI 99.0

### ABSTRACT

The effects of deformation temperature and strain rate to the mechanical properties of Aluminum (Al 99.0) were investigated by tensile experiment at different deformation temperatures and strain rate. At the end of investigation; it was determined that, with increasing deformation temperature, yield and tensile strenghts of the material decrease, strain rate and decrease of area increase, when plastic deformation exponent (n) decreases, strain rate accuracy exponent (m) increases. At a fixed temperature an increase in deformation speed increased all mechanical properties.

**Key Words:** Al 99.0, Strain rate, Deformation temperature, Mechanical properties

## 1. GİRİŞ

Malzemenin mukavemeti; birim şekil değiştirme ( $\epsilon$ ), deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) ve deformasyon sıcaklığının (T) bir fonksiyonu olarak,

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir (Kayalı, 1986).

Deformasyon sıcaklığının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şekline, mukavemet, süneklik ve kırılma özelliklerine etkisi çok fazladır. Sıcaklığa bağlı olarak deformasyon işlemleri klasik ve benzeş sıcaklığa göre olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır. Klasik sınıflandırmaya göre mekanik işlemler sıcak ve soğuk işlem olmak üzere iki gruba ayrılmıştır: Sıcak işlemler, deformasyon şartlarında (T ve  $\epsilon$ ), malzemeye uygulanan deformasyonla aynı zamanda yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği işlemdir. Soğuk işlem ise deformasyon sırasında yeniden

kristalleşmenin gerçekleşmediği işlemdir (Kayalı, 1986; Dieter, 1976).

Mekanik işlem sırasında deformasyon sıcaklığının (T [K]) malzemenin ergime sıcaklığına (T<sub>m</sub> [K]) oranı olan benzeş sıcaklığa göre deformasyon işlemleri soğuk, ılık ve sıcak işlem olmak üzere üç gruba ayrılır. Deformasyon sıcaklığına bağlı olarak gerilme farklı bağıntılar ile ifade edilmektedir. Düşük sıcaklıklarda (T < 0.3 T<sub>m</sub>), gerilmeye deformasyon hızının etkisi önemsizdir.

Bu durumda gerilme, deformasyon sertleşmesi nedeniyle deformasyon oranına bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda (T > 0.5 T<sub>m</sub>) ise, gerilme deformasyon hızına karşı çok duyarlı olup, deformasyon sertleşmesi ihmal edilebilecek seviyededir. Deformasyon sıcaklığı ılık işlem sıcaklıklarında (0.5 T<sub>m</sub> > T > 0.3 T<sub>m</sub>) ise gerilme değerlerine deformasyon oranının, deformasyon sertleşmesinin ve deformasyon hızının birbirine yakın derecede müşterek etkileri vardır. Bu açıklamalara göre;

- a) Soğuk işlemde: (T < 0.3 T<sub>m</sub>);  $\sigma = K \cdot \epsilon_p^n$   
 b) Ilık işlemde : (0.5 T<sub>m</sub> > T > 0.3);  $\sigma = D \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m$   
 c) Sıcak işlemde : (T > 0.5);  $\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m$

bağıntıları kullanılır. Burada;

- $\sigma$  : Plastik gerilme (flow stress)  
 $\epsilon$  : Birim şekil değiştirme (deformasyon oranı)  
 $\dot{\epsilon}$  : Deformasyon hızı  
 T : Deformasyon sıcaklığı [K]  
 T<sub>m</sub> : Ergime sıcaklığı [K]  
 n : Deformasyon sertleşmesi üssü  
 m : Deformasyon hızı duyarlılığı üssü  
 K, D, C : Malzeme sabitleridir

Deformasyon hızı, mühendislik deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) ve gerçek deformasyon hızı ( $\epsilon$ ) olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir. Bunlardan Mühendislik deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) çekme deneyinde deney cihazının çene hızı ( $V = dL_i/dt$ ) ile doğru orantılı olup,

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (1)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir.

Burada, L<sub>0</sub> malzemenin ilk ölçü uzunluğu, L<sub>i</sub> ise deformasyonun herhangi bir anındaki ölçü uzunluğudur.

Gerçek deformasyon hızı ( $\epsilon$ ) ise, birim zamanda meydana gelen gerçek şekil değiştirme miktarını gösterir ve,

$$\epsilon = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d(L_n L_i / L_0)}{dt} = \frac{V}{L_i} \quad (2)$$

bağıntısı ile belirlenir.

Gerçek deformasyon hızı, numune boyundaki değişimin etkisini de gösterdiğinden, mühendislik deformasyon hızına göre daha doğru sonuç vermektedir. Söz konusu deformasyon hızları arasındaki ilişki ise,

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{1 + e} \quad (3)$$

bağıntısı ile verilebilir (Kayalı, 1986; Dieter, 1976).

Yüzey merkezli kübik (YMK) yapıli metallerin, deformasyon hızına diğer metallere daha az duyarlı oldukları bilinmektedir (Bash, 1988; Monthey, 1993). YMK yapıya sahip olan alüminyum ve alaşımları için deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızının malzemenin mekanik özelliklerine etkileri ayrıntılı bir biçimde incelenerek nedenleri yeterince irdelenmediği görülmüştür. Bu çalışmada gıda, kimya, mutfak eşyası, depolama teçhizatı, ısıtma, soğutma ve havalandırma sektörleri ile inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan Al 99.0 'un mekanik özelliklerine deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızının etkileri incelenerek bu etkilerin nedenlerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

## 2. MALZEME VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada Al 99.0 (1100-0, ETİAL 0) ticari saflıkta alüminyum kullanılmış olup, kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

10 mm çapında çubuk şeklinde temin edilmiş olan malzemeden TS 138 ve ASTM-E8'e göre çekme numuneleri hazırlanmıştır. Çekme deneyinden önce numunelerin tamamı 350 °C'ye gelinceye kadar fırında tutulmuş ve havada soğutulmuştur. Alüminyumun yumuşak olması ve sıcaklıkta çalışılacağı için özel çeneler kullanılmıştır. Çekme deneyleri Instron 1114 model çekme cihazında yapılmıştır. Ortamda sıcaklığı temin etmek için çekme cihazının özel ısıtma aparatı kullanılmıştır. Isıtma aparatı silindirik tüp bir fırın olup seramik tüp ve fleanlı sargılardan ibarettir. Deney numunelerine bağlanan termokupullar vasıtasıyla

deney sıcaklığı ölçülmüştür. Çenelerin hızı ise cihaz üzerinden ayarlanmıştır. Deney numuneleri uygulanan yük ve uzamayı kaydeden yazıcı

vasıtasıyla grafikler elde edilmiş ve teker teker incelenmiştir.

Tablo 1. Deneylerde Kullanılan Malzemenin Kimyasal Bileşimi (%)

Malzeme	Cu	Fe	Si	Zn	Mn	Mg	Ni	Ti	Cr	Her biri	Toplam
Al 99.0	0.05-0.15	0.70	0.25	0.06	-	-	-	0.05	-	0.05	0.15

Tablo 2. Çekme Deneyi Sonucunda Elde Edilen Değerler

Defor. sıcak.	Gerçek defor. hızı	Akma muk.	Çekme muk.	Kopma uzaması	Kopma büzül.	Defor. sertleş. üssü	Defor. hızı duyarlı. üssü	Rp <sub>0.2</sub> /E [10 <sup>-4</sup> ]	Benzeş sıcaklık
[°C]	$\dot{\epsilon} \times [10^{-4}]$ [s <sup>-1</sup> ]	Rp <sub>0.2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	n	m	-	T/Tm
20	2	119	155	22,5	75	0.422	0.28	18,3	0,314
20	4	199	150	20	75	0.480	0.28	18,3	0,314
20	20	125	152	20	75		0.28	19,2	0,314
100	2	117	137	22,5	75	0.365	0.33	18	0,399
100	4	11	130	22,5	75	0.383	0.33	17	0,399
100	20	121	135	20	75		0.33	18,6	0,399
200	2	84	94	20	75	0.137	0.47	12,9	0,506
200	4	85	93	20,7	75	0.235	0.47	13	0,506
200	20	86	88	20	75		0.47	13,2	0,506
300	2	24	29	30	75	0.091	0.64	3,7	0,614
300	4	24	30	26,5	75	0.190	0.64	3,7	0,614
300	20	29	30	32,5	94		0.64	4,5	0,614
400	2	8	10	80	94	0.066	0.8	1,2	0,721
400	4	10	10	66	98,5	0.145	0.8	1,5	0,721
400	20	13	13	65	99		0.8	2	0,721
500	2	2	3	81,5	94	0.038	0.82	0,3	0,828
500	4	3	4	68,5	99,5	0.055	0.82	0,5	0,828
500	20	5	5	87,5	98,5		0.82	0,8	0,828

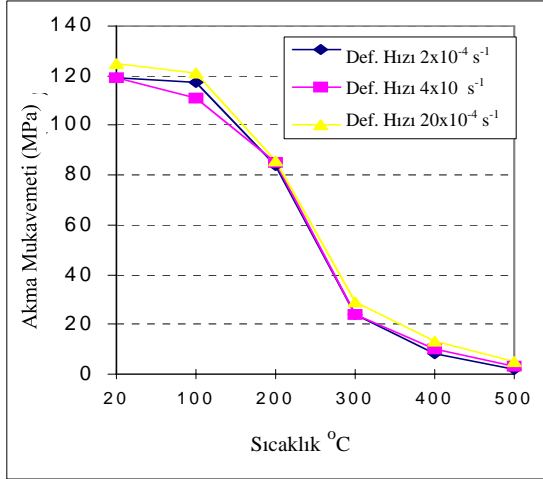
Deney sıcaklığı olarak 20 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C ve 500 °C sıcaklıklar seçilmiştir. Gerçek deformasyon hızı olarak da  $2 \times 10^{-4}$ ,  $4 \times 10^{-4}$  ve  $20 \times 10^{-4}$  s<sup>-1</sup> hızları seçilmiştir. Gerçek deformasyon hızı ise çene hızlarından hareket edilerek hesaplama yoluyla tesbit edilmiştir. Her deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızı için en az iki örnek kullanılmış ve ölçülen değerlerin ortalaması alınarak veriler elde edilmiştir.

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

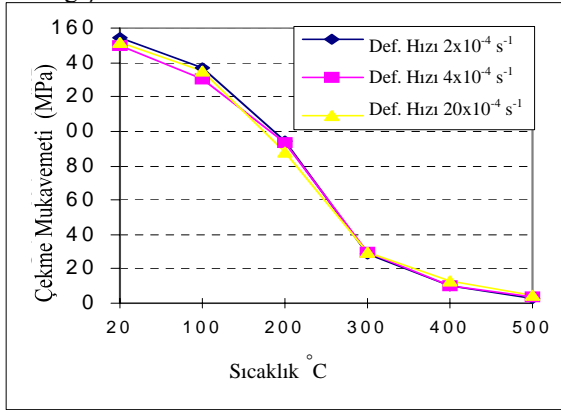
Çekme deneyleri sonucunda, her sıcaklık ve gerçek deformasyon hızı için elde edilen değerler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde deformasyon sıcaklığı arttıkça Al 99.0'un mukavemet değerlerinin azaldığı, sabit sıcaklık için ise artan çekme hızı ile söz konusu değerlerin arttığı görülmektedir.

Bilindiği gibi akma sınırından alt akma sınırı anlaşılmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarda belirgin bir akma sınırı olmaması dolayısıyla % 0.2 plastik deformasyona karşılık gelen gerilme değerleri göz önüne alınmıştır. Şekil 1 ve Şekil 2'de Al 99.0 'in çeşitli deformasyon hızlarında akma mukavemetinin (Rp<sub>0.2</sub>) ve çekme mukavemetinin (Rm) deformasyon sıcaklığı ile değişimi gösterilmiştir.

Şekiller incelendiğinde deformasyon sıcaklığının artmasıyla akma ve çekme mukavemeti değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin yataylaşmasına ve sıcaklığın çekme mukavemetine etkisinin akma gerilmesine etkisinden daha fazla olmasına sebep olmuştur. Sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda uyumludur (Mukai, 1993). Al 99.0'un çeşitli deformasyon hızlarındaki kopma uzamasının ve kopma büzülmesinin deformasyon sıcaklığına bağlı olarak değişimi Şekil 3 ve 4'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde sıcaklığın artmasıyla kopma uzaması ve kopma büzülmesi oranlarının arttığı tesbit edilmiştir. Deformasyon sertleşmesi üssü (n), plastik deformasyonun başladığı akma gerilmesi ile boyun vermenin başladığı nokta arasında bulunan homojen



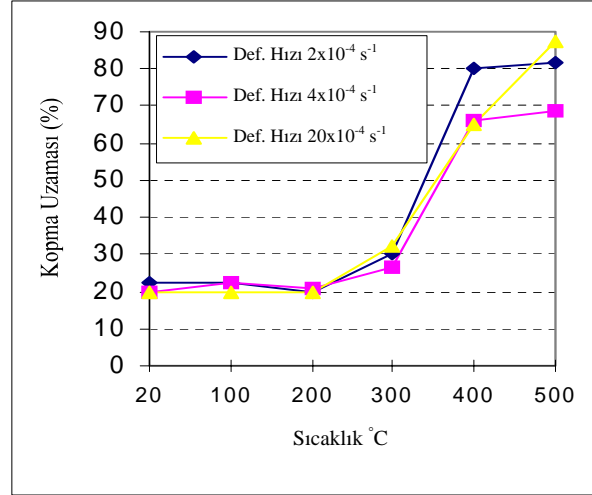
Şekil 1. Al 99.0'un çeşitli deformasyon hızlarında akma mukavemetinin ( $R_{p0,2}$ ) deformasyon sıcaklığı ile değişimi



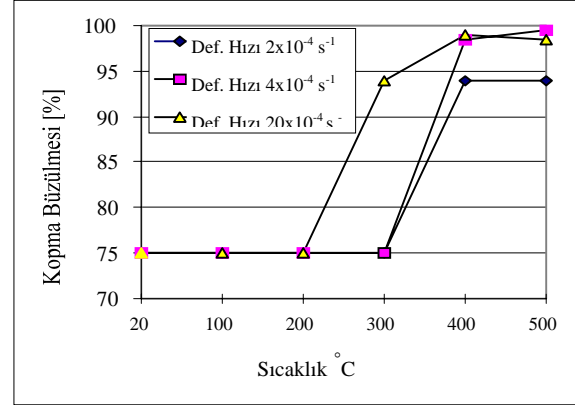
Şekil 2. Al 99.0'un çeşitli deformasyon hızlarında çekme mukavemetinin ( $R_m$ ) deformasyon sıcaklığı ile değişimi

deformasyon bölgesindeki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme değerlerine göre çizilen  $\log\sigma$ - $\log\epsilon$  grafiğinin eğimine eşittir (Kayalı, 1986; Dieter, 1976). Çeşitli deformasyon hızları için hesaplanan  $n$ -sıcaklık değişimi Şekil 5'de gösterilmiştir. Deformasyon sıcaklığının artmasıyla  $n$  değeri azalmıştır. Deformasyon hızının artması ise  $n$  değerini arttırmıştır (Tang, 1994). YMK metallerde plastik gerilme (flow-stress), sıcaklığa fazla bağlı değildir, fakat sıcaklık arttıkça malzemenin deformasyon sertleşmesi üssü ( $n$ ) azalır. Bu durum, sıcaklık arttıkça gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin yataylaşmasına ve sıcaklığın çekme mukavemetine etkisinin akma gerilmesine etkisinden daha fazla olmasına sebep olur.

Deformasyon hızı duyarlılığı üssü ( $m$ ),  $\log\sigma$ - $\log\epsilon$  grafiğinin eğimine eşittir (Kayalı, 1986). Çeşitli

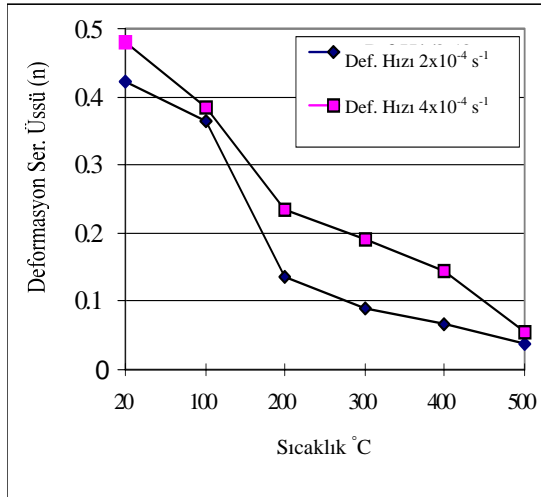


Şekil 3. Al 99.0'un çeşitli deformasyon hızlarında kopma uzamasının (A) deformasyon sıcaklığı ile değişimi

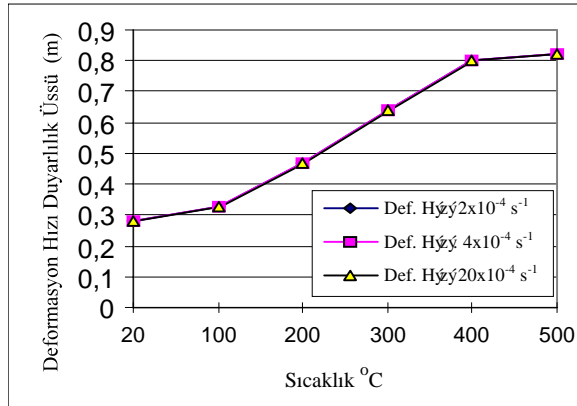


Şekil 4. Al 99.0'un çeşitli deformasyon hızlarında kopma büzülmesi (Z) deformasyon sıcaklığı ile değişimi

deformasyon hızları için hesaplanan deformasyon hızı duyarlılık üssü sıcaklık değişimi grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir. Deformasyon hızı artarken süneklığe bağlı olarak malzemenin deformasyon duyarlılığı üssü de azalmıştır. Yüksek deformasyon hızı duyarlılığı üssü, metalik malzemelerde süper plastikliği karakterize eder. Oda sıcaklığında ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) düşük olan  $m$  değerinin sıcaklığın artmasıyla yükseldiği görülmektedir (Lee, 1995). Eşit bir benzeş sıcaklıkta, iki malzemenin plastik gerilmesi karşılaştırılmak istendiğinde, sıcaklığın elastisite modülüne etkisi sebebiyle plastik gerilmeler yerine  $R_{p0,2}/E$  oranlarının karşılaştırılması tercih edilir (Dieter, 1976). Şekil 7'de Al 99.0'un  $R_{p0,2}/E$  değerinin benzeş sıcaklıkta  $T/T_m$  değişimi gösterilmiştir.  $T/T_m$  oranı 1'e yaklaştıkça  $R_{p0,2}/E$  oranı azalmıştır. Deformasyon hızının artışı bu oranı da arttırmıştır.



Şekil 5. Al 99.0'un çeşitli deformasyon hızlarında deformasyon sertleşmesi üssünün (n) deformasyon sıcaklığı ile değişimi

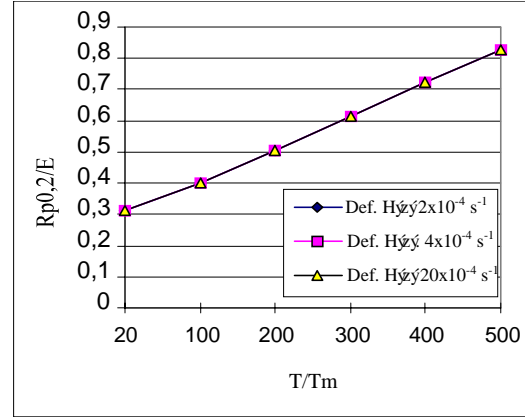


Şekil 6. Al 99.0'un çeşitli deformasyon hızlarında deformasyon hızı duyarlılık üssünün (m) deformasyon sıcaklığı ile değişimi

Farklı kristalografik yapıdaki malzemelerde sıcaklığın etkisi aynı şiddette değildir. HMK sistemdeki metallerde sıcaklığın artması ile akma mukavemeti hızla azalırken, YMK sistemdeki metallerde sıcaklık arttıkça akma mukavemetinin azalması çok daha yavaştır (Manthey, 1993).

Sıcak işlemde deformasyon sertleşmesi ve bozulan tane yapısı, deformasyon sırasında yeniden kristalleşme sonucu yeni tanelerin oluşması ile giderilir. Bu sebeple büyük oranda deformasyonlar ancak sıcak işlem ile mümkündür. Sıcak işlem esasen sabit gerilme ile gerçekleşir. Mukavemet sıcaklık arttıkça azaldığından sıcak işlemde deformasyon için gerekli enerji genellikle soğuk işlem için gerekli olandan çok daha azdır. Soğuk işlemde deformasyon sertleşmesi deformasyona engel teşkil eder ve mukavemet deformasyonla artar. Ilık işlemde gerçekleştirilebilen toplam deformasyon

oranı sıcak işlemde az fakat soğuk işlemdekinden daha fazladır. Ilık işlem sırasında yeniden kristalleşme olmaz, fakat dislokasyonların düzene girmesi sonucu



Şekil 7. Al 99.0'un  $R_{p0,2}/E$  değerinin benzeş sıcaklıkla değişimi

dinamik toparlanma olur. Dinamik toparlanma ile malzemede alt tane yapısının oluşumu malzemenin mukavemetinin artmasına sebep olur. Bu nedenle ılık işlem sırasında deformasyon sertleşmesi soğuk işlemdeki kadar etkin değildir (Kayalı, 1986; Bash, 1988; Jan, 1994).

Çok kristalli malzemelerin plastik deformasyonunun kayma, ikizlenme, tane sınırı kayması ve yayınma sürünmesi mekanizmaları ile meydana geldiği bilinmektedir. Ancak, tane sınırı kayması ve yayınma sürünmesi çok yüksek sıcaklıklarda ve çok düşük deformasyon hızlarında ortaya çıkan mekanizmalar olduklarından, söz konusu malzemelerin oda sıcaklığında uygulanan oldukça yüksek çekme hızlarındaki deformasyonu için etkili değildir. Kristal yapıları malzemelerin plastik deformasyonunda en etkin mekanizma kaymadır (Kayalı, 1986; Dieter, 1976; Savaşkan, 1994; Dorward, 1995).

Kayma mekanizması, dislokasyonların kayma düzlemleri üzerinde, belirli kayma doğrultusunda hareketleri sonucu atom düzlemlerinin birbirine göre ötelenmesi şeklinde meydana gelir. Buradan, kristal yapıları malzemelerin oda sıcaklığındaki plastik deformasyonunun büyük ölçüde dislokasyon hareketi ile meydana geldiği ortaya çıkmaktadır.

Bu nedenle, kuvvet uygulanan bir malzemede dislokasyon hızının artması, plastik deformasyon hızının artması anlamına gelmektedir. Dislokasyon hızı ise kayma düzlemine etkiyen kayma gerilmesi bileşenine ve dolayısıyla malzemeye uygulanan

normal gerilmeye bağlıdır (Kayalı, 1986; Savaşkan, 1994; Hall, 1975; Cottrell, 1975; Mukai, 1995).

Bu nedenle, çekme sırasında dislokasyon veya deformasyon hızının artırılması için malzemeye uygulanan çekme gerilmesinin artırılması gerekmektedir. Buradan, incelenen malzemelerin mukavemet değerlerinin deformasyon hızı ile doğru orantılı olarak artmasının dislokasyon hızının uygulanan çekme gerilmesi ile doğru orantılı olarak artmasından kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır. Başka bir deyişle, çekme hızı arttıkça dislokasyon hızı artmakta ve buna paralel olarak da ölçülen gerilme (mukavemet) değerleri artmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR

Çeşitli deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızlarında çekme deneyine tabi tutulmuş olan Al 99.0 ticari saf alüminyum alaşımının çekme deneyleri sonuçları incelendiğinde;

- Deformasyon sıcaklığı arttıkça malzemenin akma mukavemeti ve çekme mukavemetinin azaldığı, kopma uzaması ve kopma büzülmesi arttığı,
- Belli bir sıcaklık için artan deformasyon hızı ile malzemenin akma mukavemeti değerlerinde bir artış olduğu, çekme mukavemeti değerlerinde ise belirgin bir artış olmadığı,
- Belli bir sıcaklık için artan deformasyon hızı ile malzemenin kopma uzaması değerlerinin azaldığı, kopma büzülmesi değerlerinin ise rekristalizasyon sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda değişmemesine rağmen, rekristalizasyon sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda artış gösterdiği,
- Plastik deformasyon üssü  $n$ 'in deformasyon sıcaklığının artmasıyla azaldığı, deformasyon hızının artmasıyla ise artış gösterdiği, deformasyon hızı duyarlılığı üssü  $m$ 'in ise artan sıcaklık ile arttığı,
- Benzeş sıcaklık oranı  $(T/T_m)$  1'e yaklaştıkça  $R_{p0.2}/E$  oranının azaldığı tespit edilmiştir.

#### 5. KAYNAKLAR

Bash, V.Y., Shkaraputa, L. M. 1988. Stability with Time of the Strain Hardening Effect of Constructional Materials. *Strength of Materials*. 358-362.

Cottrell, A. 1975. *An Introduction to Metallurgy*, Edward Arnold (Publishers) London.

Dieter, G. 1976. *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw-Hill Kagakusha Ltd. 329-377.

Dorward, R. C., Hosse K. R. 1995. Strain Rate Effect on Tensile Deformation of 2024-0 and 7075-0 Aluminium Alloy Sheet. *J. Of Materials Engineering and Performance*, C. 4 (2), 216-220.

Hall, D. 1975. *Introduction to Dislocations*. Pergamon Press. Oxford.

Jan, F. S., Yamaguchi, K., Takakura, N., Imatani, S. 1994. Effects of Temperature and Strain Rate on

Flow Stress and Density Change of Sintered Aluminium Powder Preforms. J. of Japan Institute of Light Metals, 44 (4), 197-203.

Kayalı E. S. ve Çimenoglu, H. 1986. Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları" İTÜ Kimya Metalurji Fak. İstanbul.,

Lee, W. S., Chiou, S. T. 1995. Strain Rate and Temperature Effects on Mechanical Response of Polycrystalline High Purity Aluminium Under Dynamic Shear Deformation. J. of the Chinese Society of Mechanical Engineers. Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C. 6 (6), 599-608.

Manthey, D.W., Farhat, J. P. 1993. Comparison Between Steel and Aluminium Strain Rate Effects" SME Technical Paper (Series), 1-10.

Mukai, T., Higashi, K., Tsuchida, S., Tanimura, S. 1993. Influence of Strain Rate on Tensile Properties in Some Commercial Aluminium Alloys. J. of Japan Ins. of Light Metals, 43 (5), 252-257.

Mukai, T., Ishikawa, K., Higashi, K. 1995. Influence of Strain Rate on the Mechanical Properties in Fine Grained Aluminium Alloys. Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties Microstructure and Processing C A204, 1-2, 12-18.

Savaşkan, T. 1994. Deformasyon Hızının Mühendislik Malzemelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Müh. ve Makina, 35 (412), 34-38. Savaşkan, T., Deformasyon Hızının Mühendislik Malzemelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Müh. ve Makina 35 (412), 34-38.

Tang, C., Zhu, J., Zhang, Y., Zhou, H. 1994. Effect of Strain Rate Epsilon on Strain Hardening Exponent n of some Metallic Materials. Acta Metallurgica Sinica (English Edition), Series B: Process Metallurgy and Miscellaneous 7 (3), 183-186.