

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HADDELEME PROSESİNDE MALZEME KARAKTERİSTİĞİNDEKİ
DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ

Mak.Müh. İ.Koray AYDOĞAN

F.B.E.Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç Dr. Özgen ÇOLAK (YTÜ)

İSTANBUL-2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. HADDELEME	12
1.1 Tanım	12
1.2 Kullanım Alanları	12
1.3 Çeşitleri	14
1.3.1 Sıcak Haddeleme	14
1.3.2 Soğuk Haddeleme	15
1.3.3 Merdane Düzenleri	16
1.3.4 Hadde Kuvvetleri	18
1.4 Levha ve Sacların Haddelenmesi	22
1.5 Alüminyum	24
1.5.1 Saf Alüminyumun Özellikleri	25
1.5.2 Alüminyum'un Eldesi	26
1.5.3 Alüminyum Ürünlerin Üretim Yöntemine Göre Sınıflandırılması	26
1.5.4 Alüminyum Kullanımının Endüstrilere Göre Gruplandırılması	27
1.5.4.1 Alüminyum ve İnşaat	27
1.5.4.2 Alüminyum ve Ambalaj	27
1.5.4.3 Alüminyum ve Taşıt Araçları	28
1.5.4.4 Alüminyum ve İletkenler	30
1.5.4.5 Alüminyum ve Diğer Mühendislik Uygulamaları	30
2. GERİLMELER	36
2.1 Gerilme	36
2.2 Gerinim	38
2.3 Tek Eksen Gerilme Ve Hook Yasası	40
2.4 İki Eksenli Gerilme	44
2.5 İzotropik ve Anizotropik Lineer Elastisite	45
2.5.1 İzotropik Lineer Elastisite	45
2.5.2 Anizotropik Lineer Elastisite	47
3. HADDELEME PROSESİNDE MALZEME KARAKTERİSTİĞİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ	50
4. ÇEKME DENEYİ	71
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	74

5.1	Numune.....	74
5.2	Numune standartları ve numunelerin elde edilmesi	76
5.3	Deney Cihazı	79
5.4	Deneyin Yapılışı	79
5.5	Deney Sonuçları.....	80
6.	MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	88
7.	SONUÇ.....	95
	ÖZGEÇMİŞ.....	96
	KAYNAKLAR.....	97

SİMGE LİSTESİ

Γ	Açısal değişim
A_0	Başlangıç kesit alanı
J_1	Birim tensörü
ζ	Birim matris
E	Elastisite oranı
σ_{ij}	Gerilme tensörü
ξ	Gerilme doğrultusu
η	Gerilme bileşeni doğrultusu
b_1	İlk genişlik
α	Kavrama açısı
τ	Kayma gerilmesi
A	Kesit alanı
G	Kayma modülü
c_{ijkl}	Katılık matrisi
T	Lineer transformatör
A_{ij}	Matris
l	Malzeme boyu
l_0	Malzeme ilk boyu
N	Normal kuvvet
ν	Poison oranı
μ	Sürtünme katsayısı
ε	Şekil değişim oranı
b_2	Son genişlik
λ	Uzama kaytsayısı
s_{ijkl}	Uygunluk matrisi
C°	Sıcaklık (Derece)
K	Sıcaklık (Kelvin)
a_{ij}	Vektör
β	Yayımla katsayısı
R	Yarıçap
Δh	Yükseklik farkı
H	Yükseklik

KISALTIMA LİSTESİ

Al	Alüminyum
Fe	Demir
Si	Silisyum
Zn	Çinko
Mn	Mangan
Ti	Titanyum
Mpa	Mega paskal
EI	Erichsen test değeri
kN	Kilo Newton
CAD	Computer Aided Design

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Haddelme işlemi	12
Şekil 1.2	Blum, slab ve kütüklerin haddelenmesi ile elde edilen çeşitli ürünler	13
Şekil 1.3	Sıcak haddelmede tane dizilimi	14
Şekil 1.4	Soğuk haddelmede tane dizilimi	15
Şekil 1.5	Soğuk haddelenmiş polikristal metalde tane dizilimi	16
Şekil 1.6	Çiftli (a), üçlü (b), dördü (c), çoklu (d) ve sıralı (e) merdane düzenleri	17
Şekil 1.7	Çubuk ve profillerin haddelenmesi	18
Şekil 1.8	Hadde kuvvetleri	19
Şekil 1.9	Hadde kuvvetleri	22
Şekil 1.10	Hadde malzemeleri ve kesit ölçüleri	23
Şekil 2.1	Global düzlemdeki gerilme	36
Şekil 2.2	Gerilme durumları	37
Şekil 2.3	Uzama durumu	38
Şekil 2.4	sonsuz küçük uzama durumu	38
Şekil 2.5	Global düzlemdeki şekil değişimi	39
Şekil 2.6	Tek ekseninde basma, çekme ve kayma gerilmeleri	40
Şekil 2.7	Tek ekseninde basma, çekme ve kayma gerinimleri	40
Şekil 2.8	Çekme deneyi numunesi	41
Şekil 2.9	İki boyutlu gerilme ve gerinim düzlemleri	44
Şekil 3.1	Üç yöndeki akma gerilmeleri, Numisheet 2002 den alınan hesaplanmış datalarla karşılaştırılması	52
Şekil 3.2	Oda sıcaklığında ve farklı sıcaklıklarda asimetric ve geleneksel haddelenmiş numunelere yapılan kayma testi sonuçları	53
Şekil 3.3	Çekme testi numunesi	54
Şekil 3.4	Farklı başlangıç gerinim değerlerine ait numunelerin çekme deney sonuçlarının tabloya işlenmesi	54
Şekil 3.5	Farklı gerinim değerlerine ait numunelerin çekme deney sonuçları	55
Şekil 3.7	AA5182-O malzemesinin farklı sıcaklıklardaki gerilme gerinim grafikleri	58
Şekil 3.8	AA5182-O'nun 260°C'de farklı gerinim hızlarındaki gerilme gerinim grafikleri	59
Şekil 3.9	AA5182-O'nun farklı sıcaklık ve gerinim hızlarındaki gerinim-gerilme grafikleri*	59
Şekil 3.10	Alüminyum 5657-F alaşımının sıcaklıkla mikro yapıdaki değişimi	60
Şekil 3.11	Alüminyum 5457-O alaşımının incelleme oranına göre mikroyapıdaki değişimi	61
Şekil 3.12	Parça dizilimi	62
Şekil 3.13	Düşük karbonlu çeliğin soğuk işlemde farklı gerinim değerlerindeki tane yapıları (a) 10% soğuk işlem, (b) 30% soğuk işlem, (c) 60% soğuk işlem, (d) 90% soğuk işlem	63
Şekil 3.14	Merdane düzeni	65
Şekil 3.15	a, 400°C K de çapraz haddelenmiş numune, b, 330°C de normal haddelenmiş numune, c, 400°C de çapraz haddelenmiş ve 30 dak. tavllanmış numune ve d, 400°C de normal haddelenmiş ve 30 dak. tavllanmış numune	66
Şekil 3.16	Kalınlık istikametinde merkezden alınan çapraz ve düz haddelenmiş numunelerdeki kutup figürleri	67
Şekil 3.17	160°C, 200°C ve 220°C da alınan Erichsen testi sonuçları a, çapraz haddelenmiş numuneler, b, normal haddelenmiş numuneler	68
Şekil 3.18	160°C ve 220°C'de çapraz ve normal haddelermeye ait akma gerilmesi, Çekme Dayanımı ve kopma uzama değerleri karşılaştırılması	68
Şekil 3.19	a, ortalama r değerleri, b, düzlemsel r değerleridir.	69
Şekil 3.20	a, kalınlık, b, genişlik boyunca şekil değişiminin boyuna gerinime oranı	70
Şekil 4.1	Mühendisliki ve Gerçek eğriler	71

Şekil 4.2 Gerilme-Gerinim diagramı ifadeleri.....	72
Şekil 4.3 Boyun verme ve kopma.....	72
Şekil 4.4 Gerilme-gerinim grafiği	73
Şekil 5.1 Deney çubuğu.....	76
Şekil 5.2 Çift eksenli haddelenmiş levha ve numune dizilimi.....	77
Şekil 5.3 Tek eksenli haddelenmiş levha ve numune dizilimi.....	77
Şekil 5.4 Tek eksenli haddelenmiş numunelere ait mühendislik gerilme gerinim grafikleri	80
Şekil 5.5 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği. Tek yönlü haddeleme (0°).....	81
Şekil 5.6 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği. Tek yönlü haddeleme (45°).....	81
Şekil 5.7 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği. Tek yönlü haddeleme (90°).....	82
Şekil 5.8 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği. Çift yönlü haddeleme (0°).....	82
Şekil 5.9 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği. Çift yönlü haddeleme (45°).....	83
Şekil 5.10 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği. Çift yönlü haddelemede (90°).....	83
Şekil 5.11 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği. Tek eksenli haddeleme (Ort.).....	85
Şekil 5.12 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği. Çift eksenli haddeleme (Ort.).....	85
Şekil 5.13 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği, tek - çift eksenli kıyaslaması (0°).....	86
Şekil 5.14 Mühendislik gerilme-gerinim grafiği, tek - çift eksenli kıyaslaması (45°).....	86
Şekil 5.15 Gerilme-Gerinim grafiği, tek - çift eksenli kıyaslaması (90°)	87

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1,1 Al malzemesine ait bazı değerler	24
Çizelge 1,2 Al malzemesine otomotiv endüstrisinde kullanım oranları.....	29
Çizelge 1,3 Al malzemesine otomotiv modellerine göre kullanım oranları.....	29
Çizelge 1.4 Al çeşitleri bileşimleri (% ağırlık).....	31
Çizelge 1.5 İletken ve ticari Al diğer standartlardaki karşılıkları.....	31
Çizelge 1.6 Al çeşitleri bileşimleri (% ağırlık).....	32
Çizelge 1.7 İşlem alaşımlarının diğer standartlardaki karşılıkları.....	33
Çizelge 1.8 Alaşımli külçelerin bileşimleri (% ağırlık).....	34
Çizelge 1.9 Alaşımli külçelerin diğer standartlardaki karşılıkları.....	35
Çizelge 3.1 Farklı oranlardaki haddelemeye karşılık bakır ve çinko alaşımli bakıra ait bazı akma gerilmesi ve uzama değerleri.....	64
Çizelge 5.1 Çıkarılan numunelerin boyutları	78
Çizelge 5.2 Deney Sonuçları	84

ÖNSÖZ

Haddeleme işlemleri levha üretiminde kullanılan bir imalat yöntemidir. Bu tez çalışmasında soğuk haddeleme ve soğuk haddeleme sonucu malzeme yapısındaki değişimlerin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Malzeme yapısındaki bu değişiklikler imalat esnasında çeşitli sakıncalar doğurmaktadır. Sanayide söz konusu bu sakıncalar tecrübe ile bertaraf edilmektedir. Bu çalışmada söz konusu bu sakıncalar incelenmiş, deneylerle ve modellerle açıklık getirilmeye çalışılmıştır. Yabancı kaynaklarda da benzeri konular araştırılmış ve konuyu açıklamak için benzeri deneyleri yapıldığı gözlemlenmiştir. Söz konusu sakıncalar imalat esnasında tecrübe ile bulunmuş bir takım yöntemlerle çözülmüştür. Tezin bu konu ile ilgili araştırmalar yapacak diğer arkadaşlara yol göstermesi ve kılavuz teşkil etmesi temennisi ile öncelikle hazırlanmasında değerli vaktini ve yardımlarını eksik etmeyen kıymetli hocam Doç. Dr. Özgen ÇOLAK'A, desteğini her zaman yanımda hissettiğim biricik aileme, malzeme temini konusunda her zaman yardımcı olan Metanser Hadde Sanayine, parçaların işlenmesi konusunda büyük yardımı olan Şenyuva Alüminyuma ve Kenan Bey'e ayrıca deneyin yapılmasına imkân veren İTÜ Uçak Bilimlerindeki saygıdeğer hocalarıma ve Müslüm Beye, modelleme konusunda gece gündüz demeden her soruma cevap veren sevgili arkadaşım Cemal'e ve iş arkadaşlarıma sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Bu çalışma ile soğuk haddeme prosesinde haddeme doğrultusuna bağlı olarak değişen mekanik özellikler konusuna bir açıklama getirilmeye çalışılmıştır. Uzun yıllar soğuk haddeme işlemi tek doğrultuda yapılarak elde edilen levhaların kullanımı esnasında belirli bölgelerde bir takım problemlerle karşılaşmıştır. Tek yönde yapılan soğuk haddeden çıkan alüminyum levhalar sıvama usulü ile yapılan imalatlarda kalıbın kenar bölgelerinde yırtılarak imalatı olumsuz yönde etkilemektedir. Olayı mikro yapıda inceleyecek olursak tek yöne doğru haddelenmiş levhada malzeme taneleri bir yönelim gösterdiği ve bu sebepten hadde yönüne malzeme mukavemeti artarken hadde yönüne dik doğrultuda azalması beklenmektedir. Bu anizotropik yapı aynı miktar gerilmeye maruz kalan levhalarda farklı tepkiler oluşturmaktadır. Daha açıklayıcı bir tabir ile heterojen mukavemet özelliği malzemeyi yük karşısında heterojen bir cevap vermeye itmiştir. Bu durumda levhanın işlenmesi esnasında bir yöne yüksek mukavemet denk düşerken diğer yöne düşük mukavemet isabet eder.

Esas olarak bu tez çalışması deneysel ve modelleme olmak üzere 2 bölümden oluşmaktadır.

Deneysel bölümde, tek yönlü ve çift yönlü olarak haddelenmiş alüminyum levhaların tek eksenli çekme gerilemesi etkisi altında davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda haddelenmiş levhadan, hadde yönünde (0°), hadde yönüne dik (90°) ve hadde yönü ile 45° lik açı yapacak şekilde numuneler elde edilerek çekme deneyleri yapılmıştır. İki farklı yöntem ile elde edilen haddelenmiş levhaların yapısının anizotropik olup olmadığı araştırılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde bu deneysel sonuçlar kullanılarak çekme deneyi sonlu elemanlar yönteminde simüle edilmiştir. Bu sayede sadece elastik bölgedeki davranış değil aynı zamanda plastik bölge de ki davranış da simüle edilmiştir.

Tez bu bağlamda 7 temel bölümden oluşmuştur.

İlk bölümde haddeme konusu ele alındı. Haddemenin tanımı ve çeşitleri ve usulleri konusunda genel bir bilgilendirme ile bu imalat yöntemi tanıtıldı.

Diğer bölümde gerilme ve gerinim konusuna kısaca değinildi, yapılan tanımlamalarla bir takım hatırlatmalarda bulunuldu.

Sonraki bölümde konuyla ilgili yapılmış diğer çalışmalar anlatıldı.

Dördüncü bölümde ise çekme deneyi açıklandı.

Beşinci bölümde söz konusu deneysel çalışmalar yapılacak, çıkan sonuçlar hakkında bilgiler verildi. Ayrıca bu bölümde ilgili mühendisliki grafikler çizilip sonuçlar irdelendi.

Altıncı bölümde ise yapılan deneye ait modelleme çalışmaları ve sistemin sonlu elemanlar analizi ile çözümü bilgisayar ortamında yapılarak uygunlukları araştırılmıştır. Abaqus analiz programında deney elastik ve plastik olarak simüle edilerek ve model tanımı yapılarak deneysel gerçek eğrisi çizildi.

Sonuç kısmında ise yapılan işlemler özetlenip, çıkan sonuçlar irdelendi.

Anahtar kelimeler; Soğuk haddeme, anizotropi, çekme testi, gerilme, gerinim, sonlu elemanlar analizi.

ABSTRACT

In this study, it is aimed to investigate the changes in mechanical behaviours with rolling direction in cold-rolling process. For years, sheets rolled in a single direction released some problems during manufacturing process. Al-sheets rolled in a single direction exhibited cracking at the edges during cold forming. On macroscopic scale, sheets rolled in a single direction represents grains oriented in a certain direction. Therefore, it is expected that material strength will increase in the rolling direction and decrease in the transverse direction. Sheets deformed in same manner reveals different responses due to this anisotropic structure of the materials.

This study mainly consists of two parts: Experimental and Modelling.

In the experimental part, the behaviour of the single and cross-rolled Al-sheets subjected to uniaxial tensile stress is investigated. Tensile specimens were cut from rolling direction (0°), transverse direction (90°) and at 45° angle to the rolling direction. The anisotropy of the sheets rolled with two different process is investigated.

In the second part, the tensile test is simulated with FEM by using the experimental results and therefore behaviour of the material in the plastic region is also obtained.

In this context, thesis is composed of seven basic parts:

In the first part, a general information about the description, types and methods of rolling process is given.

Next, stress and strain subject is mentioned briefly.

In the following part, related studies are represented.

In the fourth part, the tensile experiment is explained. Experimental studies and the results are given in the next section. Plotted engineering graphs are also given.

In sixth part, the topic will be taken up in terms off FEM, and test sample was simulated in a FE program called ABAQUS.

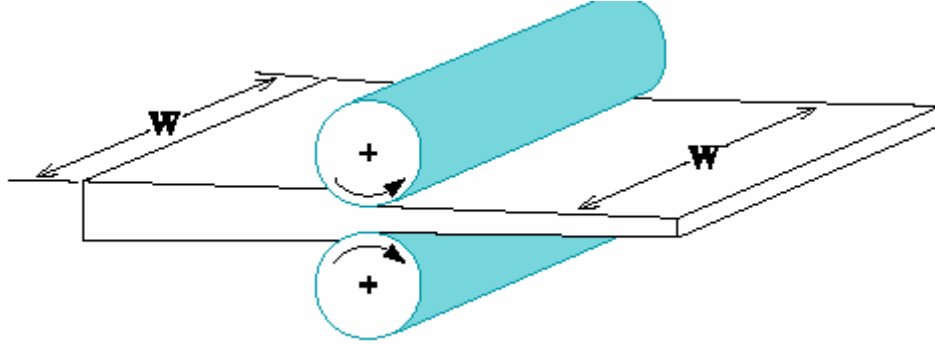
At result, all the operations are briefed and results are explicated.

Key words: cold rolling, anisotropy, tensile test, Stress, Strain, FEM

1. HADDELEME

1.1 Tanım

Şekil verilecek olan malzemenin, parçanın, hadde ya da yufkaç denen ve birbirlerine zıt yönde dönen iki veya daha çoklu silindirler arasından geçirilerek yeniden boyutlandırılmasına haddeleme denir. Plastik şekil vermenin en büyük kısmı haddeleme ile yapılmaktadır. Haddeleme usulünde ilk amaç haddelenen malzemeyi sıkıştırmak yani daha yoğun hale getirmektir. Bu suretle bunker ve buna benzer boşluklar giderilir veya azaltılır. Aynı zamanda malzemedeki cüruf birikintileri dışarı atılır. İkinci amaç malzemeyi daha küçük bir kesit haline getirmektir. Böylece çelikhane de dökülen ham bloklar haddeler arasından geçirilerek, istenilen düzgünlükte ve teknikte kullanılabilir formlarda şekilli kesitler haline getirilir. Haddeleme iç yapı bakımından ikinci derecede, dış yapı bakımından birinci derecede düzgünlük arz eder.



Şekil 1.1 Haddeleme işlemi*

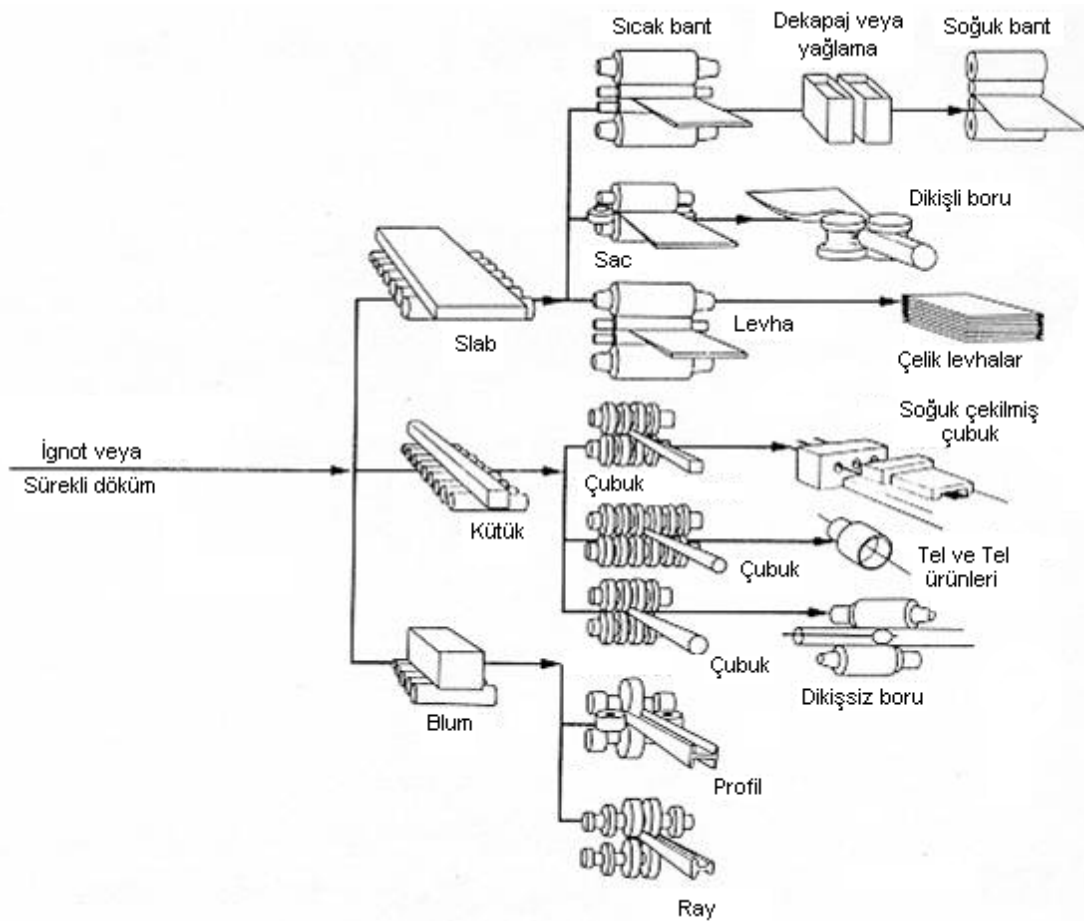
1.2 Kullanım Alanları

Yukarıdaki tanım paralelinde haddeleme işlemi, malzemenin kesitinde bir azalma meydana getirirken boyunu uzatmaktadır. Bu esnada ezilme ve basma meydana gelmektedir. İşlem dövme ve basma işlemi gibi algılanacak olsa bile farkı sürekli olmasıdır. Bu bize zaman kazandırmakta ve ayrıca bu sayede sıcak haddelemede ara tavlamalara gerek kalmadan bloğun ısısından verimli bir şekilde yararlanmamızı sağlamaktadır. Haddeleme ile döküm işleminin ortaya çıkartmış olduğu yapının değiştirilerek sıkı ve ince taneli bir hale getirilmesi

* Askeland, D,R, - Phule P,P, The Science and Engineering of Materials 4th ed.

ve böylece aynen sıcak dövmede olduğu gibi malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi mümkündür.

Haddelene işleminin bir diğer önemli yönü ise ekstüzyonun aksine, belirli bir anda sınırlı bir hacimde basınç ve deformasyon uygulanmasıdır. Böylelikle elde edilen mekanik avantaj sayesinde çok ağır ignotları ve şekil değiştirme dayanımı yüksek olan çelikleri şekillendirmek mümkündür. Bütün bu özellikleri dolayısıyla çelik üretiminin hemen hemen tamamına yakın bir bölümü hadde mamulleri olarak kullanıma sunulmakta ve bunlar bir başka imal usulü ile elde edilememektedir. Yarı mamul olarak yassı, kalın ve ince kütükler (slab, bloom ve billet), çeşitli çelik profiller (kare, yuvarlak, köşebent, ray, I, U, ... V.b), çeşitli saclar (çelik, alüminyum ve türlü metal alaşımları), çelik borular (dikişli ve dikişsiz) başlıca hadde mamulleri olmakla beraber, bunlara hadde ile gerçekleştirilen bazı özel imalatlar da (dönel parçalar, vidalar, dişliler, rulmanlar, vagon tekerlekleri, bandajları, sac profilleri... V.b.) ekleyebiliriz.



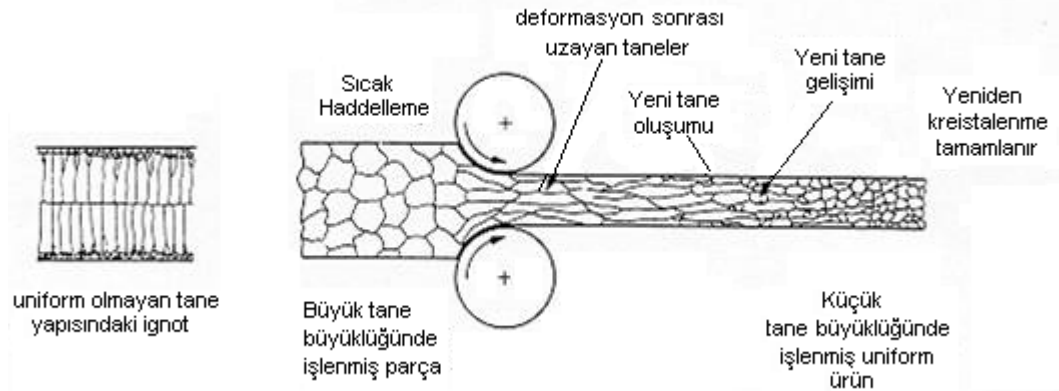
Şekil 1.2 Blum, slab ve kütüklerin haddelenmesi ile elde edilen çeşitli ürünler*

* ÇAPAN, L. (2003), Metallerde Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, İstanbul

1.3 Çeşitleri

1.3.1 Sıcak Haddeleme

Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan şekil değiştirmelerine sıcak şekil verme, hadde için olanlarına da sıcak haddeleme denilir. Yeniden kristalleştirme malzemeye ergime sıcaklığının %40'ı kadar ki bir sıcaklıkta uygulanan bir ısıl işlemdir. Esasen malzemeye, şekil değiştirmeden önceki özellikleri, kazandırmak için kullanılır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı bu olayın bir saat içinde tamamlandığı sıcaklık olarak tanımlanır. Metalin erime sıcaklığı T_e (°Kelvin) ise yeniden kristalleşme sıcaklığı yaklaşık $0.4 \times T_e$ (°Kelvin) mertebesindedir. Bazı malzemelerin yeniden kristalleşmeleri oda sıcaklığında bile olabilir. Mesela kurşun, kalay, çinko ve kadmiyum oda sıcaklığı civarında yeniden kristalleşir. Tavlanan malzemenin azalan şekil değişimi mukavemeti ve artan plastik şekil değişimi özelliğinden faydalanılır. Ergimiş sıvı metal dökme demir kokillere doldurulup katılaşmaya bırakılması ile ıgnotlar, ıgnotların da sıcak haddelenmesi ile de ilk ürün olarak slab, blum veya kütükler elde edilir. Daha sonra bu ürünler tekrar haddelenerek profil, ray, çubuk, saç, boru gibi çok çeşitli hadde ürünleri üretilir. İnce sacların dışındaki hadde mamullerinin hemen hemen tümünde sıcak haddeleme uygulanmaktadır. Sıcak haddeleme ile elde edilebilecek biçim ve ölçü tamlığı sınırlı kalmakla beraber karmaşık ve kapalı profil kesitlerinin haddelenmesi mümkün değildir.

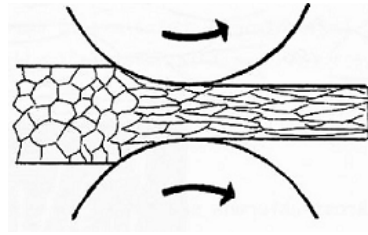


Şekil 1.3 Sıcak haddelemede tane dizilimi*

*<http://www.cse.iitd.ernet.in/~%20cs1050176/Metal%20Forming%20Processes.ppt#292,6>, Change in grains structure in rolling

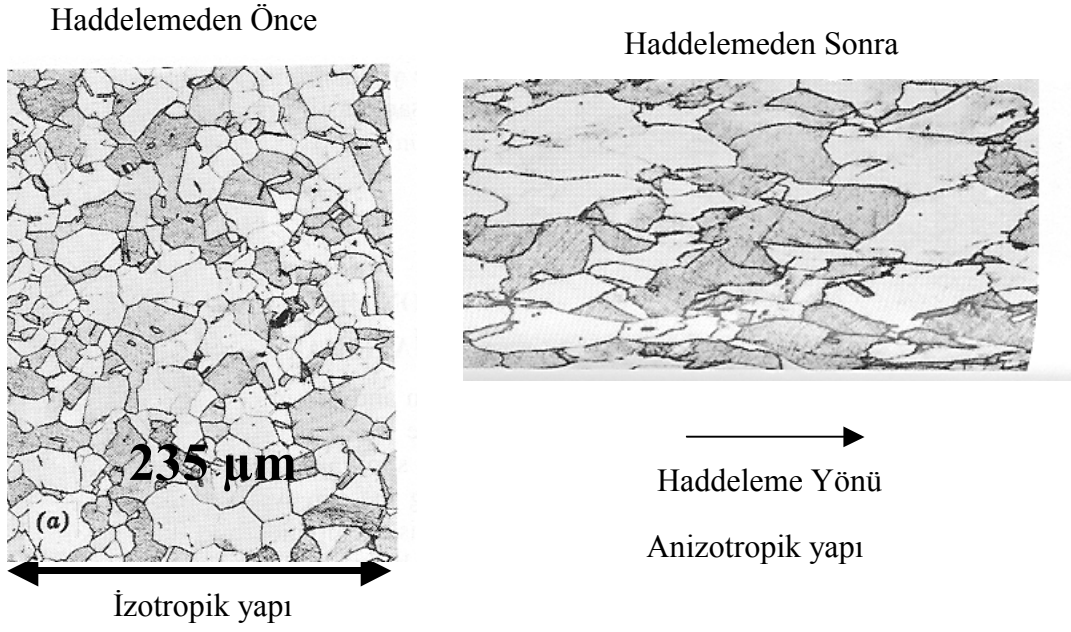
1.3.2 Soğuk Haddeme

İnce kesitli levha, tel ve çubuk gibi mamullerin üretiminde kullanılır. Malzeme yapısında yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda uygulanır. Soğuk haddemede sıcak haddemeye göre daha düzgün çap toleransı ve düzgün yüzeylerde mamul almak mümkündür. Soğuk haddeme sonucu meydana gelen sertlik (gerilme sertliği) mukavemeti arttırmak için kullanılabilir. Soğuk haddelenmiş çelik levhalar için başlama haddesi, devamlı, sıcak şerit haddelerden bozulan sıcak haddelenmiş saçların devamı şeklindedir. Soğuk haddelenmiş levhalar ya sıcak haddelenmiş şeritlerden ya da bakır alaşımları halinde direkt olarak dökümünden sonra soğuk haddelenir. Üç-beş tezgâhlı (arka arkaya) yüksek devirli dörtlü haddeler çelik levha, alüminyum ve bakır alaşımlarının soğuk haddemesi için kullanılır. Soğuk haddemede bloğun kesiti daralırken boyu uzamaktadır. Bu işlem sırasında, ezilme ve bir miktar genişleme görülmektedir. İşlem serbest dövme ve basmaya benzer şekilde gelişmekte, ancak buradaki gibi aralıklı olmayıp sürekli bir şekilde uygulanmaktadır. Böylelikle zaman kazanmak ve sıcak haddemede ara tavlamalara gerek kalmadan bloğun ısısında verimli bir şekilde yararlanmak mümkün olmaktadır. Haddeme ile döküm işleminin ortaya çıkartmış olduğu yapının değiştirilerek sıkı ve ince taneli bir hale getirilmesi ve bu sayede aynen sıcak dövmede olduğu gibi malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 1.4 Soğuk haddemede tane dizilimi*

*www.matpr.kth.se/education/Files/Extentor%204M1347,%20eng/4M1347-exam041209.doc

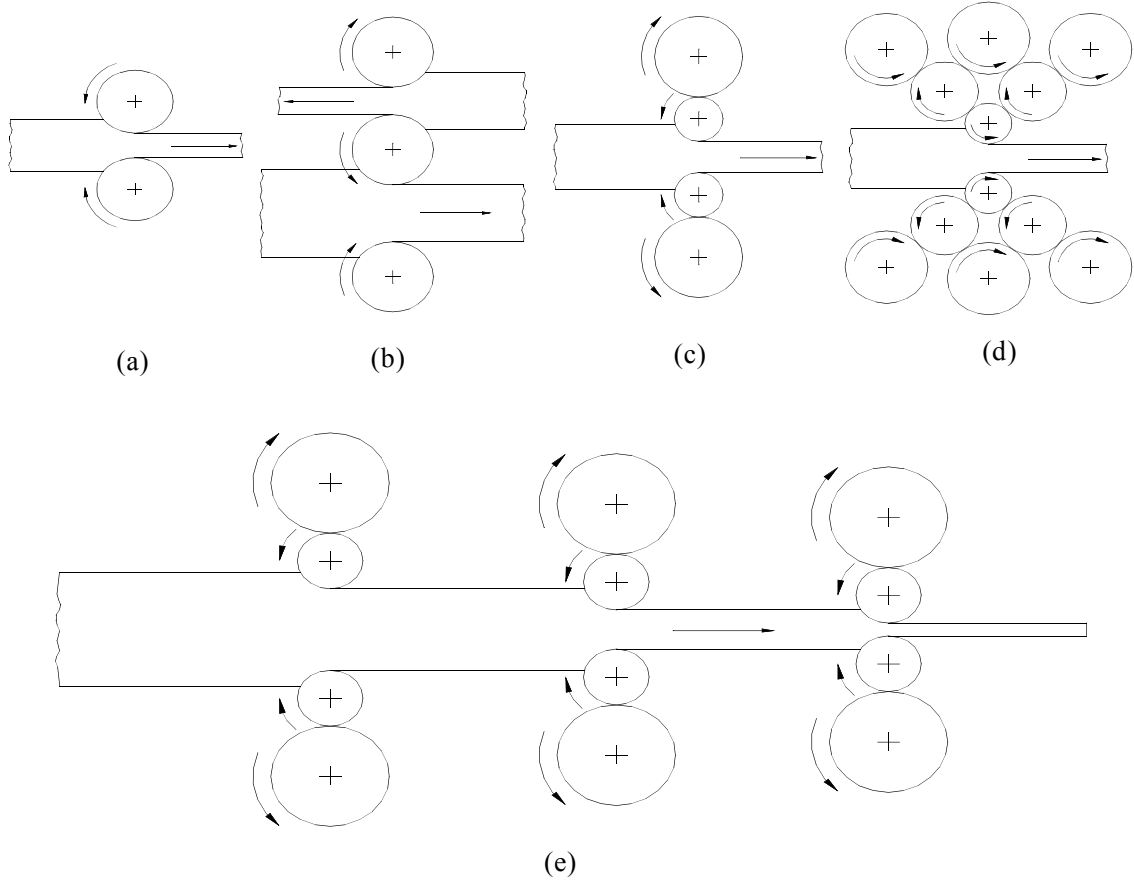


Şekil 1.5 Soğuk haddelemiş polikristal metalde tane dizilimi*

1.3.3 Merdane Düzenleri

Yassı ürünlerin haddelenmesinde en basit merdane düzeni tek yönlü ikili düzendir. Çift yönlü ikili düzende ise malzemenin bir kez haddelendikten sonra, merdanenin üzerinden dolaştırmadan tekrar haddelenebilmesi için merdanenin dönme yönü değiştirilebilir. Üçlü hadde tezgâhında ise üç merdane üst üste dizilmiştir. Malzeme iki yönde de haddelenebilir. (Şekil1.6)

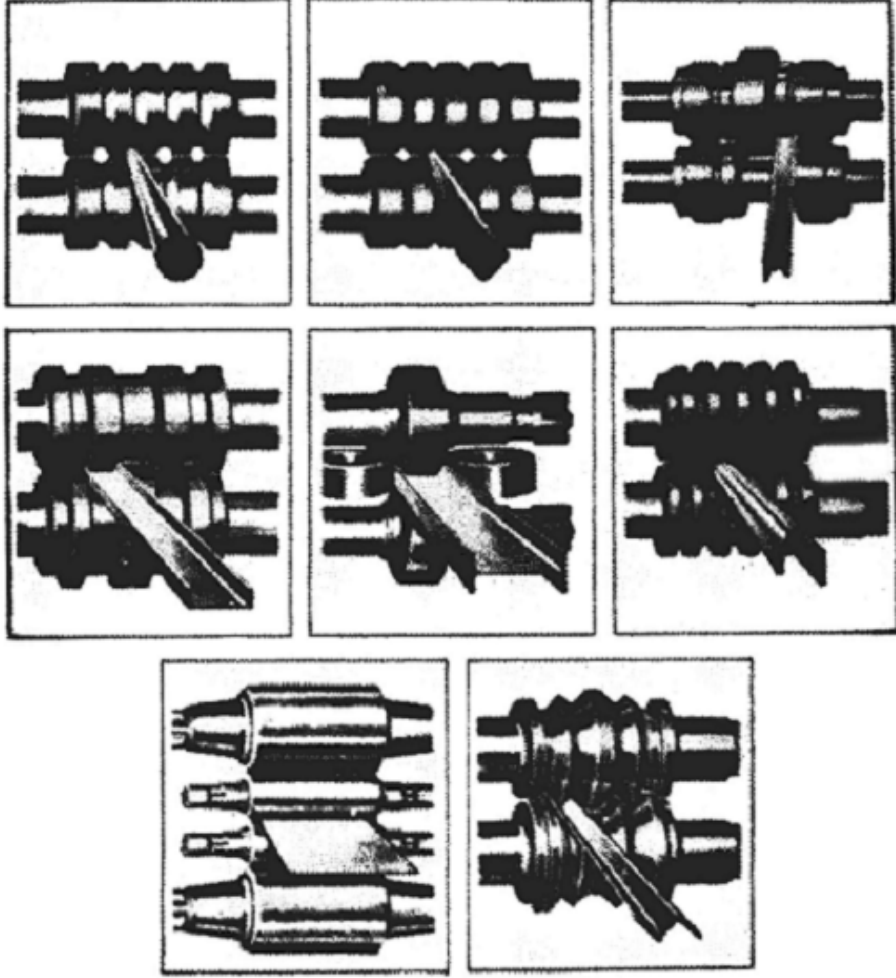
*Moffatt, G.W. Pearsall, and J. Wulff, The Structure and Properties of materials, Vol.1, Structure p.140, John Wiley and Sons, New York, 1964



Şekil 1.6 Çiftli (a), üçlü (b), dörtlü (c), çoklu (d) ve sıralı (e) merdane düzenleri*

Haddeleme kuvvetinin düşürülmesi için merdane çapının küçültülmesi gerekir. Fakat çapla beraber dayanım ve rijitlik de azaldığından küçük çaplı iş merdanelerinin daha büyük çaplı iş merdaneleri ile desteklenmesi gerekir. Dörtlü düzende destek merdaneleri iş merdanelerinin haddeleme doğrultusuna dik doğrultuda eğilmelerini önler. Fakat iş merdaneleri yatay doğrultuda da eğilebileceği için dörtlü düzende iş merdanelerinin çapı belirli bir değerden küçük alınamaz. İş merdanelerini daha da küçültebilmek için 4–10–18 destek merdaneli düzenler geliştirilmiştir. Çok rijit olan yirmili tezgâhlar yüksek dayanımlı ince sacların dar toleranslarla soğuk haddelenmesine özellikle uygundur. Bu tezgâhlarda dayanım, rijitlik ve aşınma gibi faktörler göz önüne alınarak tungsten karbürden üretilen iş merdanelerinin çapı 6 mm ye kadar düşürülebilmektedir. Oniki’li bir düzende ise, örneğin iş merdanelerinin çapı 10 mm, içteki 4 destek merdanesinin çapı 20 mm ve dıştaki 6 destek merdanesinin çapı da 40 mm alınarak 0,5 mm kalınlıktaki nikel rulolarla paso sonunda 0,01 mm ‘ye indirilebilmiştir.

*Dr. J. Stokes, Material Science And Processing Technology, School of Mechanical & Manufacturing Engineering Dublin City University Structure and Properties of Materials, Vol. I, Structure, p. 140, John Wiley and Sons, New York, 1964.)

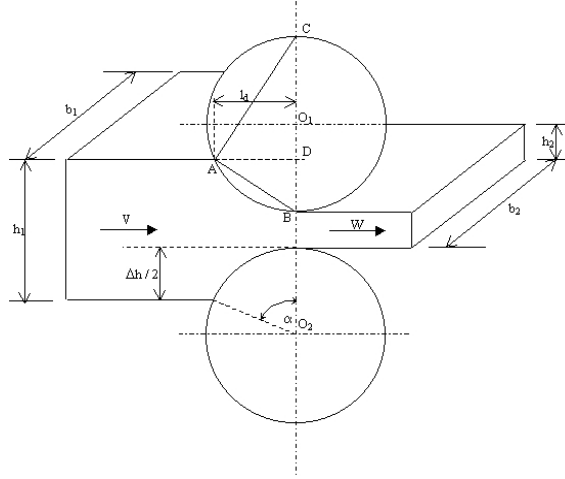


Şekil 1.7 Çubuk ve profillerin haddelenmesi*

1.3.4 Hadde Kuvvetleri

Haddeleme işleminin başlayabilmesi için merdanelerle malzeme arasındaki sürtünme kuvvetinin malzemeyi çekebilecek büyüklükte olması gerekir.

*G. E. Dieter, McGraw-Hill, Mechanical Metallurgy, Inc., 1986



Şekil 1,8 Hadde kuvvetleri

Sürtünme kuvveti merdane ile malzeme arasındaki temas yüzeyinin büyüklüğü ile orantılıdır yukardaki şekilde temas yüzeyi AB yayı ile gösterilmiştir. Buradan hareket ile aşağıdaki geometrik bağıntılar yazılabilir.

ABC üçgeni çapı gören çevre açılı üçgen olduğundan A açısı diktir. Dik üçgen bağıntılarından:

$$AD^2 = BD \times CD \quad (1.1)$$

yazılabilir. Burada:

$$AD = l_d \quad (l_d: \text{temas giriş boyu olarak isimlendirilir.})$$

$$h_1 - h_2 = \Delta h \quad (\text{Ezme olarak isimlendirilir.}) \quad (1.2)$$

$$BD = \frac{1}{2} \Delta h$$

$$CD = 2R - \frac{1}{2} \Delta h \quad (1.3)$$

Bu değerler yukarıdaki eşitliğe konulduğunda:

$$l_d = (R \Delta h - \frac{1}{4} \Delta h^2)^{1/2} \quad \text{eşitliği bulunur.} \quad (1.4)$$

$\frac{1}{4} \Delta h^2$ değeri $R \Delta h$ değeri yanında % 1 hata ile ihmal edilebilir. Bu takdirde:

$$l_d \approx (R \Delta h)^{1/2} \quad \text{yaklaşık değeri kullanılabilir.} \quad (1.5)$$

Yine şekil 1.8'den AB yayının uzunluğu:

$$AB = 2 \pi R \alpha / 360 \approx 0,01745 R \alpha \quad (\alpha \text{ derece cinsinden}) \quad (1.6)$$

α : kapma açısı

R: merdane yarıçapı (paso dibinde)

Hesaplamlarda AB yayı yerine genellikle “ l_d “ kiriş boyu kullanılır. Sonuç olarak temas yüzey alanı:

$$F = AB * b_{or} = 0,01745 R \alpha [(b_1 + 2b_2) / 3)] \approx (R \Delta h)^{1/2} * [(b_1 + 2b_2) / 3)] \quad (1.7)$$

(b_{or}) ortalama genişlik olarak [($b_1 + 2b_2$) / 3)] değeri, $1/2$ ($b_1 + b_2$) değerinin yerine kullanılmıştır. Bu şekilde kullanılması genel tecrübeler sonucunda oluşmuştur. Haddelene işlemlerinde, malzemenin haddelenmesi esnasında hacim kaybı olmaz prensibinden hareketle sabit debi hipotezi uygulanır. Gerçekte, malzemenin haddelenmesi esnasında bir miktar tufal, bir miktar çapak ve bir miktar da ezilme nedeniyle hacim azalması olur. Yapılacak hesaplar için bu kayıplar göz ardı edilebilir.

Bu durumda:

F: malzeme kesit alanı

L: toplam malzeme boyu

$$\text{Haddeye giren malzeme hacmi } V_1 = F_1 L_1 \quad (1.8)$$

$$\text{Haddeden çıkan malzeme hacmi } V_2 = F_2 L_2 \text{ olsun} \quad (1.9)$$

sürekli bir haddelene için:

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \text{ buradan}$$

$$F_1 L_1 = F_2 L_2 = F_3 L_3 = \dots = F_n L_n \text{ yazılır.} \quad (1.10)$$

Kesitler

$$F_1 = b_1 h_1; F_2 = b_2 h_2; F_3 = b_3 h_3 \dots F_n = b_n h_n \quad (1.11)$$

Hacimler

$$V_1 = b_1 h_1 L_1; V_2 = b_2 h_2 L_2; V_3 = b_3 h_3 L_3 \dots V_n = b_n h_n L_n \quad (1.12)$$

Hacimlerin eşitliğinden:

$$b_1 h_1 L_1 = b_2 h_2 L_2 = b_3 h_3 L_3 \dots = b_n h_n L_n \quad (1.13)$$

Her hangi bir tezgâh için bu eşitlikten birisini alalım:

$$b_1 h_1 L_1 = b_2 h_2 L_2 \Rightarrow (b_2 h_2 L_2) / (b_1 h_1 L_1) = 1 \text{ bulunur.} \quad (1.14)$$

Bölünen ve bölen aynı isimli terimler ayrı ayrı alındığında:

$$h_2 / h_1 : \gamma , \text{ Ezme katsayısı} \quad (1.15)$$

$$b_2 / b_1 : \beta , \text{ Yayılma katsayısı} \quad (1.16)$$

$$L_2 / L_1 : \lambda_q , \text{ Uzama katsayısı} \quad (1.17)$$

$$\alpha \beta \gamma = 1 \text{ eşitliği elde edilir.} \quad (1.18)$$

$$\text{Aynı zamanda } F_1 L_1 = F_2 L_2 \text{ eşitliğinden:} \quad (1.19)$$

$$F_1 / F_2 = L_2 / L_1 = \lambda \text{ yazılabilir.} \quad (1.20)$$

Haddeleme işleminde birden fazla tezgah bulunma durumunda, toplam uzama ve ortalama uzamada söz konusu olacaktır.

$$\lambda_1 = F_1 / F_2 = L_2 / L_1 ; \lambda_2 = F_2 / F_3 = L_3 / L_2 ; \lambda_n = F_n / F_{n+1} = L_{n+1} / L_n \text{ yazılacaktır.} \quad (1.21)$$

Taraf tarafa çarpıldığında:

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n = F_1 / F_{n+1} \text{ elde edilir.} \quad (1.22)$$

F_1 ; ilk tezgâha girmeden önceki malzemenin kesit alanı.

F_{n+1} ; Son tezgâhtan çıktıktan sonraki malzemenin kesit alanı.

Bu durumda toplam uzama

$$\lambda_t = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n = F_1 / F_{n+1} \quad (1.23)$$

“n“ adet uzama sonunda meydana gelen toplam uzamanın ortalamasını “ λ_m “ olarak gösterdiğimizizde:

$$\lambda_m^n = \lambda_t = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n = F_1 / F_{n+1} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n = F_1 / F_{n+1} \text{ denkleği yazılabilir.} \quad (1.24)$$

$$\text{Buradan } \lambda_m = (\lambda_t)^{1/n} \text{ veya} \quad (1.25)$$

$$n \log \lambda_m = \log \lambda_t \text{ veya} \quad (1.26)$$

$$n = \log \lambda_t / \log \lambda_m = \log (F_1 / F_{n+1}) / \log \lambda_m = (\log F_1 - \log F_{n+1}) / \log \lambda_m \text{ elde edilir.} \quad (1.27)$$

Aynı hesaplama yöntemi ile gidildiğinde, γ_m , β_m arasında da benzeri ilişkiler kurulabilir
Yakalama açısından bakılacak olursa

$$T = \mu N \quad (1.28)$$

N: Normal kuvvet, T : Sürtünme kuvveti, μ : Sürtünme katsayısı

Haddeleme işleminin başlama koşulu

$$N. \sin \varnothing_m \leq \mu N. \cos \varnothing_m \text{ bu denklemden} \quad (1.29)$$

$$\text{tg } \varnothing_m \leq \mu \quad (1.30)$$

Ufak açılarda $\varnothing_m \leq 90^\circ$ için (ince saçların soğuk haddelenmesi için)

$\theta_m = \mu$ alınarak,

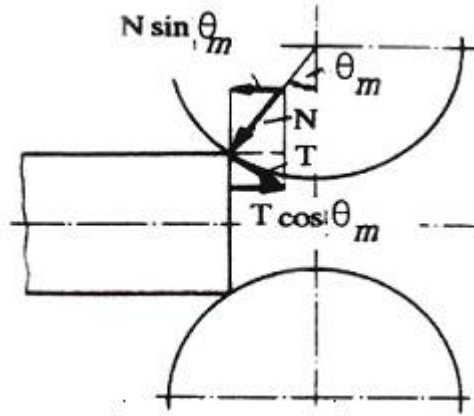
$\theta_m \leq \mu$ elde edilebilir.

Giriş düzlemi ile merdanelerin merkezini birleştiren düzlem arasındaki “ θ_m ” açısı kavrama açısı veya temas açısı olarak adlandırılır. Bu bağlamda kavrama açısının en büyük değeri

$$(\theta_m)_{\max} = \text{tg}^{-1} \mu \text{ olarak alınabilir.} \quad (1.31)$$

$\mu > \text{tg} \theta_m$ ise haddelenme başlar. Aksi takdirde malzeme merdaneler arasında ilerleyemez.

Bunu yerine geriye doğru itilir. Soğuk haddelenmede μ değeri 0,2 ile 0,7 arasında olabilir.



Şekil 1.9 Hadde kuvvetleri*

1.4 Levha ve Sacların Haddelenmesi

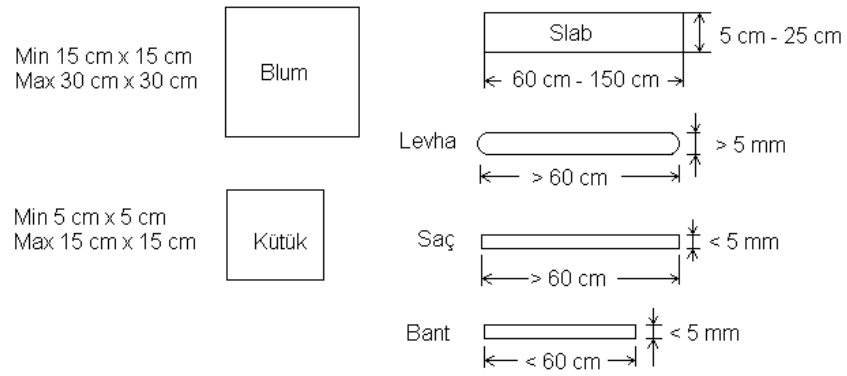
Levhalar ağırlığı 2 tonu bulan slabların sıcak haddelenmesi ile elde edilir. Haddelenme işlemi iki kademedir oluşur. Birinci kademedir, slab, bir veya iki kez uzunluğu doğrultusunda haddelendikten sonra yatay düzlemde 90° döndürülerek bu defa merdaneler arasına geniş tarafından sokularak istenilen levha eni elde edilene kadar haddelenir. İkinci kademedir tekrar 90° döndürülen slab, istenilen kalınlık elde edilene kadar uzunluk doğrultusunda haddelenir.

Levhaların haddelenmesinde iki ya da üçlü merdane düzenleri kullanılır. Sacların haddelenmesi sıcak ve/veya soğuk olarak yapılır. Sıcak haddelenmede, slablardan hareketle, 600...2200 mm (bazen de daha fazla) enine ve 1,25...12 mm kalınlığında saç ve levhalar elde edilir. Daha sonra soğuk haddelenecek olan saclar, modern tesislerde, rulo halinde sarılır. Bu rulolar soğuk haddelenmeden önce dekapaj ve başka hazırlık işlemlerinden geçirilir. Soğuk

*ÇAPAN, L. (2003), Metallerde Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, İstanbul

haddeme kademeleri arasında, gerektiği takdirde pekleşmenin giderilmesi için, malzemeye atmosfer kontrollü fırınlarda yeniden kristalleşme tavı uygulanmalıdır.

Soğuk haddelenmiş ve tavlanmış çelik saçlarda ve diğer malzemelerde temper haddemesi uygulanır. Temper haddemesi, şekil değiştirme oranı %0,5...1,5 gibi çok düşük bir soğuk haddeme işlemdir. Bu işlemin amacı saça daha sonra plastik şekil verilirken, örneğin derin çekmede, belirgin akma ve dolayısıyla Lüders bantlarının oluşumunu engelleyerek yüzey görünümünün bozulmamasını sağlamaktır. Temper haddemesinden sonra saça şekil değişimi yaşanmasına uğramadan plastik şekil verilmelidir. Aksi halde, yani depolamada belirli bir süre aşılırsa, plastik şekil verme sırasında belirgin akma ve Lüders bantları yeniden görülür. Saçlar standart ölçülerde plakalar veya rulo şeklinde satışı sunulmaktadır.



Şekil 1.10 Hadde malzemeleri ve kesit ölçüleri*

*ÇAPAN, L. (2003), Metallerde Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, İstanbul

1.5 Alüminyum

Çizelge 1,1 Al malzemesine ait bazı değerler

13 Al 26,981596	Atom numarası	13	
	Atom ağırlığı	26.981.539	
	Elektron Konfigürasyonu	2-2-6-2-1	
Elektron dizilişi: 1s-2s-2p-3s-3p-3d-4s-4p-4d-4f-5s-5p-5d-5f-6s-6p-6d-7s			
Mekanik Özellikler		Şartlar	
		Fazı	Sıcaklık(C°)
Yoğunluğu	2700 kg/m ³	Katı	24
Elastiklik Modülü	62.053 Gpa	Katı	-273,15
Poisson Oranı	0.35	Katı	
Isıl Genleşme Katsayısı	-173,15 °C	Katı	24
Elektriksel Özellikler		Sıcaklık (°C)	
		Elektrik Direnci	2.655 × 10-8 W-m
Isıl Özellikler		Sıcaklık (C)	Basınç (pa)
		Erime Sıcaklığı	670 °C
Kaynama Sıcaklığı	2518 °C		101325
Kritik sıcaklık	7575 °C		
Erime Entalpisi	397 J/g	-273,15	101325
Buharlaşma Entalpisi	10896.34 J/g	-273,15	101325
Isıl Kapasite	897 J/kg-K	24°C'den fazla...	100000
Isıl iletkenlik	237 W/m-K	27°C'den fazla	101325

Alüminyum, yeryüzünde oksijen ve silisyum'dan sonra en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen, endüstriyel çapta üretimi 1886 yılında elektroliz yönteminin kullanılmaya başlanması ile gerçekleşmiştir.

Alüminyum, diğer çok kullanılan metaller olan demir, kurşun ve kalay gibi, doğada bileşikler halinde bulunur. Alüminyumu oksit halindeki bileşiğinden ilk ayıran ve elde eden kişi, 1807 yılında, *Sir Humprey Davy* olmuştur. Daha sonra, *Hans Christian Oersted*, *Frederick Wöhler* ve *Henri Sainte-Clairre Deville*, alüminyum eldesinde yenilikler getirmişlerdir.

Alüminyumun endüstriyel çapta üretimi ise, 1886 yılında ABD'de *Charles Martin Hall* ve Fransa'da *Paul T. Heroult'un* birbirlerinden habersiz olarak yaptıkları elektroliz yöntemi ile başlamıştır. Bu, günümüzde halen kullanılan yöntem olduğundan, 1886 yılı alüminyum

endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilir.

1886 yılında *Werner von Siemens'in* dinamoyu keşfi ve 1892 yılında *K.J.Bayer'in*, boksitten alümina eldesini sağlayan *Bayer* prosesini bulması ile alüminyumun endüstriyel çapta üretimi çok kolaylaşmış ve bu en genç metal, demir çelikten sonra dünyada en çok kullanılan ikinci metal olmuştur.

1.5.1 Saf Alüminyumun Özellikleri

Saf alüminyum içerisine katılan bir takım maddelerle özellikleri değiştirilebilir. Alüminyumun metal olarak özellikleri bir çok durumda onun ideal ve ekonomik bir malzeme olmasını sağlar. Alüminyumun genel özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Alüminyum hafiftir. Aynı hacimdeki bir çelik malzemenin ağırlığının ancak üçte biri kadar ağırlıktadır.
- Alüminyum, hava şartlarına, yiyecek maddelerine ve günlük yaşamda kullanılan pek çok sıvı ve gazlara karşı dayanıklıdır.
- Alüminyumun yansıtma kabiliyeti yüksektir. Gümüşü beyaz renginin bu özelliğe olan katkısı ile beraber gerek iç gerekse dış mimarî için cazibeli bir görünüme sahiptir. Alüminyumun bu güzel görünümü, anodik oksidasyon (eloksal), lâke maddeleri vs. gibi uygulamalar ile uzun müddet korunabilir. Hatta birçok uygulamada tabii oksit tabakası bile yeterli olur.
- Çeşitli alüminyum alaşımlarının mukavemeti, normal yapı çeliğinin mukavemetine denk veya daha yüksektir.
- Alüminyum elastik bir malzemedir. Bu nedenle ani darbelere karşı dayanıklıdır. Ayrıca, dayanıklılığı düşük sıcaklıklarda azalmaz. (Çeliklerin, düşük sıcaklıklarda ani darbelere karşı mukavemeti azalır).
- Alüminyum, işlenmesi kolay bir metaldir. Öyle ki, kalınlığı 1/100 mm' den daha ince olan folyo veya tel haline getirilebilir.
- Alüminyum ısı ve elektriği bakır kadar iyi iletir.
- Alüminyuma şekil vermek için döküm, dövme, haddeleme, presleme, ekstrüzyon, çekme gibi tüm metotlar uygulanabilir.
- Alüminyum 40–540 N/mm² ortalama mukavemeti ile bir çok kullanım alanı için optimum çözümler sunmaktadır.

1.5.2 Alüminyum'un Eldesi

Alüminyum, yüzyıldan beri, tüm dünyada aynı yöntemle elde edilmektedir. Alüminyum eldesi, iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada, Bayer metodu ile boksit cevherinden alümina elde edilir. İkinci aşamada ise, elektroliz ile alümina'dan alüminyum elde edilir. Alümina tesisleri, genellikle boksit cevherlerinin yanına kurulur. Madenden çıkarılan boksit cevheri, sudkostik eriyiği ile muamele edilerek alüminyum hidroksit eldesi gerçekleşir. Bu işlem sonucunda oluşan erimeyen kalıntılar (kırmızı çamur) ayrılır ve alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile "alümina" (alüminyum oksit) elde edilir.

Bundan sonraki aşama, "alümina"nın "alüminyum"a dönüştürülmesidir. Beyaz bir toz görünümündeki alümina, elektroliz işleminin yapılacağı hücre adı verilen özel yerlere alınır.

Burada amaç, alüminyum oksijenden ayırmaktır. Elektroliz işlemi için 4-5 volt gerilmede doğru akım uygulanır. Dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanır.

Genel olarak, ağırlıkça 4 birim boksitten 2 birim alümina ve 2 birim alüminadan da 1 birim alüminyum elde edilir.

İlk zamanlarda üretilen birincil alüminyumun her tonu için 42.000 kwh olan enerji sarfiyatı, günümüzde ortalama 16.500 kwh değerine düşmüştür. Bu değer, en yeni teknoloji ile çalışıldığında 13.000 kwh/t olmaktadır.

Yukarıda sözedilen işlemler ile elde edilen alüminyum "birincil alüminyum" (primary aluminium) olarak tanımlanır.

1.5.3 Alüminyum Ürünlerin Üretim Yöntemine Göre Sınıflandırılması

Alüminyum, ekstrüzyon, haddeleme ve döküm işlemleri ile çeşitli yarı- ürün ve ürünler haline dönüştürülür.

Ekstrüzyon ürünleri

Ekstrüzyon yöntemi ile çeşitli kesitlerde alüminyum profil, çubuk, boru, lamalar ve filmasının elde edilir. Alüminyum, ekstrüzyon işlemine çok uygun bir metaldir. Böylece, kullanım amacına uygun şekil ve ölçülerde pek çok ürün, başka bir biçimlendirme işlemine gerek kalmadan ekonomik bir şekilde üretilir.

Yassı Ürünler

Sıcak ve soğuk haddeleme yöntemi ile üretilen plaka, levha ve folyo gibi yassı ürünlerdir.

Döküm Ürünleri

Alüminyumdan, kokil, basınçlı veya kum döküm yöntemleri ile çeşitli büyüklük ve şekilde parçalar üretilir.

Alüminyum İletkenler

Bakırdan daha hafif olan alüminyum, elektrik enerjisinin nakledilmesinde büyük avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle günümüzde enerji nakil hatları alüminyumdan yapılmaktadır. Alüminyum iletkenler, sürekli döküm ile filmaşın eldesi, filmaşının haddede çekilerek tel haline getirilmesi ve tellerin örülmesi, ile oluşan üç aşamalı proses ile üretilirler

1.5.4 Alüminyum Kullanımının Endüstrilere Göre Gruplandırılması

1.5.4.1 Alüminyum ve İnşaat

İnşaat sektörü, yılda Avrupa'da 1,2 milyon ton, ABD'de 1.05 milyon ton, Japonya'da 915.000 ton alüminyum kullanmaktadır. (2000 yılında dünyada mimari amaçla alüminyum kullanımı)

Alüminyum, binaların çatı ve cephe kaplamalarında, kapı ve pencerelerinde, merdivenlerde, çatı iskeletinde, inşaat iskelelerinde ve sera yapımında büyük miktarda kullanılır

Alüminyumun sağlamlığı yanında sahip olduğu dekoratif görünüm, eloksal (anodik oksidasyon) kaplama ile bir bakıma ölümsüzleşir. Gerek natürel veya renkli eloksal kaplama, gerek ise lake kaplama (elektrostatik toz veya sıvı boyama) ile alüminyum; mimar ve mühendislere inşaat sektöründe zengin seçenekler sunar. İnşaat sektöründe; alüminyum ekstrüzyon, yassı-ürünler ve döküm ürünleri kapı/pencere doğramaları, cephe/çatı kaplamaları ve aksesuarların yapımında kullanılır.

1.5.4.2 Alüminyum ve Ambalaj

Alüminyum, en kullanışlı ambalaj malzemelerinden birisidir. Alüminyum konteyner imalatından ilaç kutularına kadar çok çeşitli ambalaj uygulamalarına mükemmel cevap verir. Banyoda diş macunu tüpünden, marketlerdeki sayısız ürüne (çikolata vb.) mutfakta folyoya sarılı fırın yemekleri ve buzdolabındaki soğuk meşrubatlara kadar, alüminyum pek çok ürünü sarar ve korur.

Alüminyumun homojen yapısı, ince folyo (alüminyum kağıt) şeklinde üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve kolay şekillenebilmesi onu ideal bir ambalaj malzemesi yapar.

Alüminyum folyo, hava ve mor-ötesi ışınları geçirmediğinden, gıdaları doğal renk ve tatları

ile birlikte korur. Alüminyum, folyo olarak vakumlu ambalajlarda, metalize film (alüminyum kaplı plastik) olarak da ısı ile kapanan ambalajlarda (yoğurt, ilaçlar vb) en çok tercih edilen malzemedir.

Alüminyumun en yaygın kullanıldığı alanlardan birisi de, meşrubat ve bira kutularıdır. Dünyada kullanılan tüm içecek kutularının % 80' i alüminyum kutularıdır. Bunun nedeni, hafif açılması kolay, darbeye dayanıklı, sağlam, çabuk soğutma özelliği ve geri kazanılabilir olmalarıdır.

Kullanılmış alüminyum içecek kutularının yüksek hurda değeri, geri kazanma için kutularının toplanmasını kolaylaştırır.

Kullanılmış alüminyum kutuların tüketiciden satın alınması ile başlayan geri kazanma işlemi sonucunda, yeni kutular üretilmektedir.

1989 yılında kullanılan alüminyum meşrubat kutularının geri kazanma oranı ABD'de % 61, Avustralya'da % 60, Kanada'da % 45, Japonya'da % 42, Avrupa'da % 16 olmuştur. Bu oranlar, her yıl artmaktadır. Alüminyumdan yapılan diğer ambalajların atıklarından enerji elde eden yeni bir proses bulunmuş ve Avrupa'da kullanılmaya başlanmıştır.

1.5.4.3 Alüminyum ve Taşıt Araçları

Alüminyum, ulaşım sektöründe taşıt araçlarının üretiminde kullanılan en önemli malzemelerden birisidir. Alüminyum kullanımının yaklaşık % 25'i taşıt araçlarının üretimine aittir. (2000 yılında ABD Avrupa ve Japonya'da otomotiv sektöründe alüminyum kullanımı) Taşıt araçları ne kadar hafif olursa, hareket etmeleri için daha az enerjiye gerek duyulur. Günümüzde bir otomobilde 50 kg alüminyum kullanılmaktadır. Bu sayede, yaklaşık 100 kg demir, çelik ve bakır malzeme tasarrufu yapılmaktadır. Yapılan hesaplar ve deneyimler sonucunda, alüminyum kullanılan bir otomobilin, yeterince alüminyum kullanılmamış bir otomobile kıyasla, ekonomik ömrü boyunca 1500 litre daha az yakıt harcadığı anlaşılmıştır. Bu durumun gerek sürücülerin akaryakıt masraflarına sağlayacağı ekonomi ve çevre sağlığı açısından atmosfere yayılan atık ekzos gazının düşürülmesi yönünden çok büyük faydası bulunmaktadır.

Otobüs ve tren gibi sık sık hareket eden ve duran araçlarda, aracın hafif olması daha da fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde otobüs, tren, kamyon gibi büyük kara araçlarında alüminyum kullanımı ile önemli yakıt tasarrufu sağlanmaktadır.

Otomotiv sektöründe araç başına alüminyum kullanımı 2003 yılı itibarı ile ortalama olarak

aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 1,2 Al malzemesine otomotiv endüstrisinde kullanım oranları*

Taşıt Komponenti	Kuzey Amerika (Kg)	Avrupa (Kg)
Motor	40,0	35,2
Transmisyon	26,5	15,5
Jantlar	18,0	11,4
Radyatör	14,5	10,5
Şase ve süspansiyon	3,0	4,4
Direksiyon sistemi	2,8	2,7
Kaporta sacı	2,2	2,9
Diğer parçalar	9,0	7,4
Toplam	116,0	90,0

Bazı otomotiv markalarında araç başına kullanılan alüminyum miktarı şu şekildedir

Çizelge 1,3 Al malzemesine otomotiv modellerine göre kullanım oranları*

Üretici	Araç başına alüminyum miktarı (Kg)
Nissan Z	165
Honda S 2000	165
BMW Z8	450
Audi A2	290
BMW 5 Serisi	210
Oldsmobile Aurora	223
Dodge Viper	209
Ford Thunderbird	179

Ayrıca karayolları trafik ve yön işaret sistemlerinde, otoyol parafet ve köprülerinde alüminyum kullanımı artmaktadır. Deniz araçlarında, özellikle teknelerde alüminyum süper-yapı sistemleri ile ağırlık merkezi daha aşağıya çekilmekte ve böylece teknenin dengesi artırılmakta ve daha çok kullanım hacmi sağlanmaktadır. Küçük teknelerin ve yatların yelken direkleri alüminyumdan yapılmaktadır. Bir uçağın ağırlıkça %70'i alüminyumdan

*ESTAL 2003

oluşmaktadır. Alüminyum alaşımlarının hafifliği yanısıra sağlamlığı, uçakların ve dolayısı ile havacılık sektörünün gelişmesine en büyük katkıyı yapmıştır. Duralüminyum (alüminyum-bakır) alaşımlarından sonra gelecekte en önemli uçak malzemesi alüminyum-lityum alaşımları olacaktır. Alüminyum-lityum alaşımları ile, uçakların % 15 hafiflemesi mümkündür.

1.5.4.4 Alüminyum ve İletkenler

Alüminyum son derece iletken bir metaldir. Bu nedenle, tüm alüminyum kullanımının Avrupa'da % 10'u, ABD'de % 9'u, Japonya'da % 7'si elektrik ve elektronik sektöründe kullanılmaktadır. Alüminyumun bu alanda en çok kullanıldığı yer, elektrik nakil hatlarıdır. Çelik özlü alüminyum iletkenler, yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında tercih edilen tek malzeme olmuştur. Alüminyum, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve motor bobin sarımında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Elektronikte, alüminyum kullanım yerleri arasında, şaseler, yongalar, transistör soğutucular, data kayıt diskleri ve elektronik cihazların kasaları bulunmaktadır.

1.5.4.5 Alüminyum ve Diğer Mühendislik Uygulamaları

Makina elemanları uygulamalarında, yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyona dayanımı ve işleme kolaylığı, alüminyumun üstün özellikleridir. Hafifliği nedeniyle, büyük ve tek parçaların manüplasyonu mümkün olur. Hassas toleranslarda işleme kolaylığı sayesinde, standart birimlerden büyük parçaların yapılması mümkün olur. Karmaşık kesitli parçaların üretiminde, alüminyum ekstrüzyonu büyük avantajlar sağlar.

Vites kutuları, motor blokları ve silindir kafaları kolaylıkla alüminyum döküm ile yapılır. Son uygulamalarda krank mili yataklarında alüminyum kullanılması, bu parçaların uzun ömürlü olmasını sağlamıştır.

Son yıllarda otomotiv piyasasında yanlışlıkla "çelik jant" denilen gösterişli, parlak, boya ve bakım gerektirmeyen "hafif alaşımlı" jantlar "alüminyum" dur

Çizelge 1.4 Al çeşitleri bileşimleri (% ağırlık)*

		Al	Cu	Fe	Si	Zn	Mn	Ti	Diğerleri	
									Herbiri	Toplam
Saf (Ticari) Alüminyum	ETİAL-F1	98	0.15	0.66-0.99	0.35	0,1	0,1	0,05	0,1	0
	ETİAL-F	95	1,5	5	1	1,5	1	0,05	0,1	1
	ETİAL-0	99	0.05-0.15	0.70	0.25	0.06	-	0.05	0.05	0.15
	ETİAL-1	99	0,05	0,8	0,35	0,1	0,05	0,05	0,05	0,15
	ETİAL-3	99,3	0.05	0.60	0.35	0.06	0.05	-	0.05	0.15
	ETİAL-5	99,5	0.05	0.40	0.25	0.05	-	0.05	0.03	0.10
	ETİAL-6	99,6	0.04	0.30	0.20	0.05	-	0.04	0.03	0.10
	ETİAL-7	99,7	0.03	0.25	0.15	0.04	-	0.03	0.03	0.10
İletken Alüminyum	ETİAL-5E	-	-	0.40	0.15	-	-	-	0.02	0.10
	ETİAL-6E	99,6	-	0.30	0.10	-	-	-	0.02	0.10
	ETİAL-7E	99,7	-	0.25	0.10	-	-	-	0.02	0.10

Çizelge 1.5 İletken ve ticari Al diğer standartlardaki karşılıkları*

	ETİBANK	TSE	DIN (B.ALM.)	A.A (ABD)	N.F (FR.)	ALCAN	UNI (İT.)	B.S (İNG.)	A.S.T.M	ISO	GOST
Saf (Ticari) Alüminyum	ETİAL-F1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ETİAL-F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ETİAL-0	Al99.0	Al99.0	1100	A45	D25	3567	1C	1100	Al99.0	-
	ETİAL-3	-	-	1030	A4	-	-	-	-	-	AD1
	ETİAL-5	Al99.5	Al99.5	1050	A5	IS(15010)	4507	1B	-	Al99.5	A1,A5
	ETİAL-6	-	-	1060	A6	9950(16020)	-	-	ER1060	-	A0,A6
	ETİAL-7	Al99.7	Al99.7	1070	A7	99.70(99700)	P-AIP-99.7	L48	-	Al99.7	A7
İletken Alüminyum	ETİAL-5E	-	E-Al99.5	EC	A5/L	C1S(15040)	-	1E	-	-	A1M
	ETİAL-6E	-	E-Al99.6	EC	A6/L	B1S(16040)	-	1E	-	-	-
	ETİAL-7E	-	E-Al99.7	EC	A6/L	16040	-	1E	-	-	-

* <http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfam1a.html>

Çizelge 1.6 Al çeşitleri bileşimleri (% ağırlık)*

ETİALNORM	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Diğerleri	
									Herbiri	Toplam
ETİAL-20 ¹	0,7	0,4	5,00-6,00	0,05	0,05	0,3	0,05	0,05	0,05	0,15
ETİAL-21 ²	0,7	0,50-1,00	3,90-5,00	0,40-1,20	0,20-0,80	0,25	0,15	0,1	0,05	0,15
ETİAL-22 ²	0,7	0,20-0,80	3,50-4,50	0,40-1,20	0,40-0,80	0,25	0,15	0,1	0,05	0,15
ETİAL-24 ²	0,5	0,5	3,80-4,90	0,30-0,90	1,20-1,80	0,25	0,15	0,1	0,05	0,15
ETİAL-30	0,7	0,6	0,05-0,20	1,00-1,50	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,15
ETİAL-31	0,7	0,3	0,25	1,00-1,50	0,80-1,30	0,25	0,05	0,05	0,05	0,15
ETİAL-33	0,7	0,5	0,1	0,9-1,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,05	0,15
ETİAL-35	0,7	0,6	0,3	0,3-0,8	0,2-0,8	0,4	0,1	0,2	0,05	0,15
ETİAL-43 ³	0,5	0,4	1,60-2,60	0,2	2,60-3,40	6,80-8,00	0,2	0,18-0,35	0,05	0,15
ETİAL-44 ⁴	0,5	0,4	1,20-2,00	0,3	2,10-2,90	5,10-6,10	0,2	0,18-0,35	0,05	0,15
ETİAL-50	0,7	0,3	0,2	0,20-0,70	0,50-1,10	0,25	0,05	0,1	0,05	0,15
ETİAL-51	0,7	0,4	0,2	0,1	1,10-1,80	0,25	0,05	0,1	0,05	0,15
ETİAL-52 ⁵	0,3	0,2	0,1	0,1	2,20-2,80	0,1	0,05	0,15-0,35	0,05	0,15
ETİAL-53 ⁵	0,4	0,3	0,05	0,20-0,60	2,70-3,70	0,2	0,2	0,3	0,05	0,15
ETİAL-54	0,5	0,4	0,15	0,10-0,50	1,70-2,40	0,15	0,15	0,15	0,05	0,15
ETİAL-60	0,3	0,30-0,70	0,1	0,2	0,40-0,90	0,1	0,1	0,05	0,05	0,15
ETİAL-61	0,4	0,70-1,30	0,1	0,40-0,80	0,40-0,90	0,2	0,1	0,2	0,05	0,15
ETİAL-62	0,5	0,70-1,30	0,1	0,40-1,0	0,60-1,20	0,2	0,1	0,25	0,05	0,15
ETİAL-64 ⁷	0,2	0,55-0,65	0,03	0,05	0,55-0,65	0,05	0,03	0,05	0,05	0,15
ETİAL-65	0,7	0,40-0,80	0,15-0,40	0,15	0,80-1,20	0,25	0,15	0,04-0,35	0,05	0,15
ETİAL-98	0,6-1,0	0,5-0,9	0,1	0,1	0,05	0,1	0,08	0,05	0,05	0,15

1) Pb00.20-0,60

Bi00.20-0,60

3) Fe/Si = 2,00 min

Mn+Cr = 0,30 max

4) Ti + Zr = 0,25 max

5) Fe+Si = 0,45 max

6) Limitler verilmemiş ise max değerlerdir

* <http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfaml1a.html>

Çizelge 1.7 İşlem alaşımlarının diğer standartlardaki karşılıkları*

ETİBANK	TSE	DIN (B.ALM.)	A.A (ABD)	N.F (FR.)	ALCAN	UNI (İT.)	B.S (İNG.)	CSA	A.S.T.M	ISO	GOST
ETİAL-20	AlCuBiPb	AlCuBiPb	2011	A-U5PbBi	28S	P-AlCu5,5Pb	FCI	CB60	CB60A	AlCu6BiPb	-
ETİAL-21	AlCuSiMn	AlCuSiMn	2014	A-U4 SG	26S	P-AlCu4,SiMnMg	H15	-	2014	AlCu4SiMg	AK8
ETİAL-22	AlCuSiMg1	AlCuMg1	2017	A-U4 G	17S	P-AlCu4MgMn	-	CM41	CM41A	AlCu4MgSi	1100
ETİAL-24	AlCuMg2	AlCuMg2	2024	A-U4 G1	24S	P-AlCu4,5MgMn	L97	CG42	2024	AlCu4Mg1	1160
ETİAL-30	AlMnCu	AlMnCu	3003	A-MI	D35	P-AlMn1,2Cu	-	MC10	3003	AlMn1Cu	AMts
ETİAL-31	AlMn1Mg1	AlMn1Mg2	3004	A-MIG	4S	P-AlMn1,2Mg	-	-	3004	AlMn1Mg1	Amts-2
ETİAL-33	AlMn1	AlMn	3103	M	-	3568	N3	-	-	AlMn1	-
ETİAL-35	AlMn0,5Mg0,5	AlMn0,5Mg0,5	3105	-	-	-	N31	-	-	AlMn0,5Mg0,5	-
ETİAL-43	-	-	7178	-	6227	-	-	-	-	AlZn7MgCu	W96
ETİAL-44	AlZnMgCu1,5	AlZnMgCu1,5	7075	A-Z5Gu	75S	P-AlZn5,5MgCu	DDT5074A	ZG62	7075	AlZn5,5MgCu	W95A
ETİAL-50	AlMg0,8	AlMg1	5005	A-Go,6	B57S	P-AlMg0,8	N41	B57S	G1B	AlMg1	AM91
ETİAL-51	AlMg1,5	-	5050	A-G1,5	A57S	P-AlMg1,5	-	A57S	ER50	AlMg1,5	-
ETİAL-52	AlMg2,5	AlMg2,5Cr	5052	A-G2,5C	57S	P-AlMg2,5	N41	GAZ0	5052	AlMg2,5	1520
ETİAL-53	AlMg3	AlMg3	5754	A-G3	C54S	P-AlMg3,5	N5	-	5154	AlMg3	1530
ETİAL-54	AlMg2Mn0,3	AlMg2Mn	5251	A-G2m	-	P-AlMg2Mn	L80	M57S	-	AlMg2	-
ETİAL-60	AlMgSi0,5	AlMgSi0,5	6063	A-GS	50S	P-AlSi0.4Mg	H9	GS19	6063	AlMg0,7Si	1310
ETİAL-61	AlMgSi1	AlMgSi1	6351	A-SGM	B51S	P-AlSiMgMn	H30	SIGILIP	-	AlSiMg0,5Mn	1350
ETİAL-62	AlMSi1	AlMgSi1	6082	A-SGM0,7	-	P-AlSiMgMn	H-30	-	-	Al Si Mg Mn	-
ETİAL-64	-	E-AlMgSi	6463	A-GS/L	C50S	P-AlSi0,5Mg	91-E	-	-	-	Al31
ETİAL-65	AlMgSiCu	AlMgSiCu	6061	6061	65S	P-AlMgSiCu	H-20	-	-	AlMgSiCu	-
ETİAL-98	AlFeSi	AlFeSi	8011	-	-	-	-	-	-	-	-

* <http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfaml1a.html>

Çizelge 1.8 Alaşımli külçelerin bileşimleri (% ağırlık)*

ETİNORM	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Sn
ETİAL-110 ²	0,7	4,00-6,00	2,00-4,00	0,20-0,60	0,15	0,2	0,3	0,2	0,1	0,05
ETİAL-120	0,5	4,50-6,00	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
ETİAL-140	0,6	11,50-13,50	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,15	0,1	0,05
ETİAL-141	1	11,50-13,50	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,15	0,1	0,05
ETİAL-145	0,6	11,00-13,00	0,80-1,50	0,2	0,80-1,40	0,2	0,80-1,30	0,1	0,1	0,05
ETİAL-147	0,25	8,70-9,10	3,40-3,70	0,2	0,40-0,80	0,2	0,2	0,1	0,1	0,05
ETİAL-150	1	11,00-13,00	1,75-2,50	0,5	0,4	0,7	0,3	0,15	0,1	0,1
ETİAL-160	1	7,50-9,00	3,00-4,00	0,5	0,3	1	0,2	0,2	0,1	0,1
ETİAL-171	0,5	9,00-10,00	0,1	0,40-0,60	0,30-0,45	0,1	0,1	0,15	0,05	0,05
ETİAL-175	0,6	9,00-10,50	2,50-3,50	0,3	0,70-1,20	0,5	0,3	0,15	0,1	0,05
ETİAL-177	0,2	6,60-7,40	0,02	0,03	0,30-0,45	0,04	0,02	0,08-0,14	0,05	0,05
ETİAL-178	0,4	5,00-5,50	2,80-3,20	0,10-0,20	0,15-0,25	0,5	0,3	0,15	0,1	0,05
ETİAL-180	1	9,00-11,50	0,70-2,50	0,5	0,3	2	0,5	0,2	0,1	0,2
ETİAL-195	0,6	17,00-19,00	0,80-1,50	0,2	0,80-1,30	0,2	0,80-1,30	0,1	0,1	0,05
ETİAL-220	0,3	0,35	4,00-5,00	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05
ETİAL-221	0,3	0,3	4,00-5,00	0,1	0,05	0,1	0,1	0,15-0,30	0,05	0,05
ETİAL-509	0,6	1	0,05	0,2-0,5	07.Eki	0,1	-	0,15	-	-

* <http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfaml1a.html>

Çizelge 1.9 Alaşımli külçelerin diğler standartlardaki karşılıkları*

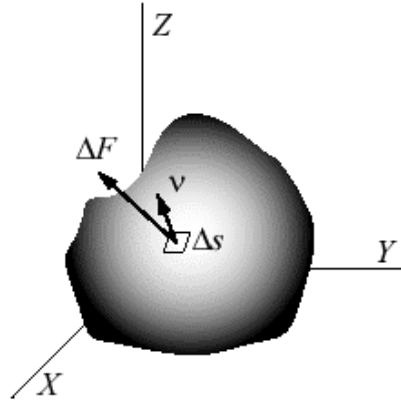
ETİ BANK	TSE	DIN (B.ALM.)	A.A (ABD)	N.F (FR.)	ALCAN	UNI (İT.)	B.S (İNG.)	CSA	A.S.T.M	ISO	GOST
ETİAL-110	Al-Si5Cu3	-	319	A-S5U3	117 (42220)	-	LM4	SC53	BC640	Al-Si5Cu3	Al6
ETİAL-120	Al-Si5	Al-Si5	B443	-	123	GD-ALSi5Fe	LM18	S5	S5A	Al-Si5	AK
ETİAL-140	Al-Si12	G-ALSi12	A413	A-Si13	160x	G-ALSi13	LM6	-	A13	Al-Si12	AK12
ETİAL-141	Al-Si12Fe	GD-ALSi12	413	A-S12	B160	A-S10G	LM20	S12P	S12C	-	Al2
ETİAL-145	-	-	A332	A-412UN	162	-	LM13	L2551	SN122A	-	Al3O
ETİAL-150	-	-	-	-	-	GDAISi12Cu2Fe	-	-	-	-	-
ETİAL-160	Al-Si8Cu3Fe	G-ALSi8Cu3	A380	A-S9U3A	C143	GAISi8CuFe	LM24	L2630	380	Al-Si8-Cu3Fe	-
ETİAL-171	Al-Si10Mg	G-ALSi10Mg	A360	AS9GU	B150	GAISi9MnMg	-	-	360	Al-Si10Mg	Al4
ETİAL-175	-	-	Fe332	-	B143	-	LM26	-	SC103A	-	-
ETİAL-177	-	-	A357	-	-	-	-	C135	-	-	-
ETİAL-178	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ETİAL-180	-	-	-	-	-	-	LM2	-	A03831	-	-
ETİAL-195	-	-	392.1	-	-	-	-	-	392	-	AKMN
ETİAL-220	G-ALCu4Si	G-ALCu4.5	-	-	225	GAICu4.5	L91	225	-	-	Al7
ETİAL-221	ALCu4Ti	G-ALCu4Ti	-	A-U50-T	226	G-AICU	LM11	226	-	Al-Cu4T50	-

* <http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfaml1a.html>

2. GERİLMELER

2.1 Gerilme

Gerilme kavramı katı maddelerin dayanıklılık ve kırılma dayanımlarını araştırma çalışmalarından ortaya çıkmıştır. Genel anlamda dış kuvvetler nedeniyle maddede meydana gelen iç kuvvetlerin yüzey üzerinde dağılımlarını ifade etmektedir.



Şekil 2.1 Global düzlemdeki gerilme*

Öncelikle dış yüklemelere bakacak olursak, T çeki yükü katı üzerindeki her bir birim yüzeye etki eden kuvvetin toplamına denk düşer. T, sabit bir vektördür, kendi doğrultusu boyunca ya da başka bir bölgeye hareket edemez.

Diğer bir deyişle T vektörü büyüklüğü ve uygulandığı yüzeyi olmadan tarif edilemez. Bu tanımdan hareketle T vektörünü, ΔF yük, ΔS ise uygulama alanı olursa,

$$T = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{ds} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlayabiliriz.

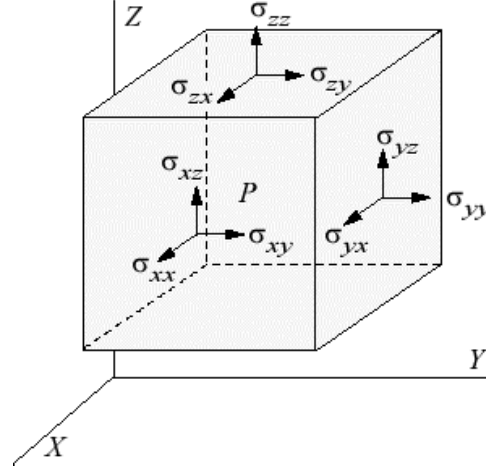
Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere, ΔS yüzeyine ΔF kuvveti etki etmekte ve sonuçta da yüzeye dik $\Delta F/\Delta S = T$ gerilme vektörü oluşmaktadır. Kısaca gerilme için birim yüzeye etki eden kuvvet de denilebilir.

Gerilme etki ettiği yüzeye göre iki grupta incelenebilir. Bunlar yüzeye dik olan normal gerilmeler, ve yüzeye paralel olan kayma gerilmeleridir. Maddenin normal gerilmelere olan tepkisi elastiklik modülü ile kayma gerilmelerine olan tepkisi ise kayma modülü tarafından

* http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/stress.cfm

belirlenir.

Bu iki gerilme türü arasındaki en önemli fark normal gerilmeler maddenin hacminde (hidrostatik basınç) değişiklik yapma eğiliminde iken kayma gerilmeleri hacim değişikliği yaratmaz, sadece deformasyon yönünde bir etkide bulunur.



Şekil 2.2 Gerilme durumları*

Yukarıdaki şekilde her hangi bir “p” noktasına ait gerilme durumu (stres statü), sonsuz küçük bir küpün yüzeyleri ifade edilmiştir. Bu “p” noktasında gerilme halinin belirlenebilmesi için üç vektörel büyüklüğe veya bu üç vektörel büyüklüğün teşkil edilebilmesi için dokuz skaler büyüklüğe ihtiyaç vardır. Dik kesitlerdeki normal gerilmeler doğrultularını gösteren tek indislerle gösterilir, σ_x , σ_y , σ_z gibi. Kayma gerilmeleri ise kesit içinde ve eksenler doğrultusunda iki bileşene ayrılır. Her bileşen iki indis ile gösterilir, σ_{xy} , σ_{zx} , σ_{yz} gibi.

Her yüzeyde 3 gerilme bileşeni olarak toplam 9 bileşen matris içinde şu şekilde gösterilir.

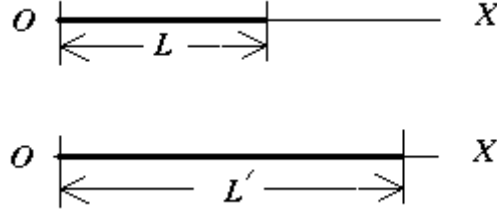
$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Bu ifade de ilk indis etki edilen yüzeyin normalini, ikinci indis ise yönünü göstermektedir. Burada diyagonal dış elemanlar kayma gerilmelerini ifade etmekte olup statik denge (static equilibrium) sebebiyle, gerilme tensörü simetrik olduğundan ; $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$, $\sigma_{zy} = \sigma_{yz}$,’ dır. Bu eşitlikler ile gerilme tensörü için gerekli olan dokuz skaler altıya iner.

*http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/stress.cfm

2.2 Gerinim

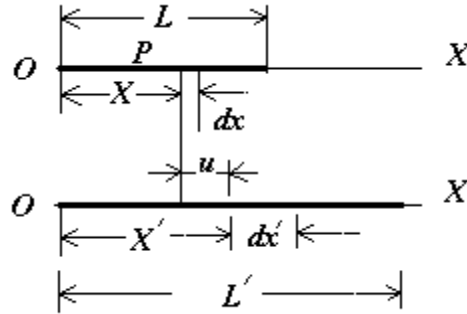
Malzeme üzerine uygulanan kuvvet ile oluşan şekil değişiminin bir ölçüsüdür. Tek eksende gerinim için ilk boyu “L” olan bir tel düşünelim. Tele boyu doğrultusunda bir kuvvet uyguladığımız zaman oluşan şekil değişimi neticesinde son boyumuz “L’” olsun. Bu durumda tel için gerinim değeri



Şekil 2.3 Uzama durumu

$$\varepsilon = \frac{L' - L}{L} \text{ olur.} \quad (2.3)$$

Kabaca açıklanan bu durum genelleştirilecek olursa, sonsuz küçük parça ve değişimi için formül şu şekilde düzenlenir.



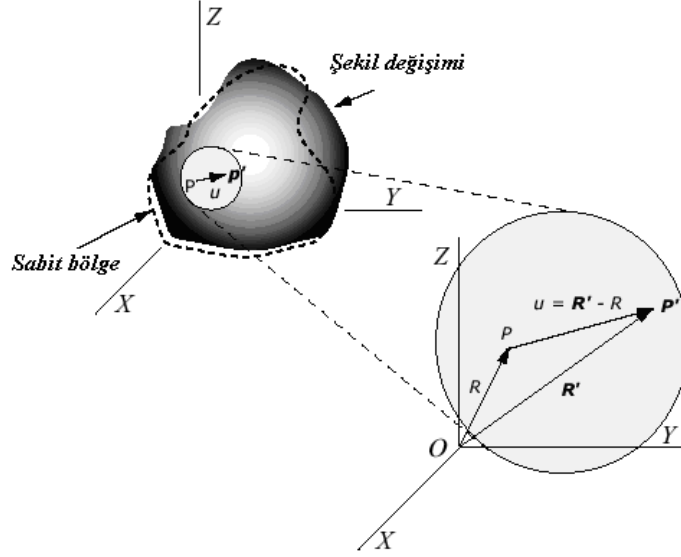
Şekil 2.4 sonsuz küçük uzama durumu

$$\varepsilon = \frac{dx' - dx}{dx} \text{ olur.} \quad (2.4)$$

$$\text{Burada } u = dx' - dx \text{ ise} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \text{ olur.} \quad (2.6)$$

Global düzlemde ise bu durum şu şekilde tanımlanır;



Şekil 2,5 Global düzlemdeki şekil değişimi*

P noktasının deformasyondan sonra P' noktasına geldiği varsayalım. Bu durumda sonsuz küçük yer değiştirme ilişkisi;

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.7)$$

olur. “u” yer değiştirme vektörü, “x” ise koordinatı verir. “i” ve “j” indisleri ile de 3 eksenle tanımlayacak olursak,

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \epsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \epsilon_{zy} \\ \epsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \epsilon_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} & \epsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \epsilon_{yx} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Burada u, v ve w yer değiştirmeler, x, y ve z ise eksenleri ifade etmektedir.

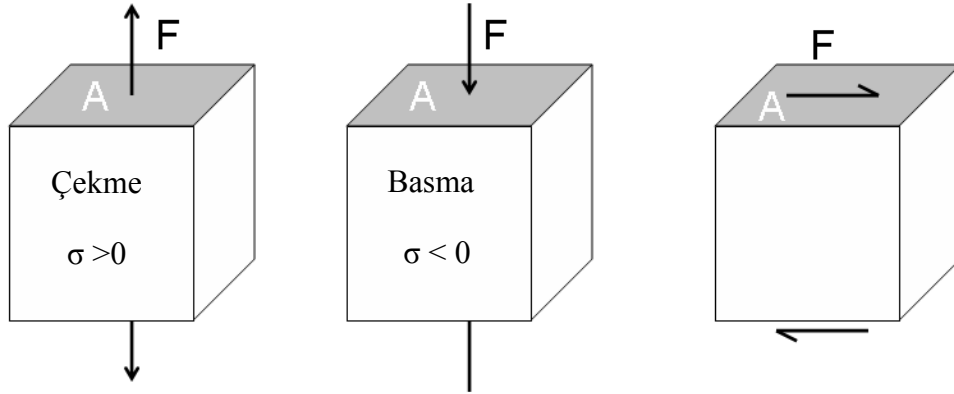
Üç boyutlu şekil değişimi ise;

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

*http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/strain.cfm

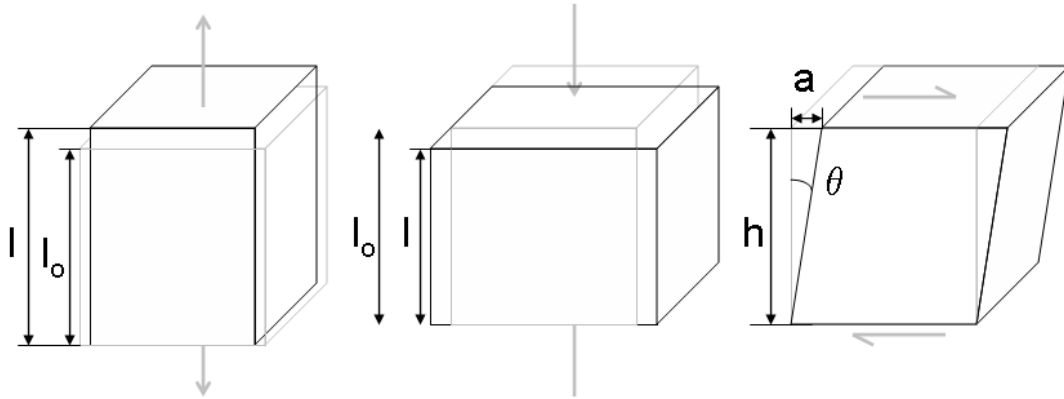
2.3 Tek Eksen Gerilme Ve Hook Yasası

Yukardaki gerilme tanımında “p” noktasından geçen tüm kuvvetler sadece tek bir eksen üzerinde toplansın. Bu sayede diğer eksenlerdeki gerilmeler ve gerinimler sıfır olacaktır.



Şekil 2.6 Tek eksende basma, çekme ve kayma gerilmeleri

$$\text{Normal gerilme } \sigma = \frac{F}{A}, \text{ kayma gerilmesi } \tau = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$



Şekil 2.7 Tek eksende basma, çekme ve kayma gerinimleri

$$\text{Normal şekil değiştirme } \varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \text{ açısız değişim } \gamma = \frac{a}{h} = \tan \theta \quad (2.11)$$

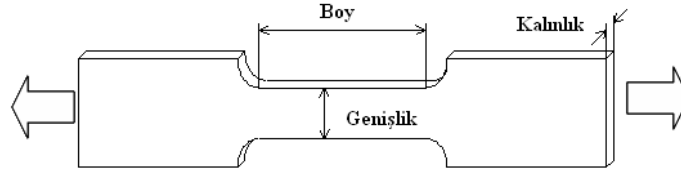
Tüm elastik ve plastik şekil değişimlerinde malzeme basma, çekme ya da kayma gibi üç temel şekil değişimlerinden birinin ya da bir kaçının etkisinde kalır. Herhangi bir şekil değiştirme işlemi uygulanan bir elemanda meydana gelen birim şekil değiştirme, bu elemanın şekil değiştirme işleminden önceki ve sonraki boyutlarına bağlı olarak tarif edilir.

Hook yasası malzemedeki bu şekil değişimi ile uygulanan kuvveti elastik sınırlar içerisinde şu şekilde tanımlamıştır,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.12)$$

burada “E” young modülü olarak bilinen ve malzemenin karakteristik özelliğini temsil eden bir değerdir.

Kuvvet ve şekil değişimi arasındaki bağıntının incelenmesi bakımından uygulanan en basit deney çekme deneyidir. İleriki bölümde detaylıca anlatılacak olan bu deney standart deney numunemizi eksenî doğrultusunda bir kuvvet ile kopana kadar çekilmesi ile gerçekleştirilir. Elde edilen uzama miktarı ve kuvvet ile malzeme parametrelerine ulaşılır.



Şekil 2.8 Çekme deneyi numunesi

Deney çubuğunun (şekil 3,1) çekme kuvvetine dik doğrultudaki kesit yüzeyi başlangıçta A_0 , deney sırasında F kuvvetinin uygulandığı anda ise A ile gösterilecek olursa nominal (mühendislik) gerilmesi

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad (2.13)$$

gerçek gerilme ise

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.14)$$

olarak tanımlanır.

Başlangıç ölçü boyu l_0 , deneyin herhangi bir anında uygulanan F yükünün etkisi ile l değerini alır ise, çekme doğrultusundaki birim şekil değişimi(birim uzama)

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.15)$$

dır. Birim şekil değiştirme, yukardaki ifadeden de görülebileceği gibi, l_0 başlangıç ölçü boyuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Deney sırasında ise ölçü boyu sürekli olarak değişmektedir. Örneğin ölçü boyu çekme deneyinin herhangi bir anında l iken, Δl gibi sonsuz

küçük bir uzama sonunda birim şekil değiştirmedeki artış dI/I olacaktır. Bu bakımdan, I_0 başlangıç ölçü boyu I değerini alıncaya kadar meydana gelen toplam gerçek şekil değiştirme

$$\varepsilon = \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \ln \frac{I}{I_0} \quad (2.16)$$

dır. ε , logaritmik veya tabii şekil değiştirme olarak anılır ve $I > I_0$ olduğu için pozitiftir.

Yukardaki denklemden

$$\frac{I}{I_0} = 1 + \varepsilon \quad (2.17)$$

yazılarak integralin içine taşınırsa

$$\varepsilon_g = \ln (1 + \varepsilon) \quad (2.18)$$

bulunur.

Plastik şekil değişimi esnasında parçanın hacmi değişmeyeceği için hacim sabitliği ilkesine göre

$$A_0 I_0 = A I \quad (2.19)$$

$$A = A_0 \frac{I_0}{I} \quad (2.20)$$

Bu ifade de gerilme eşitliğinde yerine yazılırsa

$$\sigma_g = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{I_0}{I} \quad (2.21)$$

$$\sigma_g = \sigma_0 (1 + \varepsilon) \quad (2.22)$$

elde edilir. ε_e ufak değerleri için ε ye eşit alınabilir. Fakat değer büyüdükçe aradaki fark da artar.

Elastik bölge için tanımlanan bu formüller plastik bölge söz konusu olduğunda geçerliliğini yitirir. Hareketin ikinci yarısını oluşturan plastik akma bir takım formüllerle modelize edilir.

$$\sigma = H \cdot \varepsilon^n \quad (2.23)$$

Buradaki “H” ve “n” değerleri deneysel gerçek sonuçlar kullanılarak çıkartılmıştır. İleride deneyin sonuçları irdelenirken bu sabitlerin nasıl çıkartıldığı detaylıca anlatılacaktır.

Lineer elastik malzemeler için küçük gerilmelerde yanal şekil değiştirme ε_y ve ε_z aksenal şekil değişimi (ε_x) ile orantılıdır ve orantı katsayısına da “ ν ” poisson oranı denir.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} = -\frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xx}} \quad (2.24)$$

Çeşitli varsayımlar ve kabullerle kayma gerilimi ile elastisite modülü ve poisson oranı arasındaki ilişki izotropik malzeme için ise ,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.25)$$

olarak tanımlanır.

Yukardaki iki eşitlik ve tanımlanan elastik bölge için gerilme gerinim formülünün superpoze edilmesi ile temel Hook yasası en genel halde,

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{2G} - \frac{\nu}{E} J_1 \delta_{ij} \quad (2.26)$$

olur. Burada ε_{ij} gerinim tensörü, σ_{ij} gerilme tensörü, ν poisson oranı, G kayma modülü, E elastiklik oranı, J_1 σ' nın 1 invaryantidir ($\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$). δ_{ij} (kronackel delta) birim tensörü dür.

Bu formülden hareketle izotropik bir malzemede tek eksenli gerilme hali için gerime tensöründe $\sigma_{22} = \sigma_{33} = \tau_{12} = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$ olacağından,

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Ayrıca bu gerilme ve kayma değerleri yukarıdaki genelleştirilmiş Hook kanununda yerine yazılırsa gerinim değeri de,

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

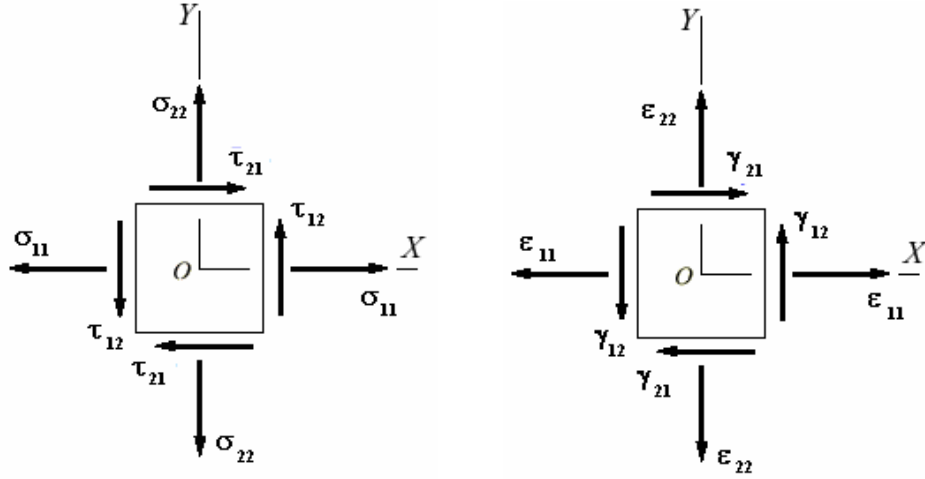
olur. Burada

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{2G} - \frac{\nu}{E} \sigma_{11} \quad \text{ve} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{ise} \quad \varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\frac{\nu}{E} \cdot \sigma_{11} \quad (2.30)$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{21} = \gamma_{13} = \gamma_{31} = \gamma_{23} = \gamma_{32} = 0 \text{ olur.} \quad (2.31)$$

2.4 İki Eksenli Gerilme



Şekil 2.9 İki boyutlu gerilme ve gerinim düzlemleri

İki eksenli gerilmelerde ise sadece 3. eksene ait ifadeler sıfırdır.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & 0 \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Aynı şekilde genelleştirilmiş Hook yasasına göre gerinim değeri,

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \gamma_{12} & 0 \\ \gamma_{21} & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{\sigma_{11}}{2G} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad \text{ve} \quad \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{2G} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{ise} \\ \varepsilon_{11} &= \frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{\nu}{E}\sigma_{22}, \quad \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E} - \frac{\nu}{E}\sigma_{11} \\ \varepsilon_{33} &= -\frac{\nu(\sigma_{11} - \sigma_{22})}{E} \\ \gamma_{12} &= \frac{\tau_{12}}{2G}, \quad \gamma_{21} = -\frac{\tau_{21}}{2G} \\ \gamma_{13} &= \gamma_{31} = \gamma_{23} = \gamma_{32} = 0\end{aligned}\tag{2.34}$$

2.5 İzotropik ve Anizotropik Lineer Elastisite

2.5.1 İzotropik Lineer Elastisite

Hook kanununu hatırlayacak olursak gerilme değeri, gerinim ile malzeme karakteristiğini temsil eden bir sabitin çarpımı sonucu elde edilir demiştik. Buradaki malzeme sabitinin tensörel ifadesi notasyonel olarak dört indisli 6x6'lık 36 bileşenli bir matristir. Bu noktada belirtmek isterim ki izotropik malzemelerde her noktada aynı karakterislik özellik sergilenir. Yani malzeme özellikleri hareket/kuvvet yönünden bağımsızdır. Dolayısıyla malzemeyi yönden bağımsız olarak tanımlayabiliriz. Fakat anizotropi ve çeşitlerinde malzeme davranışı kuvvetin uygulandığı yöne göre değişir ve daha fazla malzeme sabiti ile temsil edilme zarurietiyi vardır. Tezimizin konusu itibarıyla anizotropik malzemelerdeki bu yöne bağlılık, ilerleyen bölümlerde deneylerle ifade edilmeye çalışılacaktır.

Şimdi izotropik lineer izotropiyi ardından da anizotropik lineer elastisiteyi temel hatlarıyla hatırlayalım.

Notasyonel olarak ,

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{dersek}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1112} & C_{1113} & C_{1123} \\ & C_{2222} & C_{2233} & C_{2212} & C_{2213} & C_{2223} \\ & & C_{3333} & C_{3312} & C_{3313} & C_{3323} \\ & & & C_{1212} & C_{1213} & C_{1223} \\ & & & & C_{1313} & C_{1323} \\ & & & & & C_{2323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix}\tag{2.35}$$

buradaki 36 bileşenli “C” matrisi katılık (stiffness) matrisidir. İfade ters çevrilirse,

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.36)$$

S ise uygunluk matrisi olur. (compliance).

Genel olarak isotropik lineer elastisite matrisi 3 eksenli gerilme için şu şekildedir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Stiffness formu ise,

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Tek eksenli lineer elastik yapı için

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Düzlemsel gerinim durumu,

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 0 \\ \gamma_{12} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Düzlemsel gerilme durumu,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ 0 \\ \tau_{12} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

2.5.2 Anizotropik Lineer Elastisite

Yukarıda görüldüğü üzere malzemeler en temel anlamda 36 malzeme sabiti ile tanımlanır. Fakat asal eksene göre simetri sebebiyle 21 malzeme sabiti yeterlidir. Teorik olarak tanımlanan bu sabitler ile aslında hiçbir malzeme yoktur. Ortotropiy anizotropinin en genel halidir. Bazı piezoelektrik malzemeler için E_{11} , E_{22} , E_{33} olmak üzere 3 adet Young modülü, ν_{12} , ν_{23} , ν_{13} ve G_{12} , G_{23} , G_{13} gibi 3'er adet de poisson's oranı ve kayma modülü olmak üzere toplam 9 tane malzeme sabiti vardır. Bu bağlamda ortotropik malzeme için uygunluk matrisi, (compliance matrix)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\frac{\nu_{23}}{E_{22}} = \frac{\nu_{32}}{E_{33}}, \frac{\nu_{31}}{E_{33}} = \frac{\nu_{13}}{E_{11}}, \frac{\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{\nu_{21}}{E_{22}} \text{ dir.} \quad (2.43)$$

Ortotropinin özel bir hali olan transversly isotropy de ise malzeme iki ekseninde birbirine benzer özellikler sergilerken diğer ekseninde farklı özellikler gösterir. Ortotropideki 9 malzeme sabitinin yerine 5 adet birbirinden bağımsız malzeme sabiti ile tanımlanır. Bu tür malzemelere örnek olarak fiber katkılı kompozit malzemeleri verebiliriz. Düşünün ki matris içine “x” yönünde dizilmiş dolgu malzemesi, (fiber doku) malzemenin “x” yönündeki davranışını farklı kılarken “y” ve “z” yönlerinde farklı kılmaktadır. Soğuk haddelenmiş levhalar için de benzer düşünceden hareketle bir takım çıkarımlarda bulunabiliriz. Tek yöne haddelenmiş levhalarda malzeme mikroyapısında yönelimler olacaktır. Bu yönelim söz konusu levhayı o doğrultuda daha mukavim yaparken dikine doğrultuda daha zayıf kılmaktadır. Konu yapılan deneylerle ileriki bölümlerde açıklanmaya çalışılacaktır.

Transversly isotropy için katılık ve uygunluk matrisleri şu şekilde yazılır. Tanım gereği “x” ve “y” yönündeki malzeme karakterleri eş olduğu için bu yönlerdeki malzeme sabitleri yani Young modülüne E_p , poisson oranı da ν_p olsun. Z yönündeki malzeme sabitleri de E_{p3} ve ν_{p3} , z yönündeki kayma modülü de G_{p3} olsun. Bu suretle uygunluk matrisi,(compliance matrix);

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_p} & -\frac{\nu_p}{E_p} & -\frac{\nu_{p3}}{E_{p3}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_p}{E_p} & \frac{1}{E_p} & -\frac{\nu_{p3}}{E_{p3}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{p3}}{E_p} & -\frac{\nu_{3p}}{E_p} & \frac{1}{E_{p3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{p3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{p3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_p}{E_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\frac{\nu_{3p}}{E_p} = \frac{\nu_{p3}}{E_z} \text{ olduğu unutulmamalıdır.} \quad (2.45)$$

3. HADDELEME PROSESİNDE MALZEME KARAKTERİSTİĞİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ

Endüstriyel uygulamalarda saç şekillendirme oldukça geniş yer tutan bir konudur. Prosesin yaygınlığı incelenmesi gereken pek çok konuyu da beraberinde getirir. Bunlardan en önemlisi malzeme dayanımını ve şekillendirilebilme karakterisliğidir. Bu iki kavram malzeme iç yapısı ile ilişkilendirilebilir. Kalıcı deformasyon, iş parçasına akma dayanımından daha yüksek bir gerilme uygulanması ile oluşturulabilir. Plastik şekillendirme işlemlerinde en önemli problem malzemenin plastik şekillendirmeye karşı gösterdiği direnç olup haddeleme gibi şekillendirme yöntemlerinde bu direncin üzerinde bir direnç uygulanması gerekir. İşlem esnasında uygulanan kuvvet malzemenin deformasyon ile yeni şeklini almasını sağlarken çatlamalara veya kırılmalara yol açmamalıdır.

Mekanik işlem esnasında malzemenin mukavemetini etkileyen, metalurjik yapısı, deformasyon sıcaklığı, deformasyon hızı gibi faktörler, aynı zamanda mekanik işlem sonucunda elde edilen malzemelerin mukavemetini de etkiler.

Malzeme ile takım arasındaki sürtünme durumu, yani sürtünme katsayısı (μ), özellikle soğuk işlemlerde malzemenin yüzey kalitesini etkiler. Geometrik faktör ise malzemenin deformasyon sırasında hataların meydana gelmesine sebep olan en büyük faktördür.

Metalik malzemelerin elastik veya plastik deformasyona karşı direnci, atomlar arasındaki bağ kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır.

Plastik deformasyonu gerçekleştiren işlemler, metalik malzemelerin yapısındaki nokta, çizgi ve yüzey hataları gibi yapı hataları ile de ilgilidir.

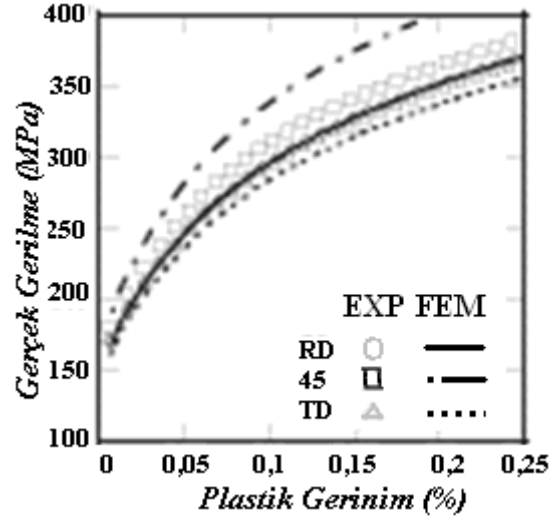
Kristal yapılu malzemelerde en önemli deformasyon mekanizması olan kayma, atom düzlemlerinden birinin komşu atom düzlemleri üzerinde kayması ile gerçekleşir. Kayma, belirli kristal düzlemleri ve doğrultularında dislokasyonların hareketi ile olur.

Bir atom düzleminin bitişik bir atom düzlemi üzerinde kayması sonucu, kristalin bir kısmı, bitişik kısma göre, bu iki kısmı ayıran kayma düzlemi içindeki bir kayma doğrultusu boyunca ötelenmektedir. Ötelenme miktarı, yani atomların yer değiştirmeleri, atomlar arası mesafenin tam katıdır. Malzemenin kristal yapısındaki kayma düzlemleri ile, kayma doğrultularının oluşturduğu kayma sistemi sayısı ne kadar fazla ise, malzemenin kaymaya eğilimi de o kadar fazladır.

Malzemelerin şekil alabilirliği, kafes sistemindeki kayma düzlemlerine bağlı olmakla beraber tane dizilimleri ile de alakalıdır. Anizotropik yapının plastik şekillendirmeye olan etkisi küçümsenemeyecek düzeydedir. Kristalografik yapı her durumda anizotropiyi açıklamak için yeterli değildir. Bu tezin de konusu olan tek yönlü ve çift yönlü haddelenmiş alüminyumlarda akma gerilmeleri ölçülmüştür. Akma gerilmelerinin anizotropisi üzerinde yapılan çalışmalar göstermiştir ki deformasyon mikroyapısının yani yönelimlerin yapı anizotropisi üzerinde önemli ölçüde etkisi vardır. Tek yöne haddelenmiş malzemelerde düzlemsel dislokasyon sınırları bir ya da iki makroskobik düzlemde yer almaktadır. Fakat bu tür malzemeler beklenenden çok daha fazla anizotropik özelliğe sahiptir. Dolayısıyla anizotropiyi yalnızca doku ile ilişkilendirmek yanlış olmaktadır. Ancak dislokasyon sınırlarının gelişi güzel sıralandığı çapraz haddelenmede anizotropiyi sadece doku ile ilişkilendirmek çok da yanlış olmayacaktır.

Anizotropinin malzeme üzerindeki etkisi ve kaynağı konusunda değişik araştırmalar da yapılmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi de *Yangwook Choi, Mark E. Walter, June K. Lee ve Chung-souk Han (February 2006 VI, No2)* grubu tarafından yapılmıştır. Bilindiği gibi anizotropy farklı yönlerde farklı akış gerilmeleri oluşmasına sebep olmaktadır. Şekillendirme proseslerinde farklı akış gerilmelerinin önemli etkileri vardır. Malzeme anizotropisini tanımlamak için farklı akma fonksiyonları geliştirilmiştir. Bunlardan biri *Hill 1948*, diğeri ise *Barlat et al. 1991, 1997, 2003* dür. Bu akma fonksiyonlarından *Hill* yumuşak çelik gibi FCC tip kristal yapıya sahip malzemeler için, *Barlat* tarafından öngörülen akma fonksiyonlarının ise alüminyum alaşımları gibi FCC tipi malzemeler için uygun olduğu bilinmektedir. Fakat söz konusu akma fonksiyonları malzemenin plastik deformasyonunu tanımlamakta yetersiz kalmaktadır.

Saç metaller için anizotropi durumlarının belirlenmesinde kullanılan “R” değeri genişlik geriniminin kalınlık gerinimine olan oranı ile bulunur. Bu değer belirli bir yön ve haddelenme yönü arasında pekleşme eğrisinin anizotropik ilişkisini tanımlamakta kullanılıyor olmasına rağmen, geleneksel pekleşme modelleri (hardening) kullanıldığında, hesaplanan pekleşme eğrisi haddelenme yönü (RD) ve bu yöne dik doğrultudaki (TD) yönlerdeki deneysel sonuçlarla uyumsuz. Şekil 3.1’ de hesaplanmış eğriler *Hill*’in ikinci dereceden akma fonksiyonu ve izotropik pekleşme modeli kullanılarak *ABAQUS* ile elde edilmiştir. Bu değerler ile deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.1 Üç yöndeki akma gerilmeleri, Numisheet 2002 den alınan hesaplanmış datalarla karşılaştırılması*

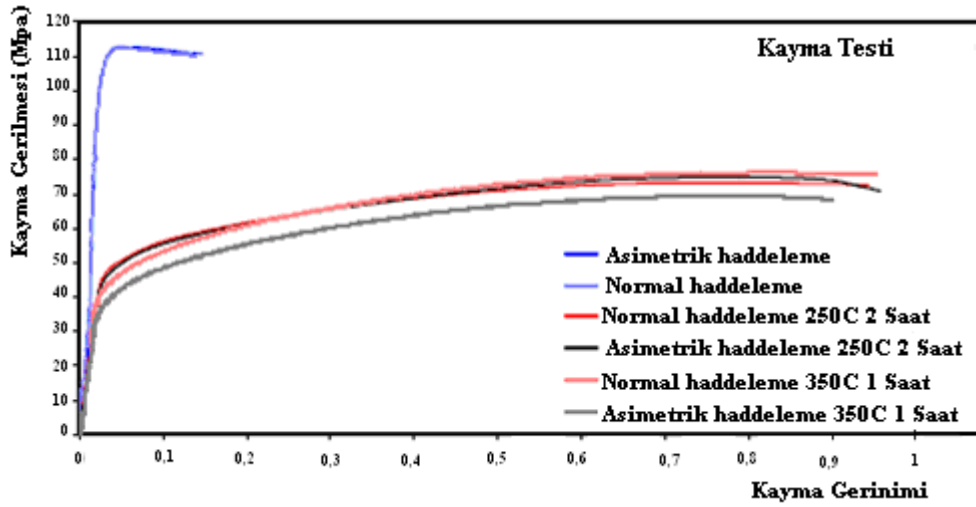
RD ve TD yönündeki akma gerilmelerinin tanımlanmasında sabit R-değerlerinin kullanılması etkili bir yöntemdir. Ancak 45^0 akış gerilmesini modellemede bu varsayım yetersiz kalmaktadır. 45^0 'deki bu durumun anizotropi oluşumu ve buna bağlı olarak yöne göre R-değerinin değişimi ile açıklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca *Hill*'in ikinci dereceden akma kriterlerinin, yükleme yönüne bağlı akma eğrilerini tahmin etmede zayıf kaldığı noktalar vardır. Başka bir deyişle; akma gerilmesinin yöne bağlılığı, geleneksel yöntemlerle tam olarak tahmin edilememektedir. Bu durumun, plastik deformasyon neticesinde ortaya çıkan anizotropinin göz önüne alınmaması ile açıklanabileceği düşünülmektedir.

Malzemenin yüksek gerinimlerdeki deformasyonunu tahmin edebilmek için malzeme anizotropisinin anlaşılması çok önemlidir. Ayrıca çok eksenli (multiaxial) ve çok yollu (multipath) yüklemelerde anizotropinin tanımlanması da gereklidir. Düzlemsel anizotropik malzemelerin çok eksenli ve çok yollu elastoplastik deformasyonunu modelleyebilmek için, Rotasyonel-İzotropik-Kinematik (RIK) pekleşme modeli önerilmiştir. (Choi 2006).

Anisotropik yapılanmaya dair bir diğer çalışma ise *Fabio J.P.Simões, Ricardo J.Alves de Sousa, Jose J. A. Gracio, Frederic Barlat, Jeong-Whan Yoon* (Department of Mechanical Technology and Automation, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal) gurubu tarafından yapılmıştır. Düşünülen teoriye göre, asimetrik haddeleme sac kalınlığı boyunca kayma deformasyonlarının oluşumuna ve buna bağlı olarak kayma dokusunun oluşumuna

*Yangwook Choi, Mark E. Walter, June K. Lee ve Chung-souk Han February 2006 V1,No2

sebeptir. Bu çalışmada 1050-0 sacı asimetrik olarak haddelenmiş ve tavlanmıştır. Asimetrik haddelenen örneğin mekanik davranışını değerlendirmek için kayma testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki esas amaç alüminyum levhada şekil alabilirliği geliştirmek için tüm sac boyunca yoğun bir kayma deformasyonu oluşturabilmektir. İşlemin temel prensibi bilgisayarla hızlarını kontrol edebildiğimiz ve farklı hızlarda dönen özdeş merdanelerle haddelenme işlemi yapmaktır. Hızların oranı 1/3 olarak alınmıştır. Her bir geçişte malzeme 90° döndürülmüştür. Öte yandan normal haddelenen malzemelerde malzemenin pozisyonu değiştirilmemiştir.



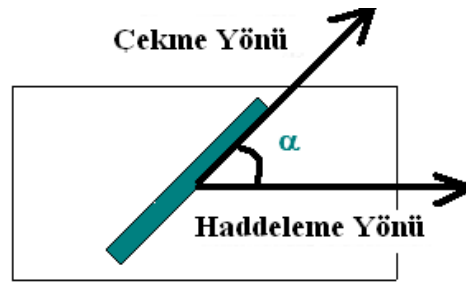
Şekil 3.2 Oda sıcaklığında ve farklı sıcaklıklarda asimetrik ve geleneksel haddelenmiş numunelere yapılan kayma testi sonuçları*

Yukardaki (Şekil 3.2) grafikten de görüldüğü üzere yapılan çalışma sonuçları birbirlerine çok yakındır. Fakat *Kim and Lee (2001)* çalışmalarında inceltme oranı buradaki gibi %20 ile %40'larda değil de %50 lerde olduğu zaman ve merdaneler arası hız farkının da 1/5 olduğu durumlarda kayma dokusunun oluşumu etkilendiğini rapor etmiştir. Bu durum söz konusu iki parametrenin belirli bir değerden sonra kayma düzlemi oluşumunda faktör olduğunu göstermektedir. Plastik anizotropinin malzeme davranışına olan etkisi büyük ölçüde yönelim ile açıklanabilmektedir. Tüm bunların yanında plastik anizotropiyi kontrol eden faktörlerde halen belirsizlikler vardır. Gerilme yolunun oluşmasından sonra ön şekillendirmenin ardından ne boyda ve ne miktarda düzensiz yapının oluştuğu halen tam olarak belirlenmemektedir. *G.Winter ve N. Hanser* in 2004 yılında yapmış olduğu bir çalışma ile malzeme üzerindeki bu

*J.Fabio P.Simões, J Ricardo.Alves de Sousa, Jose J. A. Gracio, Frederic Barlat, Jeong-Whan Yoon (Department of Mechanical Technology and Automation, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal)

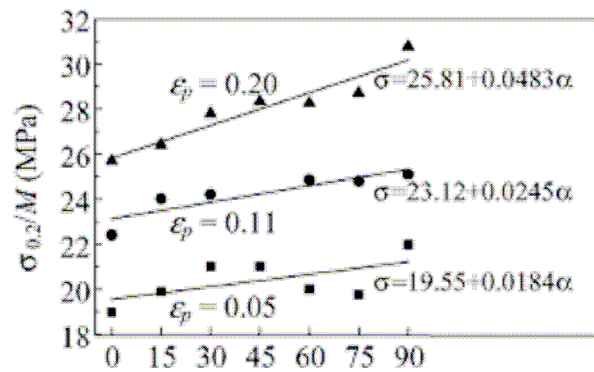
ön deformasyonun plastik anizotropiye etkisinin olduğu ortaya koymuştur.

Yeniden kristalleşmiş AA105 alüminyum saclar, üç farklı öngerilme (ϵ_p : 0.05, 0.11, 0.2) soğuk haddeleme işlemine tabi tutulmuş ve ön deformasyon geriniminin etkisi araştırılmıştır. Diğer bir deney de ise sabit ön gerinimli bir levhadan farklı açılarda ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90°) deney numuneleri alınmıştır. İlk deney $5 \cdot 10^{-4}$ 1/S gerinim hızında yapılmıştır. İkinci deneyde ise 0,17 lik bir şekil değişiminde, ortalama tane büyüklüğü $100\mu\text{m}$ olan ve soğuk haddeleme oranı %18 levha $2,2 \cdot 10^{-3}$ hızında yapılmıştır. Deney numunelerinin boyutları ise $120\text{mm} \cdot 5\text{mm} \cdot 5\text{mm}$ dir. Deneyler her bir parçada boyun verme gözlenene kadar yapılmıştır. Çekme testi şekil 3.3 de gösterildiği gibi farklı yönlerde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3 Çekme testi numunesi

İlk deneyden edinilen sonuçlar % 0,2 lik şekil değişim oranına denk gelen akma değerleri okunularak bir kıyaslama yapılacaktır. Fakat akma değerlerine kristalografik yapının da etkisini katabilmek için bu değerler “Taylor full-constraint” modeli ile hesaplanan Taylor sabitine bölünür (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Farklı başlangıç gerinim değerlerine ait numunelerin çekme deney sonuçlarının tabloya işlenmesi*

*G. Winther, N. Hansen Z.J. Li (Corresponding author. Tel.: +45-46775813; fax: +45-6775758. E-mail address: zhengjie.li@risoe.dk.), (2004) Anisotropy of plastic deformation in rolled aluminum.

Her bir açı değerine karşılık gelen gerilme değeri tabloya işlenir. Bu noktalara ait çizilen ortalama doğrunun denklemi çıkartılır. Bu denklemde 0° açığa denk gelen gerilme değerinin Taylor sabitlerine bölünmesi ile bir değer bulunur. Bu değer kristalografik yapının anizotropiye katkısı olarak düşünülebilir.

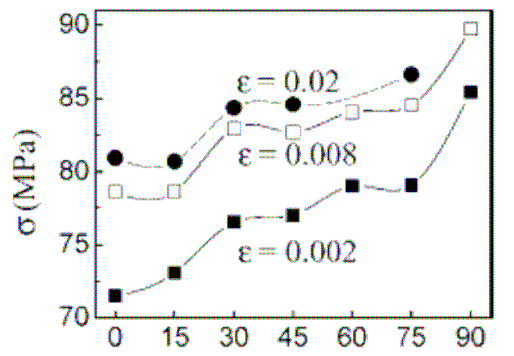
$$\varepsilon_p = 0,05 \text{ için } k/\sigma (0^\circ \text{ de}) = 0,9407 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_p = 0,11 \text{ için } k/\sigma (0^\circ \text{ de}) = 1,0620 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_p = 0,20 \text{ için } k/\sigma (0^\circ \text{ de}) = 1,8720 \cdot 10^{-3}$$

görülyor ki $\varepsilon_p = 0,2'$ ye kadar doku oluşumu oldukça az ki bu değere kadar çıkan Taylor sabitleri birbirine yakın çıkmıştır (Şekil 3.4). Dolayısıyla haddeleme öngerilmenin etkisini doku değişimi ile ilişkilendirmekten ziyade deformasyon sonucu oluşan dislokasyon yapılarla ilişkilendirmek daha doğru olacaktır.

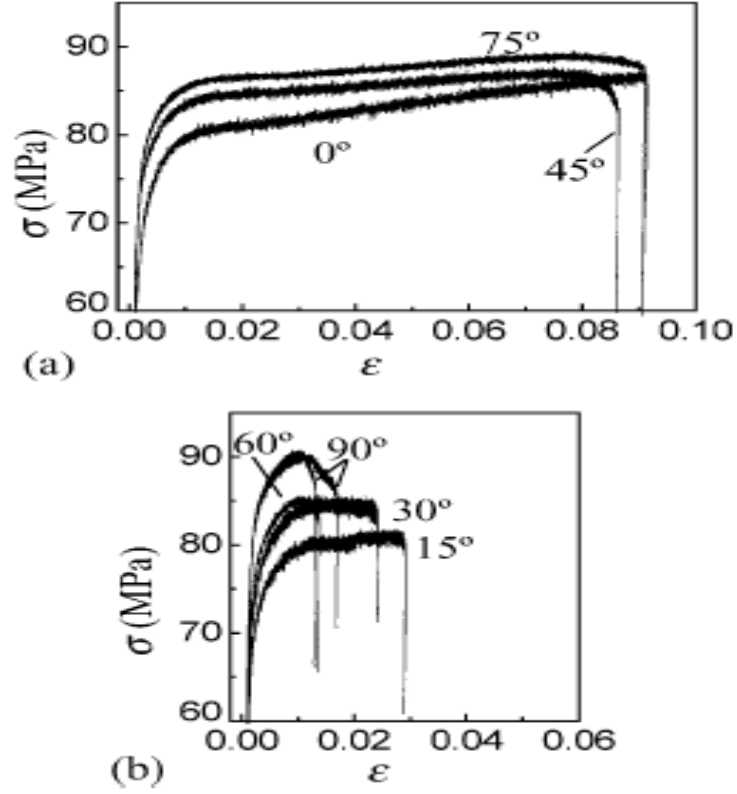
Anistropinin değişimini incelemek için farklı açılarda yapılan testte 0.02, 0.008, 0.002 gerinim değerlerine karşılık gelen " σ_{ak} " gerilme değerleri tabloya işlenmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Farklı gerinim değerlerine ait numunelerin çekme deney sonuçları*

Çalışmanın ikinci bölümünde tek bir levhadan farklı açılarda numuneler alınarak deney yapılmıştır. Erken boyun vermeden dolayı sadece 0, 45 ve 75 derecelik numunelerde uzun süreli bir sonuç elde edilebilmiştir. Fakat $\varepsilon = 0,07$ değerinden sonraki bölümlerde bile gözle görülür bir fark ortaya çıkmıştır (Şekil 3.6-a).

*G. Winther, N. Hansen Z.J. Li (Corresponding author. Tel.: +45-46775813; fax: +45-6775758. E-mail address: zhengjie.li@risoe.dk.), (2004) Anisotropy of plastic deformation in rolled aluminum.



Şekil 3.6 $\epsilon_p = 0,17$ olan AA1050 Al levhasından farklı açılarda numunelerin deney sonuçları*

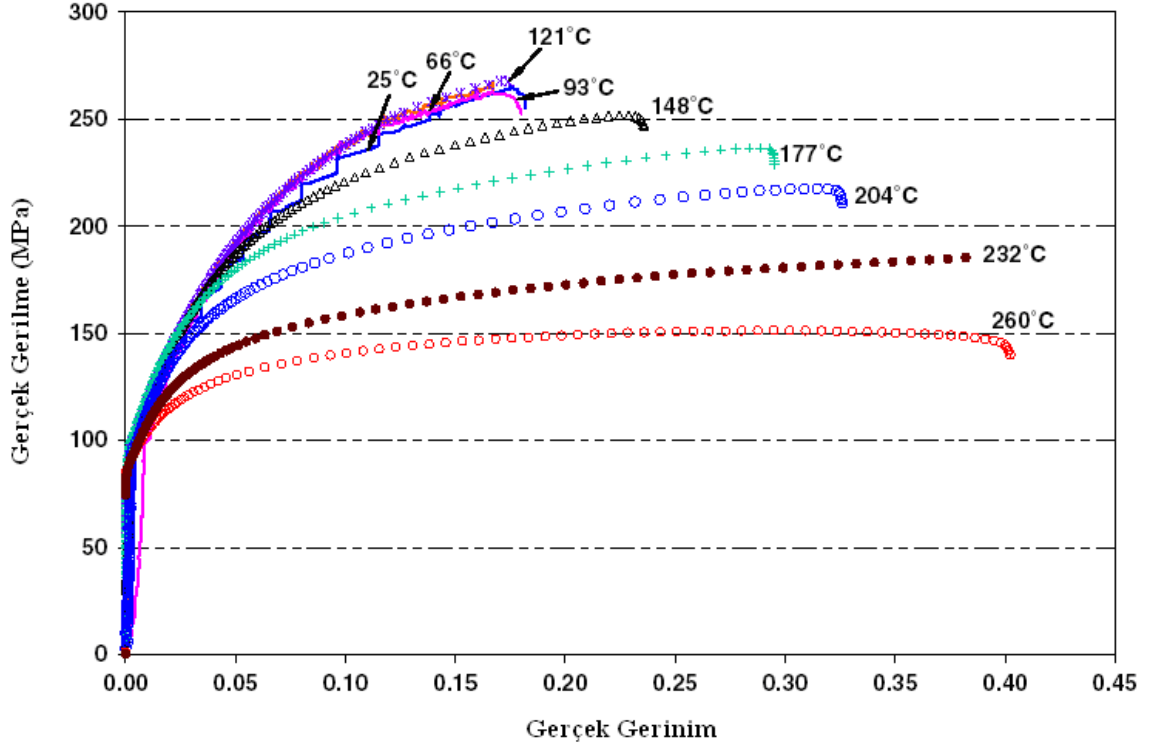
Şekil 3,6-a' da görüldüğü üzere $\sigma_{75} > \sigma_{45} > \sigma_0$ sıralaması yapılabilir. Ancak dikkate değer nokta şu ki haddelme yönünde alınan numune için ($\alpha=0$) sertleşenin diğer iki ($\alpha=45$ ve 75) yönden daha fazla olduğudur. Ve dahası bu üç eğri maksimum gerinimde birleşme eğilimindedir. En büyük farkın da $\alpha=0$ da ve $\alpha=90$ ' de olduğu görülmektedir (Şekil 3.6). Akma gerilmesi 90° 'nin aksine 0° 'de en düşük ve neredeyse $\epsilon=0,09$ değerine kadar düzgün bir eğri çizmektedir. 90° lik numune için maksimize olan akma değerinden sonra kısa süreli bir yükseliş ve hemen ardından oluşan boyun vermeden dolayı keskin bir düşüş olmuştur. (Şekil 3.8-b). 0° 'de deforme edilen numune $\epsilon = 0,09$ ' a kadar görünür bir boğum oluşturmuyor. 90° ' de ise $\epsilon = 0,008$ ' de çok erken boğum veriyor. Bu sonuç gösteriyor ki, gerinim yörüngesinin (strain path) değişiminden en az 0° en çok da 90° etkilenmektedir. Bu durum ön deformasyon sırasında oluşan dislokasyon yapıların yeni deformasyon moduna adapte edilmesinde güçlükler çıkartıyor. Diğer açılardaki eğilim açık değil fakat 0° , 45° ve 75° ' de (en yüksek yumuşaklık gösteren açılar), çekme gerilmenin lokal olarak minimum seviyede olduğu söylenebilir. 0° , 45° ve 75° ' de yaklaşık olarak $\epsilon=0,07$ noktasında gerilmeler

*G. Winther, N. Hansen Z.J. Li(Corresponding author. Tel.: +45-46775813; fax: +45-6775758.E-mail address: zhengjie.li@risoe.dk),(2004) Anisotropy of plastic deformation in rolled aluminum.

arasındaki farklılık ayırt edilebilir seviyede olsa da değerlerin birbirlerine yaklaştığı gözlemlenmektedir. Bu da ön deformasyon sırasında oluşan dislokasyon yapılarının kırıldığı ve çekmeden kaynaklanan yeni dislokasyon yapılarının ortaya çıkması şeklinde yorumlanabilir.

Yukardaki deneyler göstermiştir ki doku ve (texture) öngerinim ile oluşan dislokasyon yapılar anizotropi için etkili birer faktördür. $\epsilon_p = 0,2$ ye kadar olanki ön gerinim değerlerinde dislokasyon yapı esas faktördür. Öngerinim arttıkça dislokasyon sınırlarının yanlış dizilimine ve mesafenin değişmesine bağlı olarak anizotropi de artmaktadır.

Malzeme içerisindeki anizotropiyi etkileyen parametrlerden biri de sıcaklıktır. *Nader Abedrabbo, Farhang Pourboghrat, John Carsley (Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Ont, Canada, Michigan State University, US, GM Research and Development Center, US 30 September 2006)* tarafından yapılan çalışmalarda artan sıcaklık değerlerinde sünekliğin de artmakta olduğu görülmektedir. Şekil 3.7'de görülen düşük sıcaklıkta dalgalı yapının sebebi şekillendirme işlemi bittikten sonra yapı içinde kalan dinamik şekil değişiminin tekrar gelişmesinden kaynaklanır. Dinamik şekil değişimlerinin gelişmesi ise deformasyon sonucu hareketlenen dislokasyon düzlemlerinin ve katı atomların birbirleriyle teması ile olur. Dislokasyon hareketi katı magnezyum atomları tarafından engellenir. Bu sayede daha fazla iç akma gerilmesi oluşur. Eğer dislokasyonlar yavaş hareket ederse, bazı atomlar dislokasyonları harekete geçirmeye çalışırken bazıları da daha fazla engel olmaya çalışacaktır. Bu dislokasyon hareketini daha da zorlaştırır. Sıcaklığın artması ile akma gerilmesi düşecek ve hata boyu düzensizlik artacaktır.

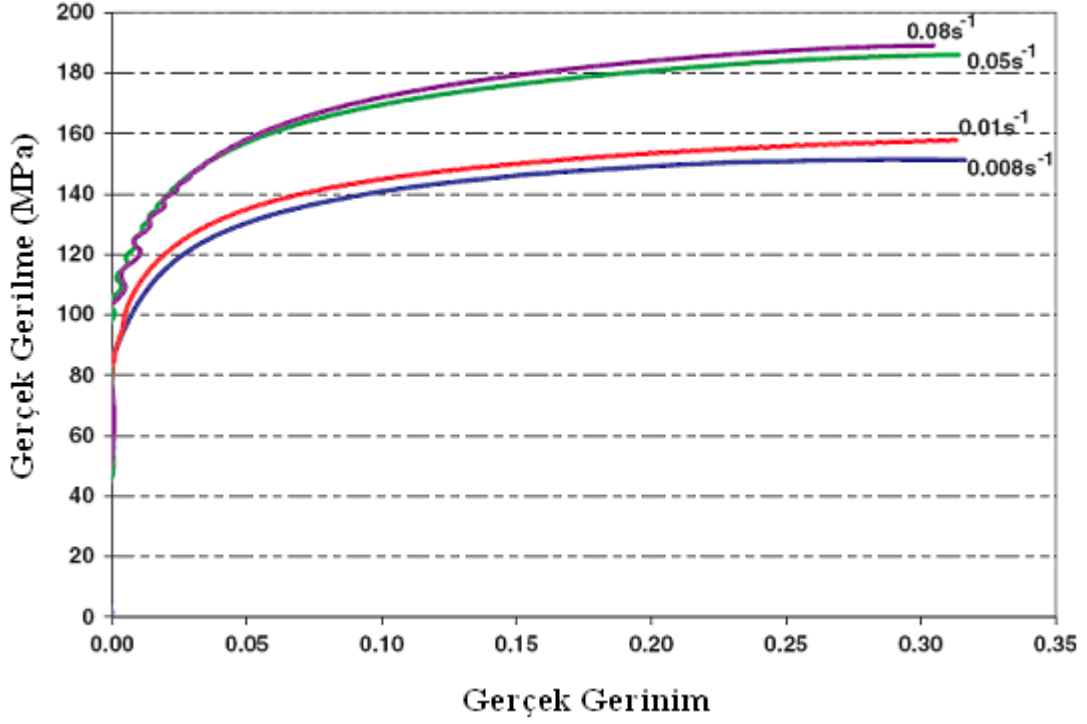


Şekil 3.7 AA5182-O malzemesinin farklı sıcaklıklardaki gerilme gerinim grafikleri*

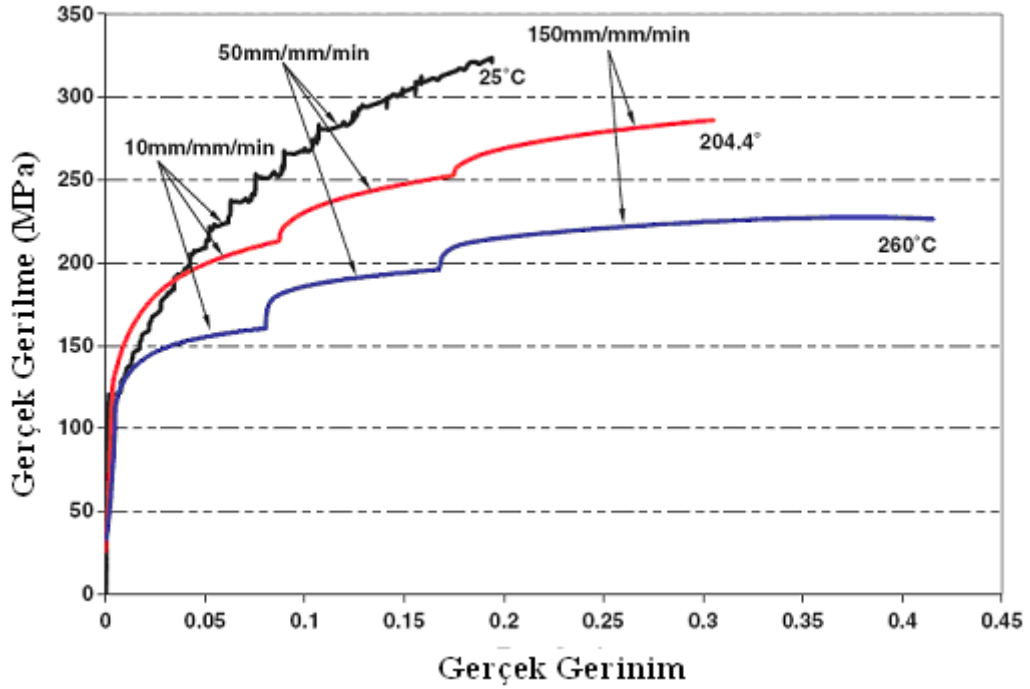
Şekil değişimi hızının etkisi de yine aynı makalede ele alınmıştır. Farklı sıcaklıklarda ve farklı şekil değişimlerinde olmak üzere iki farklı yöntemle incelenen numune sonuçları iki farklı grafikte işlenmiştir. İlk metoda göre yapılan deneyde şekil değiştirme hızı $0,001 \text{ s}^{-1}$ den $0,05 \text{ s}^{-1}$ e kadar olan ki farklı hızlarda çok numune ile yapılmıştır. Diğer metotda ise, artan hızlarda farklı sıcaklıklarda denemeler yapılmıştır (Şekil 3.8).

Şekil 3.8 de 260°C da farklı şekil değişim hızlarında AA5182-O malzemesi için yapılmış deney sonuçlarını göstermektedir. Şekil 3.9 de ise aynı malzemenin artan sıcaklıklarda, $10\text{-}50\text{-}150 \text{ s}^{-1}$ hızlarında şekil değişimi yapmış hali gösterilmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi oda sıcaklığında malzeme şekil değişimi hızlarının değişimine karşılık oldukça ufak sıçramalar yapmıştır (Şekil 3.9). Fakat artan sıcaklıkla beraber şekil değişimi hızının süneklığe etkisi daha fazla olmuştur.

*Abedrabbo, N, Pourboghrat, F, Carsley, j, (2006) Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models



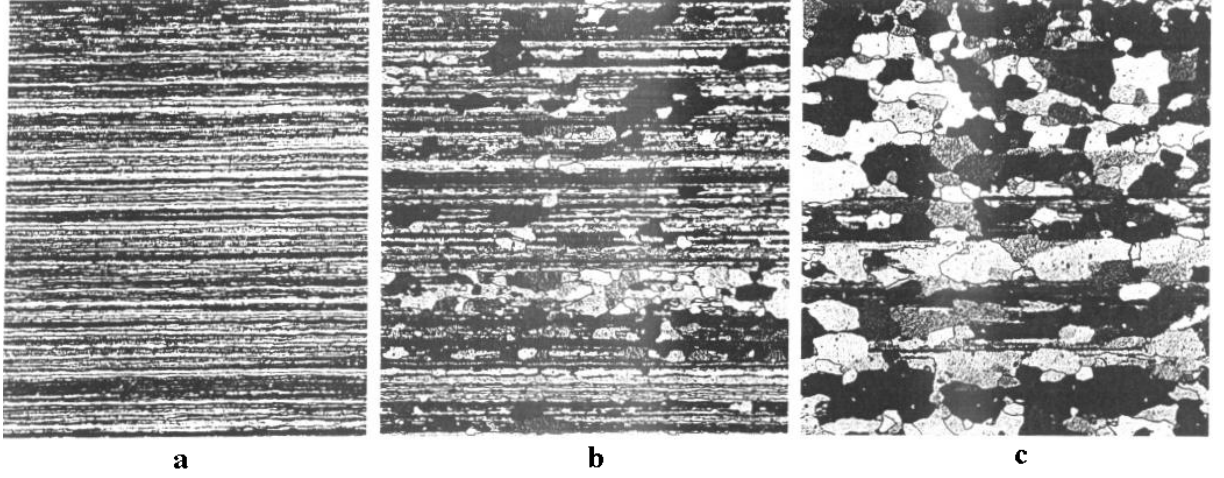
Şekil 3.8 AA5182-O 'nın 260°C'de farklı gerinim hızlarındaki gerilme gerinim grafikleri*



Şekil 3.9 AA5182-O'nun farklı sıcaklık ve gerinim hızlarındaki gerinim-gerilme grafikleri*

*Abedrabbo, N., Pourboghrat, F., Carsley, j., (2006) Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models

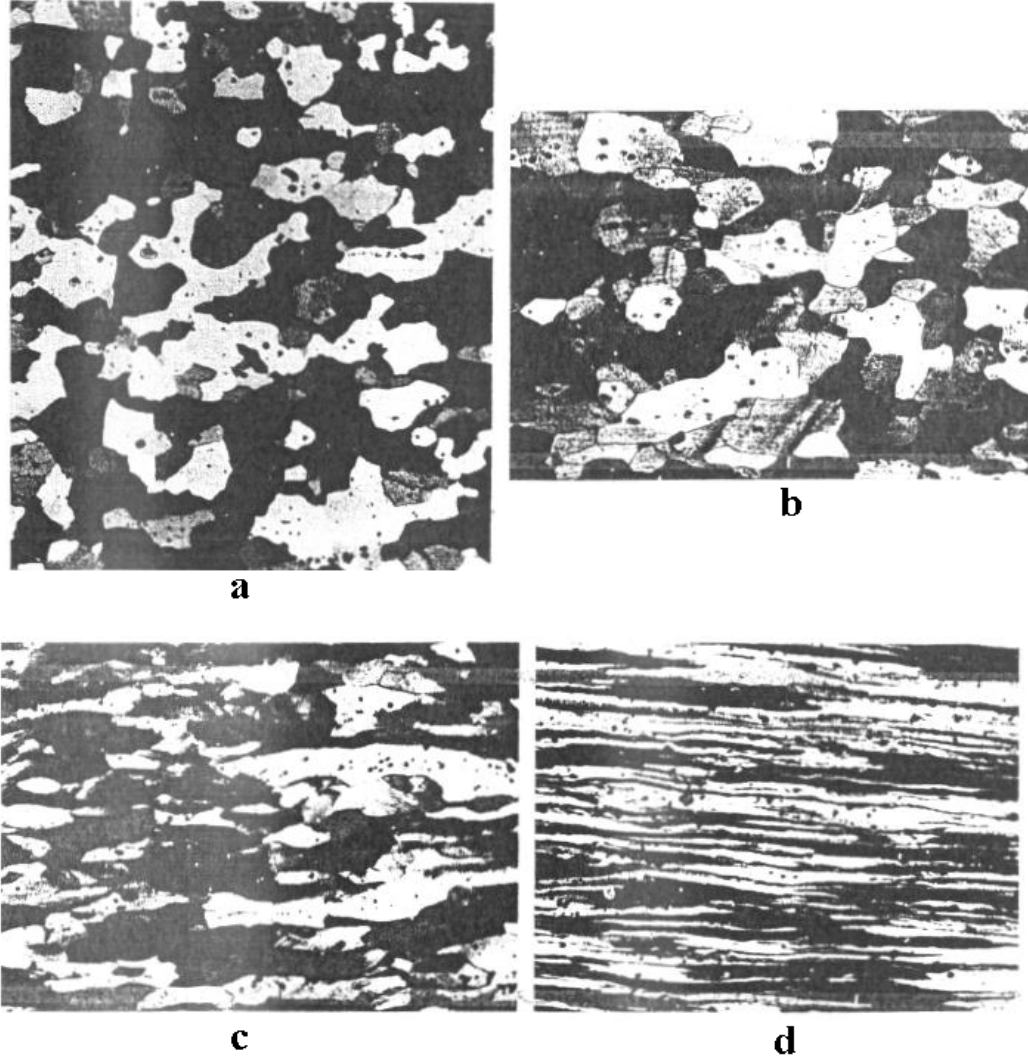
Sıcaklığın yapı üzerindeki etkileri ve dolayısıyla malzemenin oluşan gerilmelere karşı göstermiş olduğu tepki şekil 3.10 de polarize ışık altında görülmektedir.



Şekil 3.10 Alüminyum 5657-F alaşımının sıcaklıkla mikro yapıdaki değişimi*

Şekil 3.10 da görülen ilk (a) resimde %85 oranında soğuk haddelenmiş Al5657-F alaşımının boyuna kesitte mikroyapısı görülmektedir. Yönlenmiş taneler boyuna sertliği artırırken sünekliği azaltmaktadır. Ortadaki (b) şekilde 300° C’da 1 saat kadar bekletilmiş aynı numune için yapı şekil alabilirliğin arttığı yeniden kristalleşme düzlemine doğru hareket eder. Son (c) resimde ise aynı oranda haddelenmiş ve 315° C’da tavllanmış aynı alaşım için mikro yapı gözükmemektedir. Burada sıcaklığın da etkisiyle yeniden dizilmiş tane yapıları rahatlıkla gözükmemektedir.

*ASM Handbook Vol. 9, Metallography and Microstructure, (1985) ASM International, Materials Park, OH 44073

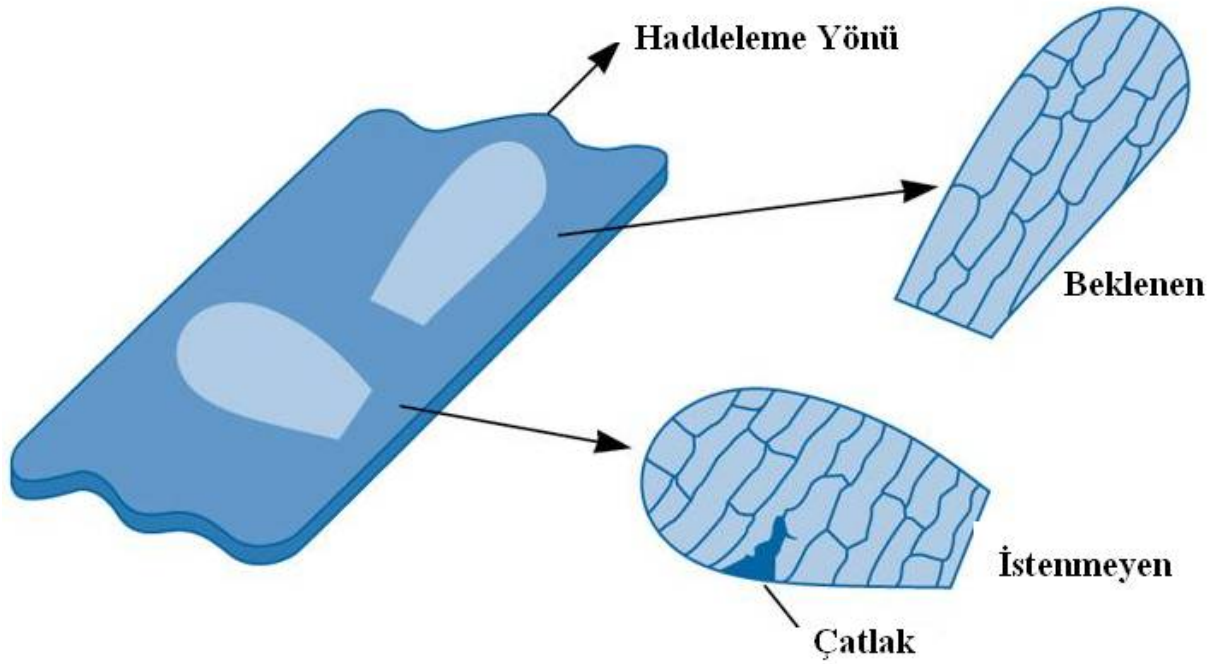


Şekil 3.11 Alüminyum 5457-O alaşımının incelme oranına göre mikroyapıdaki değişimi*

345°C'da tavllanmış 5457-O alüminyum alaşımının 10 mm'lik numunesinden alınmış boyuna örnekteki tane dizilişi (a) (Şekil 3.11) ilk şekilde gözükmektedir. Hemen hemen izotropik bir yapı göze çarpmaktadır. Aynı malzemenin %10 'luk (b) şekil soğuk haddelenmesi ile oluşan yani yapıda hafif yönelimler oluşur. Bu yönelimler %40'lık (c) ve %80'lik (d) düşüş oranlarında daha da artmaktadır.

*ASM Handbook Vol. 9, Metallography and Microstructure, (1985) ASM International, Materials Park, OH 44073

Malzeme şekil verme sonucu oluşan yapısal farklılıklara ilişkin *Donald R. Askeland – Pradeep P. Phulé* de bir takım çalışmalarda bulunmuştur. Soğuk haddeleme sonucu oluşan değişimleri şu örnekle incelemiştir. Soğuk haddelenmiş levhadan alınan plakaların mile bağlanması ile soğutucu fan yapımı, otomotiv sektöründe örnek olarak motorlarda bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Pervane parçaları bir tutucuya tuturulur ve o pozisyonda kalması sağlanır. İlerleyen zamanlarda aynı anda üretilmiş birçok pervanede çeşitli çatlamların (Şekil 3.12) oluştuğu ve kırılmaların meydana gelerek fanların kullanılamaz hale geldiği gözlemlenmiştir.

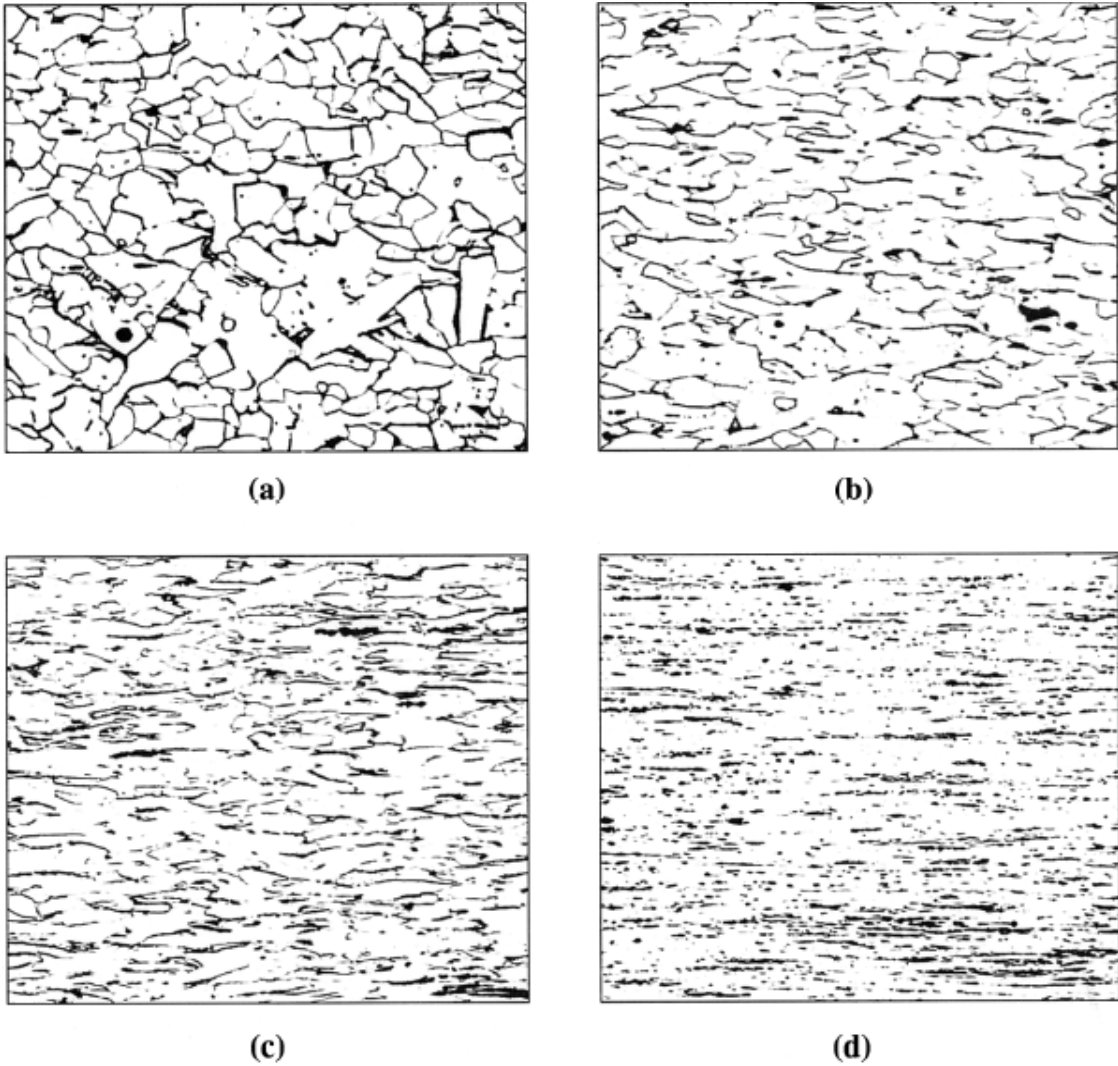


Şekil 3.12 Parça dizilimi *

Bunun nedeni olarak dört farklı ihtimal göz önüne alınmıştır. Bunlardan ilki yanlış tipte metalin kullanılması olarak düşünülmüştür. Diğer sebep olarak plakayı çıkartan kalıbın sıcak olduğu ya da kalıbın temiz olmadığı ve aradaki partiküllerin levhada deformasyonlar meydana getirdiği düşünülmüştür. Son olarak da problemin haddeleme sonucu oluşan anizotropik yapı ile alakalı olabileceği ele alınmıştır. Anizotropik dizilim levhada liflerin uygulanan kuvvet yönüne dik yönde zafiyet göstermesine sebep olmuştur. Böylece lifler pervanenin çalışması ile kuvvet yönüne dik yönde çatlaklara elverişli hale gelmesine yol açmıştır. (Şekil 3.12).

*Donald R. Askeland – P.Pradeep Phulé The Science and Engineering of Materials, 4th ed

Yukardaki açıklamaya paralel olarak *Donald R. ASKELON*' un yazmış olduğu *The Science and Engineering of materials* kitabında konuya bi takım açıklamalar getirmiştir. Deformasyon sırasında malzeme tane yapısı yönlenirken mikro düzeyde fibreleşme meydana geldiği, tane yapısı yönelendikçe mevcut kristalografî ve düzlemlerin yönlendiği söylenir (Şekil 3.13). Sonuç olarak yapıda oluşan bu yönelimler malzemeye anizotropik bir karakter kazandırır. Bu anizotropik karakter hareket yönünde bizim arzuladığımız en yüksek mukavemeti sağlar. Polimer malzemelerde de durum benzerdir. Polimer zincirleri dağınık dizilimden hareket yönüne paralel düzenli dizilime doğru bir hareket yapar.



Şekil 3.13 Düşük karbonlu çeliğin soğuk işlemdede farklı gerinim değerlerindeki tane yapıları
(a) 10% soğuk işlem, (b) 30% soğuk işlem, (c) 60% soğuk işlem, (d) 90% soğuk işlem *

*ASM Handbook Vol. 9, Metallography and Microstructure, (1985) ASM International, Materials Park, OH 44073

Levha haddedelemde anizotropik özellik uygulanan kuvvetin yönüne bağlıdır. Eğer stress düzgün olarak uygulanıyorsa max dayanım elde edilebilir söz konusu yön için (Çizelge 3.1). Fakat farklı yönlerde uygulanan farklı kuvvetler için oluşabilecek erken kırılmalardan ötürü farklı sonuçlar elde edilebilir. Plastik deformasyon sonucu sıcak ya da soğuk işlemlerde, belli bir yöne doğru dizilim gösteren taneler iç gerilme üretirler.

Çizelge 3.1 Farklı oranlardaki haddelemeye karşılık bakır ve çinko alaşımlı bakıra ait bazı akma gerilmesi ve uzama değerleri*

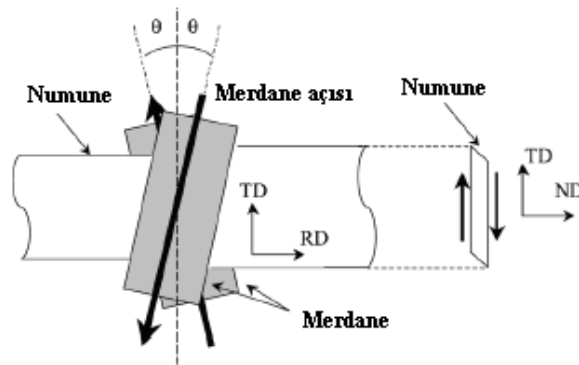
Metal	Çekme Gerilmesi (MPa)			% Uzama		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Deoxidized Cu						
0 % soğuk işlem	214	214	214	50	50	50
45 % soğuk işlem	365	365	379	6,0	5,2	5,7
90 % soğuk işlem	441	434	462	5,7	5,0	4,0
90 % Cu-10 % Zn						
0 % soğuk işlem	255	255	255	45	45	45
37 % soğuk işlem	407	414	434	5	4	3
56 % soğuk işlem	510	510	531	4	3	3
95 % soğuk işlem	172	600	655	2,7	2,7	3,2
Zn	172		214	45		28

Haddelenme esnasında oluşan anisotropi ve etkileri konusunda yapılan bir diğer çalışmada da magnezyum metali ele alınmıştır. Çalışmada magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda şekil verilebilirliğinin artırılması incelenmiştir. Yapılan incelemeler *Erichsen* testine göre, çapraz haddelenmiş örneklerin, tek yöne haddelenmiş örneklere nazaran daha yüksek *Erichsen* değerine sahip oldukları göstermiştir ki bu da çapraz haddelenme neticesinde şekil verilebilirliğin daha yüksek olduğuna işaret etmektedir. Yüksek şekil verilebilirlik, çekme yönündeki gerinime bölünerek normalize edilmiş kalınlık ve genişlik gerinimlerinin yöne bağlılığının azaltılması ile ilişkilendirilmiştir. Çapraz haddelenmiş örneklerde düzlem

* Askelon, D.R.,(1992) The Science and Engineering Of Materials, Second S,I, Edition Chapman& Hall

dokusunun düşük yoğunluk gösterdiği ve temel düzlemin daha az yayılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Magnezyum alaşımlar özellikle otomobil ve elektronik sektöründe kullanım alanı yaygınlaşmakta olan malzemelerdir. Yüksek performanslı magnezyum alaşımlar için yeni haddeleme yöntemleri geliştirilmelidir. Oda sıcaklığında bazal olmayan kaymalarda, kaymayı başlatmak için gereken minumun gerilme değeri, bazal kaymalar için gereken değerden daha yüksek olduğu için Mg alaşımlarının şekil verilebilirliğinin doku ile ilişkisi oldukça yüksektir. Oda sıcaklığında haddelenmiş Mg alaşım sacı, yüksek oranda bazal doku sergilediği için düşük şekil verilebilirliğe sahiptir. Bu nedenle Mg alaşım saclar da yüksek şekil verilebilirlik elde edebilmek için dokunun kontrol altına alınması gerekmektedir.

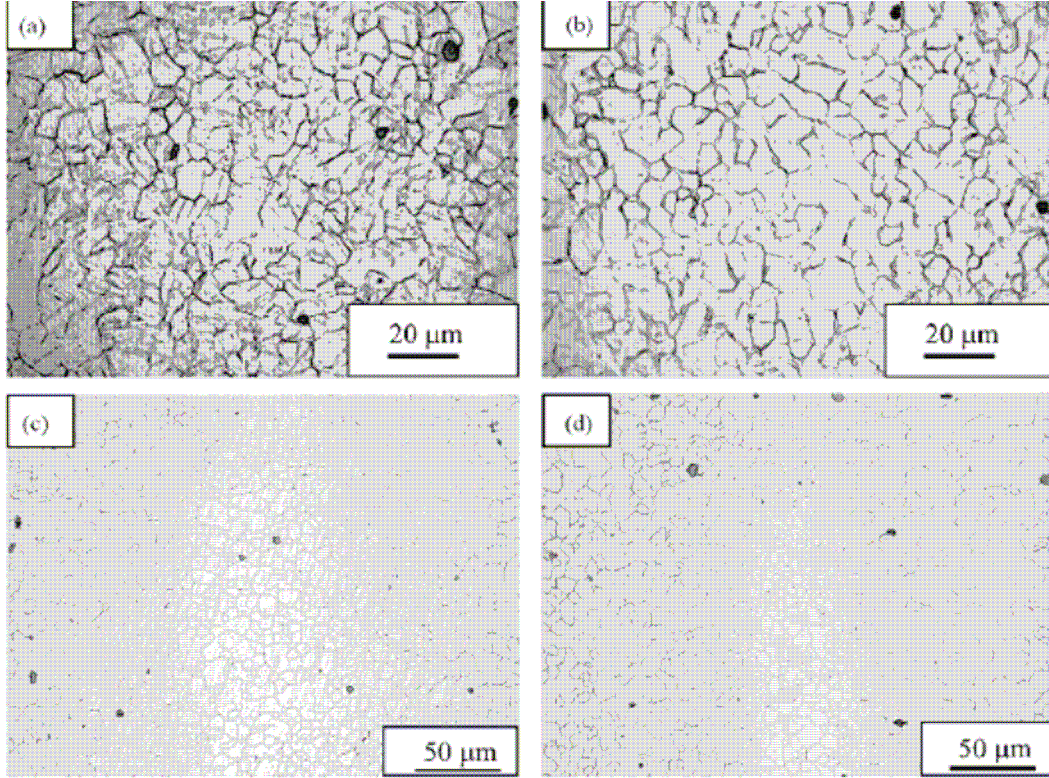
Bu makale de çapraz haddeleme etkisini gözlemleyebilmek adına silindir eksenleri $7,5^\circ$ kaydırılarak (Şekil 3.14) yapılmış çapraz haddeleme sonucu elde edilen sacların şekil verilebilirliği ve mikroyapısı normal haddelenmiş örneklerle karşılaştırılmıştır. Deneyde kullanılan malzeme AZ31 (Al-kütlece %3, Zn-kütlece %1, Mn-kütlece %0,5) magnezyum alaşımıdır. $160-220^\circ\text{C}$ 'de gerçekleştirilen Erichsen testleri ile örneklerin şekil verilebilirliği belirlenmiştir. Deney için $60\text{mm} \times 50\text{mm} \times 6\text{mm}$ 'lik kesilmiş örnekler 24 saat 400°C ' de ısıl işleme tabi tutulmuş daha sonra haddeleme öncesi aynı sıcaklıkta 20 dak. kadar bekletilmiştir. %20' lik redüksiyonla, silindir eksenleri $7,5^\circ$ kaydırılmış, numune kalınlığı 1 mm olana kadar 8 defa haddelenmiştir. Haddeleme sonucu numuneler aynı sıcaklıkta 30 dak. kadar da tavlansmıştır. Kullanılan silindirin yarıçapı 150 mm, genişliği 200mm'dir. Kaydırıcı olarak da bir ester bileşiğinin su bazlı emülsiyonu kullanılmıştır. Normal haddelemede ise aynı prosedür izlenmekle beraber haddeleme öncesi 20 dak kadar 603° 'de bekletilmiştir.



Şekil 3.14 Merdane düzeni*

*Chino, Y., Sassa, K., Kamiya, A., Mabuchi, M., "Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet" a Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 11 August 2006

Haddelenme sonuncu elde edilen levhalar 60mm yarıçapında kesilen saç ve 20 mm yarıçapında yarıküre şeklinde erkek kalıplar ile (punch) 160°C, 200°C, 220°C’ da Erichsen testi gerçekleştirilmiş ve numunenin kırılmaya başladığı anda erkek kalıbın katettiği mesafe olarak tanımlanan EI değerleri tespit edilmiştir. Erkek kalıp hızı 58 mm/dak, pot çemberinin kuvveti ise 10 kN olarak ayarlanmıştır. Bu numunelerin mekanik davranışını incelemek ve r değerini bulabilmek için de 160°C ve 220°C de 0°, 45° ve 90°’ lerde alınmış numunelerle çekme testi yapılmıştır. Gerinim değeri % 9 olarak atanmıştır.

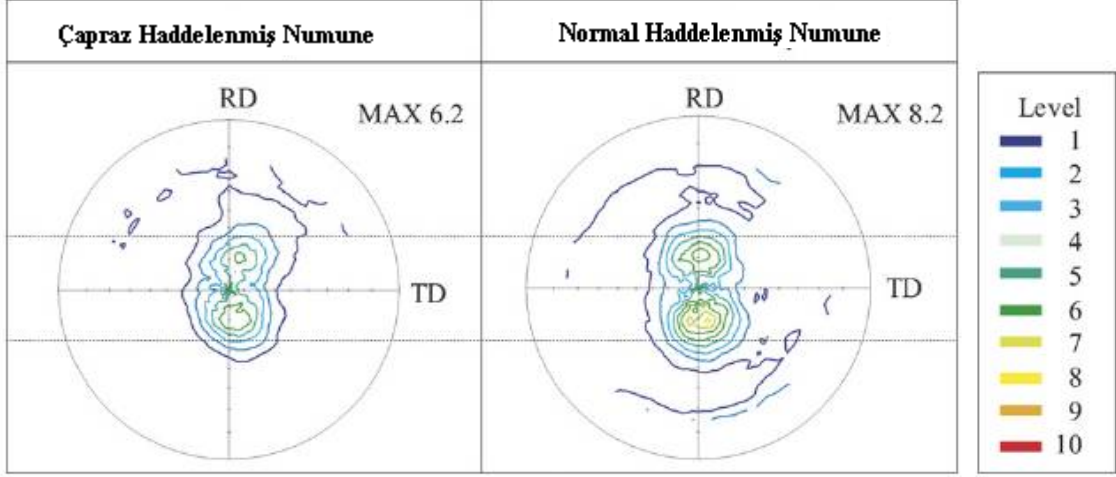


Şekil 3.15 a, 400°C K de çapraz haddelenmiş numune, b, 330°C de normal haddelenmiş numune, c, 400°C de çapraz haddelenmiş ve 30 dak. tavllanmış numune ve d, 400°C de normal haddelenmiş ve 30 dak. tavllanmış numune*

Haddelenme işleminden sonra mikroskopik gözlemler ile tane büyüklükleri arasında çapraz ve normal haddelenmede anizotropikliği oluşturan bir fark gözlenmemiştir. Şekil 3.15 de gösterilen resimlere göre çapraz haddelenmiş (a) örnekte ort. tane boyutu 10,4 µm, normal haddelenmiş örnekte (b) ort. tane boyutu 9,6µm, çapraz haddeli (c) tavllanmış numune için 10,6µm ve normal haddelenmiş numune için (d) 10,2µm olarak ölçülmüştür.

*Chino, Y., Sassa, K., Kamiya, A., Mabuchi, M., “Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet” a Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 11 August 2006

Şekil 3.16’de ise çapraz ve düz haddelenmiş numuneye ait kutup figürleri görülmektedir. Bu figürlerden de anlaşılacağı üzere çapraz haddelenmiş numunedeki doku yoğunluğu, normal haddelenmiş numunedeki doku yoğunluğundan daha azdır. Ayrıca normal haddelenmiş numunede bazal doku daha geniş bir alana yayılmıştır. Sonuç olarak çapraz haddelemede düşük doku yoğunluğu ve az yayılmış bazal doku elde edilmiştir.



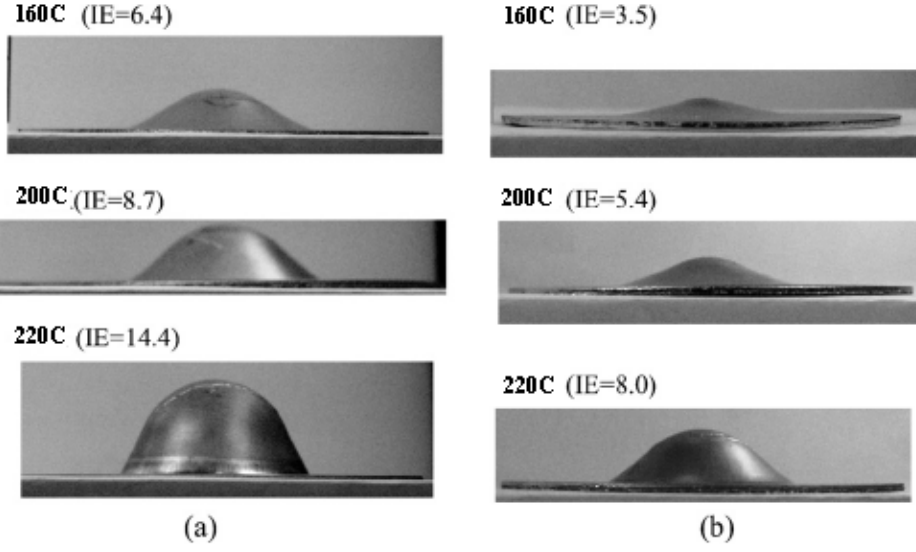
Şekil 3.16 Kalınlık istikametinde merkezden alınan çapraz ve düz haddelenmiş numunelerdeki kutup figürleri *

Şekil 3.17’den de görüleceği üzere *Erichsen* testi neticesinde farklı sıcaklıklarda çapraz haddeleme için daha yüksek EI değerleri elde edilmiştir. Yine şekil 3.17’de çapraz haddelenmiş numunelerin daha yüksek şekil alabilirliğinin olduğu göze çarpmaktadır.

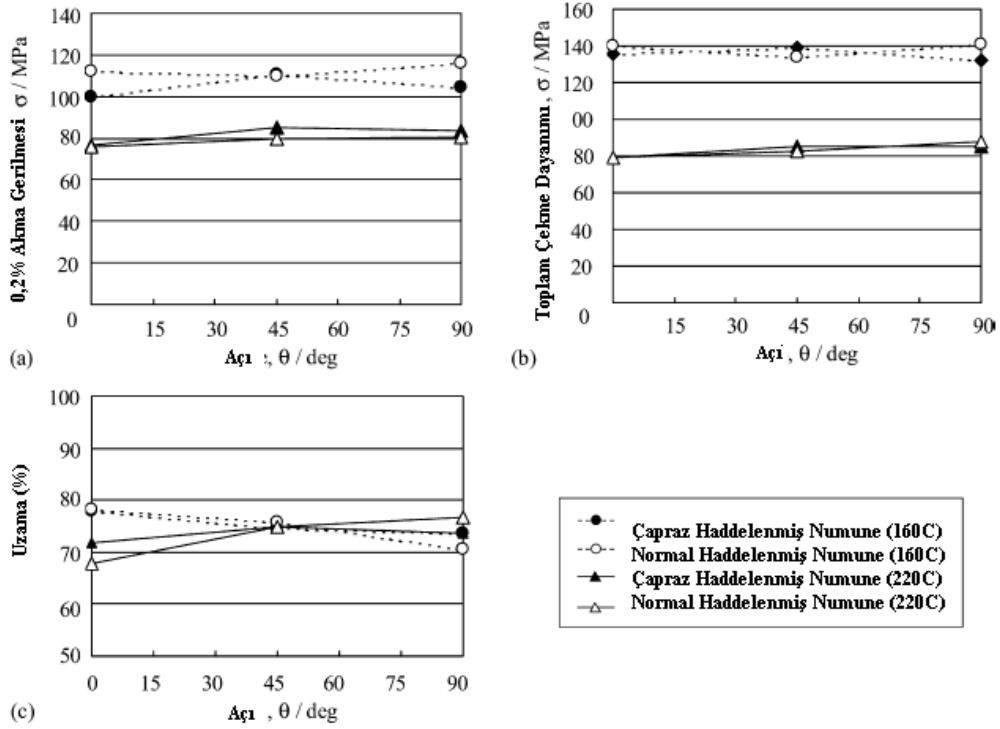
Bu sonuçlardan hareketle mikro yapılarında herhangi bir farklılığın gözlemlenmediği iki yöntem için dokularda bir farklılığın olduğu düşünülmektedir. Yani çapraz haddelemede elde edilen yüksek şekil verilebilirliğin doku ile ilintili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 3.18’ den de görülebileceği üzere çekme deneyi sonuçları neticesinde alınan değerlerin birbirlerine oldukça yakın çıktığı ve değişen değerlerin yöne bağlılığı konusunda bize bir fikir veremeyeceği anlaşılmaktadır.

*Chino, Y., Sassa, K., Kamiya, A., Mabuchi, M., “Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet” a Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 11 August 2006



Şekil 3.17 160°C, 200°C ve 220°C da alınan Erichsen testi sonuçları a, çapraz haddelenmiş numuneler, b, normal haddelenmiş numuneler*



Şekil 3.18 160°C ve 220°C’de çapraz ve normal haddemeye ait akma gerilmesi, Çekme Dayanımı ve kopma uzama değerleri karşılaştırılması*

*Chino, Y., Sassa, K., Kamiya, A., Mabuchi, M., “Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet” a Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 11 August 2006

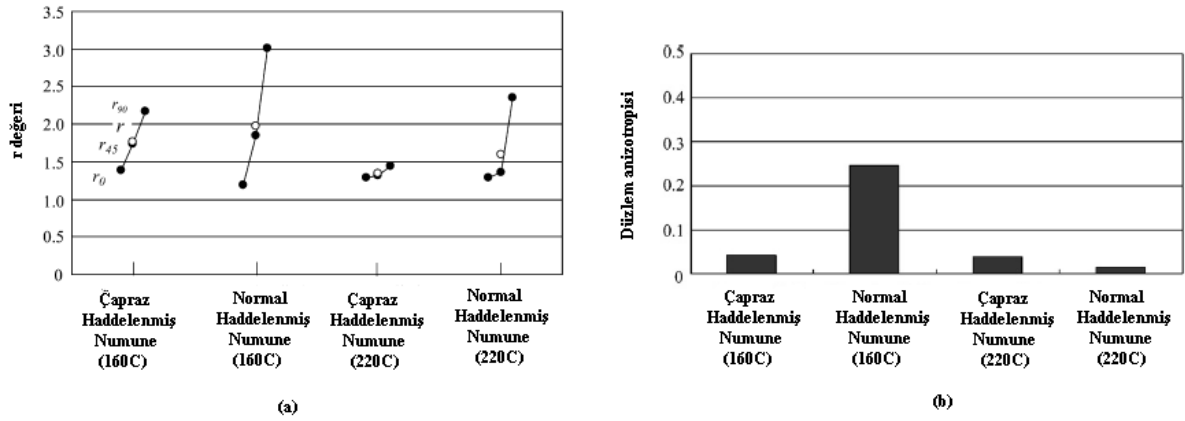
Anizotropinin tanımlanmasında çelik ve alüminyum için r (Lankford) değerinden bahsetmiştik. Bu değer magnezyum içinde hesaplanarak bir takım açıklamalar getirilmeye çalışılmıştır. R değeri,

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (3.1)$$

Düzlemsel ve ortalama r değerleri ise,

$$r = \left| \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \right|, \Delta r = \left| \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \right| \quad (3.2)$$

şeklindedir. Bu ifadelerle hesaplanan r değerleri ve grafikler şekil 3.19 da gösterilmiştir.



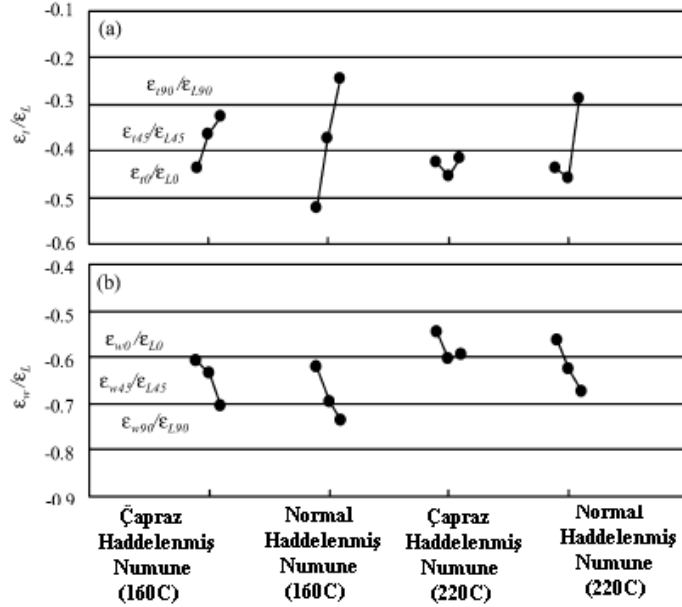
Şekil 3.19 a, ortalama r değerleri, b, düzlemsel r değerleridir.*

Magnezyum alaşımları daha önce çelik ve alüminyum için yapılan çalışmalar ve elde edilen “ r ” değerleri ile çıkan sonuçlar itibariyle farklılık arz eder. Farklı proseslerdeki doku gelişimi güçlendirilmiş Al alaşımları için yüksek ortalama “ r ” değeri ve düşük düzlemsel “ r ” değerine sahip oldukları bulunmuştur. Keza demir için yapılan çalışmalarda düşük düzlemsel “ r ” değerine sahip olan örneklerin daha iyi şekil verilebildiği sahip olduğu ve derin çekme işleminde daha az kulaklanmaya rastlandığı görülmüştür. Fakat edinilen sonuçlara göre şekil 3.19’dan da görüldüğü üzere ne ortalama “ r ” değeri yüksek ne de düzlemsel “ r ” değeri düşüktür çapraz haddelenmiş numune için.

Makalenin bu bölümüne kadar oluşan şekil verilebilirlik farkının mekanik testlerle açıklanamayacağı belirtilmiştir. Konu şekil değişimi açısından açıklanmaya çalışıldığında bir

*Chino, Y., Sassa, K., Kamiya, A., Mabuchi, M., “Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet” a Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 11 August 2006

takım sonuçlar çıkmaktadır. Genişlik ve kalınlık boyunca oluşan şekil değişimlerinin boyuna oluşan şekil değişimine oranı şekil 3.20 de iki farklı sıcaklık için (160°C ve 220°C) grafik üzerine aktarılmıştır. Şekil 3.20 a' da kalınlık boyunca şekil değişiminin (ϵ_t), boyca şekil değişimine olan oranı (ϵ_l), Şekil 3.20 b' de ise genişlik boyunca şekil değişiminin (ϵ_w), boyca şekil değişimine olan oranı her bir açı için (0°, 45°, 90°) bulunarak normalize edilmiştir.



Şekil 3.20 a, kalınlık, b, genişlik boyunca şekil değişiminin boyuna gerinime oranı.*

Bu grafiklerden (Şekil 3.20) her ikisinde de ϵ_w/ϵ_l ve ϵ_t/ϵ_l değerlerinin yöne bağıllığı normal haddelemeye göre daha az olduğu açıkça görülmektedir. 0°, 45° ve 90° için hesaplanmış değerler çapraz haddelenmede birbirine daha yakındır. Sonuç olarak Mg'nin çapraz haddelenmede yüksek şekil verilebilirliğe sahip olması, çapraz haddelenmede ϵ_w ve ϵ_t değerlerindeki anizotropinin daha az olması ile açıklanabilir ve bunun da daha önce açıklanan doku değişimleri ile ilişkili olduğu söylenebilir. Çapraz haddelenmiş örneklerde incelenen (0002) düzleminin, normal haddelemeye göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğu ve bazal dokunun çapraz haddelenmede daha az yayıldığı tespit edilmiş ayrıca bu iki örneğin mekanik özelliklerinde belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ancak normal haddelenmiş örneklerde, boyuna gerilime bölünerek normalize edilen kalınlık ve genişlik gerinimindeki anizotropinin, çapraz haddelenmedeki örneklere göre daha yüksek anizotropiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, normal haddelenmiş örneklerde görülen düşük şekil verilebilirliği açıklamaktadır.

*Chino, Y., Sassa, K., Kamiya, A., Mabuchi, M., "Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet" a Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 11 August 2006

4. ÇEKME DENEYİ

Çekme testi bir çekme gerilmesi altında malzemenin uygulanan yüke karşılık verdiği cevabı ölçmeye yarayan bir testtir. “ ε (boy farkının ilk boy oranı)” ve gerilmenin “ σ (kuvvetin uygulama alanına oranı)” tanımlarının eşliğinde tipik olarak standart ölçülerdeki numunenin yavaş ve sabit bir hızla şekil değişiminin ölçülmesidir.

$$\sigma = \frac{P}{A_0}, \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4.1)$$

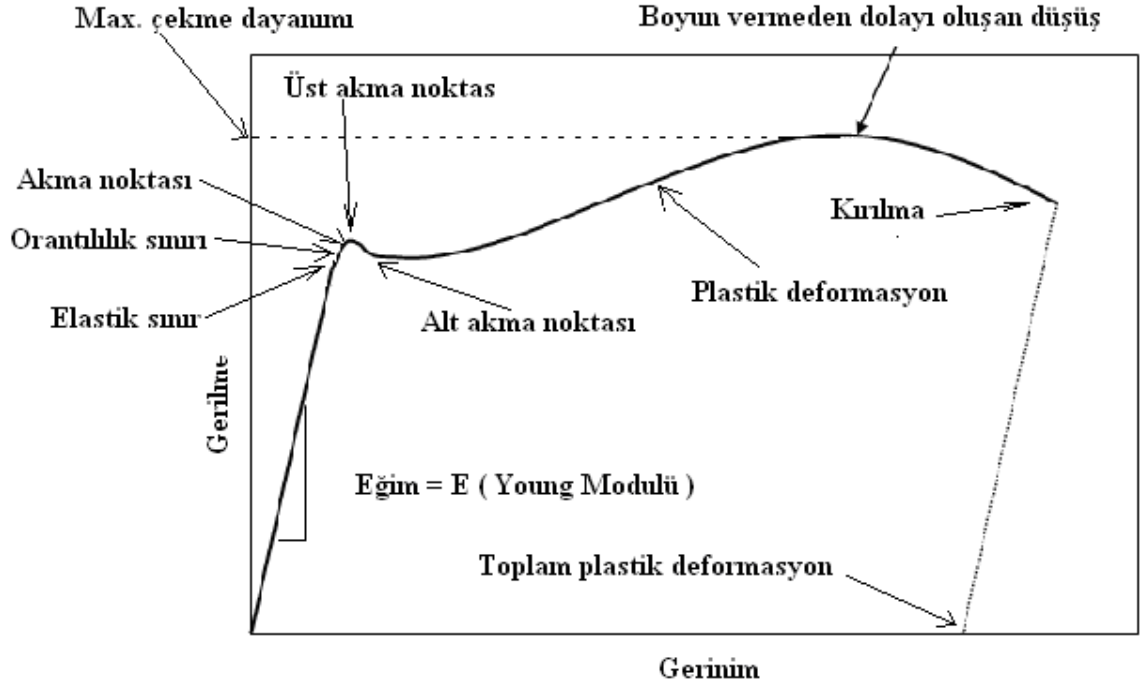
Yukardaki şeklide ve aynı zamanda 2. bölümde tanımlanmış olan denklemler ışığında çizilen grafikde başlangıç alanı sabit kabul edilmiştir. Bu sebepten mühendisliki yapılan bu hesaplama ile gerçek sonuçlar plastik bölge için bir olmaz.



Şekil 4.1 Mühendisliki ve Gerçek eğriler

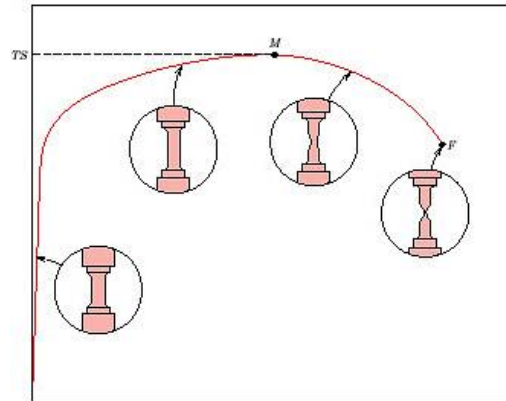
Çekme testi sonunda elde edilen grafik bize malzeme hakkında önemli birkaç data vermektedir. Uygulanan kuvvete ya da daha doğru bir ifade ile gerilmeye karşılık oluşan şekil değişimi oranı ile çizilen grafik neticesinde malzemenin “elastik” davranışı, akması, plastik şekil değişimi, son olarak boyun vermesi ve kırılması gözlemlenebilir. Mühendisliki gerilme-gerinim grafikleri bize şu bilgiler hakkında fikir vermektedir,(Şekil 4.2)

- Elastiklik modulünü
- Akma gerilmesini
- Çekme gerilmesini
- Kırılma gerilmesini
- Sünekliği
- Tokluğu



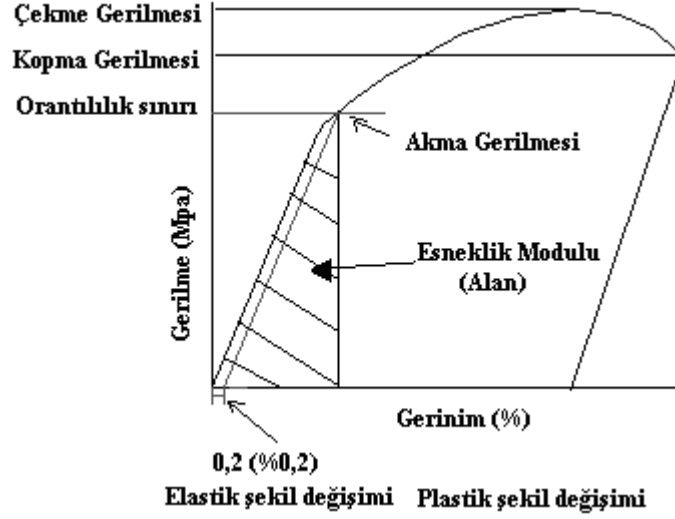
Şekil 4.2 Gerilme-Gerinim diagramı ifadeleri

Yukardaki şekilde görüldüğü gibi malzeme çekme kuvveti altında önc elastik bir davranış sergiler. Bu esnada tüm şekil değişimleri lineer karakterde olup tersinir bir yapıdadır. Uygulanan kuvvet miktarı belirli bir seviyeyi aşınca ki bu değer orantılılık sınırındır. Malzeme bu noktadan itibaren lineer olmayan bir hareket yapar. Elastiklik sınırı geçilmiştir ve malzeme üzerinde kalıcı şekil değişimleri meydana gelemeğe başlar. Kuvvet akma değerini aşar ve plastik deformasyonlar meydana gelir. Bundan sonraki şekil değişimleri tersinir değildir ve son olarak malzeme boyun verir ve kopma ya da kırılma ile parça kopar (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Boyun verme ve kopma

Elastik şekil değişimi ile plastik şekil değişiminin kesiştiği noktayı ifade eden akma noktasını tanımlamak belirlemekten çok kolaydır. Elastik deformasyon eğrisi mükemmel bir doğruluğa sahip değildir. Yani tam lineer değil lineere yakın bir eğridir. Genel kural olarak akma değeri ise bu lineere yakın eğri üzerinde çizilen doğrunun 0,2% ϵ kadar ofsetlenmesi ve oluşan bu yeni doğrunun eğriyi kestiği nokta olarak tanımlanır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Gerilme-gerinim grafiği

Esnelik modülü akma noktasında eğri altında kalan alan olarak ifade edilir. Kopma gerilmesi ise maksimum gerilmenin altında kalan ve boyun verme anındaki gerilmedir. Suneklik ise kırılma gerilmeden lineer eksene paralel çizilen eğrinin "x" eksenini kesiştiği noktadır. Tokluk ise eğri altında kalan tüm alandır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Literatür taramalarından da gördüğümüz üzere malzeme üzerindeki plastik şekil vermeler malzemeye ait birçok parametreyi etkilemektedir. Malzeme iç yapısındaki bu değişimler özellikle daha sonraki işlemlerde yani son ürün elde edilirken göstereceği davranışı kestirebilmemiz adına çok önemlidir. Alüminyum levhalardan sıvama usulü ile yapılan imalatlarda bu hassasiyetler göze çarpmaktadır. Ergitilerek tekrardan kalıba dökülmüş plaka soğuk haddeleme sonrasında, yapılan işlemin şekline göre değişik karakterler kazanmaktadır. Levhaların elde edilişi ilerki bölümlerde detaylıca açıklanacaktır. Genel imalatta tecrübe sonucu bertaraf edilmiş bu problemlerin kaynağı yapılacak olan bu çekme deneyi sonuçları ile açıklanmaya çalışılmıştır. Tek yönde soğuk haddelemeye tabi tutulmuş levha ile iki ekseninde soğuk haddelemeye tabi tutulmuş levhadan, standart ölçülerde ve sırasıyla çekme yönüne paralel, 45° açı ile ve çekme yönüne dik olmak suretiyle alınan numuneler aynı sıcaklık ve hız değerlerinde çekme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar teker teker incelenip gerileme-gerinim grafikleri oluşturulmuştur. Sonrasında ortalamalar alınan bu değerlerin kendi aralarında mukayesesi yapılmıştır. Ayrıca bu grafiklerden E, σ_{ak} ve σ_{max} parametreleri belirlenmiştir. Numuneleri hazırlanışı, deney ve sonuçları aşağıda açıklanacaktır.

5.1 Numune

Külçeler halinde *Etibank*'tan gelen ham malzeme ticari amaçlı olarak satılan ve TSE standardına göre *ETİAL-5* (çizelge 1,4) olarak adlandırılan ve bileşiminde %99,5 saf alüminyum bulunan bir yapıdadır. Bu tanımlama esas yapıdaki saf malzemenin ve diğer elementlerin oranına göre yapılmaktadır. Çizelgeden de görülebileceği gibi yapı içerisinde Si, Fe, Cu, Zn, Ti gibi değişik elementler değişik oranlarda bulunurlar. Bu orana göre Al ticari olarak adlandırılır. Kullanım ve imalat yöntemine göre bir tercih yapılabilir. Örneğin ekstrüzyon yöntemi ile imalat yapılacak bir profil sisteminde kullanılacak Al' da silisyum oranının düşük olması arzu edilir. Sivama işlemi için ana yapıda demir oranının düşük olması arzu edilir. Haddeleme, ve daha sonrası uygulanacak işlemler için uygun ham malzeme *ETİAL-5* yada *ETİAL-6* kullanılır. Bizim deneyimizde *ETİAL-5* ham malzemedan levhalar kullanılacaktır.

Söz konusu külçeler haddeleme işlemi için henüz hazır değildir. İçinde bir takım gazlar, pislikler ve yabancı maddeler ihtiva eden bu külçeler bu olumsuz koşulların giderilmesi için ergitme işlemine tabi tutulur. Ergitme ocaklarında 700-720 °C' ye kadar ısıtılan külçeler, bu

aşamada yapıyı daha sünek hale getirmek için bir de ilaçlanır. Titanbor isimli ilaç hem istenmeyen gazların yanında yabancı maddelerin de dışarı atılmasını sağlar. İlaçlama sonucu oluşan cüruf ağı açık ocaktan süzgeç yardımı ile alınır.

Ergitme işlemi ile ilgili ufak bir bilgi verilecek olursa potalar hem doğalgazlı hem de mazot esaslı olarak çalışabilmektedir. Doğalgazlı ocağın maliyeti yüksek olmakla beraber verimi daha fazladır. Ergitilecek katı malzeme üzerine doğrudan alev vurmadığı için malzemeyi yakarak ufak alüminyum parçacıklarının uçuşması ve dolayısıyla kutlenin azalması söz konusu değildir. Fakat akaryakıt esaslı ocaklar külçeyi yakarak ergittiği için uçuşan malzemedan dolayı kütle kaybı söz konusudur. Bunun yanında ilk yatırım maliyeti daha azdır doğal gazlı ocaklara nazaran.

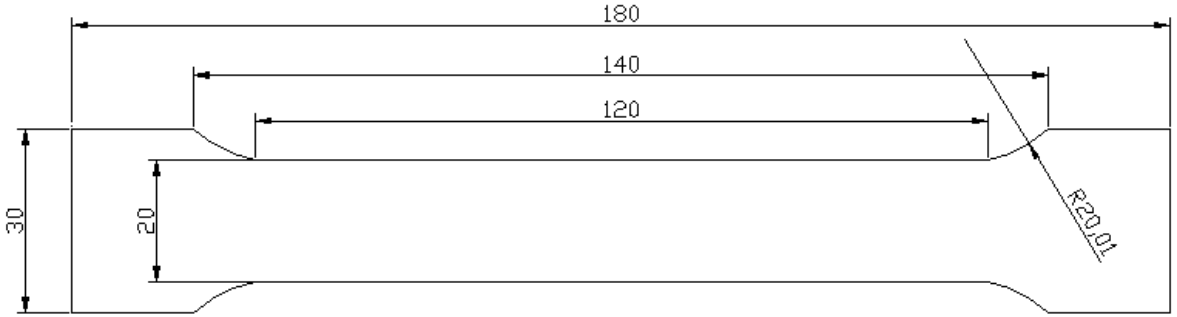
İçindeki yabancı gazları alınmış, süneklik kazandıran ilacı atılmış ve cüruflarından temizlenmiş ergiyik malzeme kalıplara boşaltılır. Burada malzemenin kalıba dökülme hızı çok önemlidir. Özellikle yapılacak ilk kalıplama işleminde kalıp soğuk olduğu için kalıba giren ergiyiğin katılaşması ve katman katman kalıbı doldurarak dalgalı bir hal alması mümkündür. Bu plakalardan kalitesiz levhalar elde edilir. Sonraki seferlerde kalıp her ne kadar ısınmış olsa da 700°C'da ki ergiyik oda sıcaklığının biraz üstündeki kalıplara girerken az da olsa bir dalgalanma olacaktır. Malzemenin kalıba girişinden 1,5 dak. sonrasında dış yüzeyi tamamen katılaşacaktır. Bu maruziyetin tam olarak giderilmesi soğuk kalıpta tamamen mümkün olmamakla beraber sabit hızlı bir dolun işlemi ile sorun azaltılabilir.

Kullandığımız kalıplar 30X30X3 cm boyutlarında yaklaşık 8 Kg ağırlığındadır. Kısa süre içerisinde katılaşan plakalarımız haddlemeye artık hazırdır.

Çekme deneyi için gerek duyduğumuz numuneler bu aşamadan sonra yapılan işleme göre farklılık gösterecektir. İmalat süreci ve nihai kalınlık göz önüne alınarak yapılan hesaplamalarda biraz da operatörün el alışkanlığı ile bulunduğu değerlerden 30 mm' lik kalınlık tek yöne haddelenecek levhalar için 7 pasoda 1,5 mm kalılığa düşülmektedir. Buna karşın çift yönlü levhalar için ki zaten esas imalat da bu şekilde yürütülmekte, 3 mm kalınlığa kadar 5-6 pasoda, 1,5 mm ye kadar da eski hadde yönüne dik yönde 4 pasoda haddelenmektedir.

5.2 Numune standartları ve numunelerin elde edilmesi

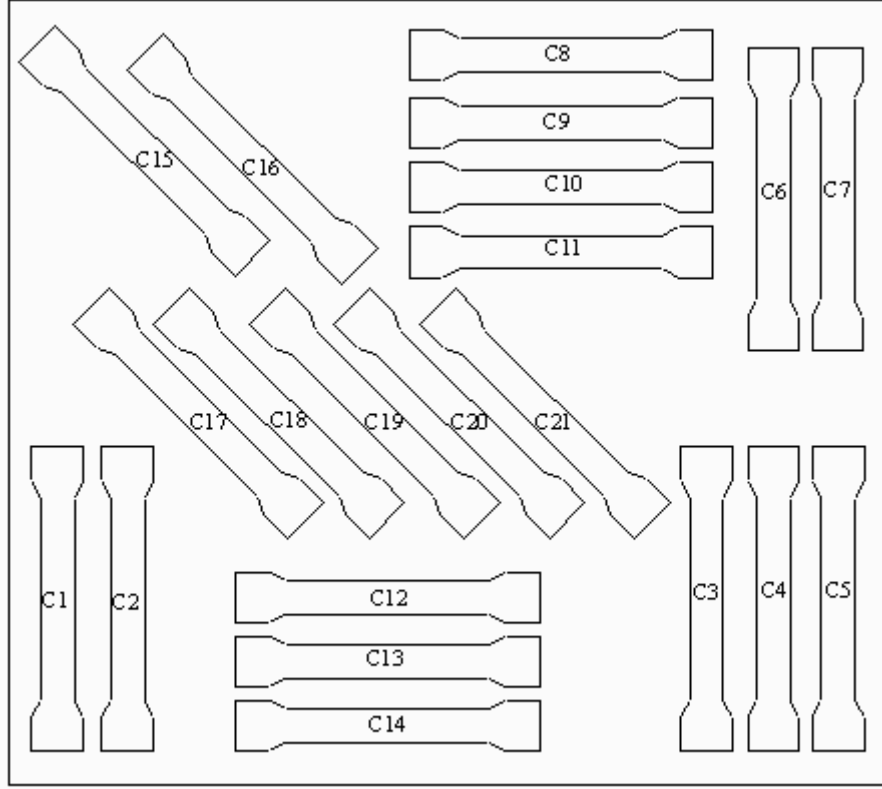
Bu sayede elde edilmiş levhalardan çekme deneyi için belirli ölçü standardında ve belirli açılarda numuneler kesilir. Numuneler *TS138 EN 10002-1* standardına göre kalınlığı 3 mm ile 0,1 mm arasındaki saclar için *Ek-B* de belirtilen ölçüler esas alınmalıdır. Kavranan baş kısımlar ile paralel uzunluklar arasındaki geçiş kavisi muntaza ayarlanmalıdır. İlk ölçü uzunluğu ise kopmaya etki edecek herhangi bir çentik etkisinden kaçınılmak suretiyle işaretlenmelidir.



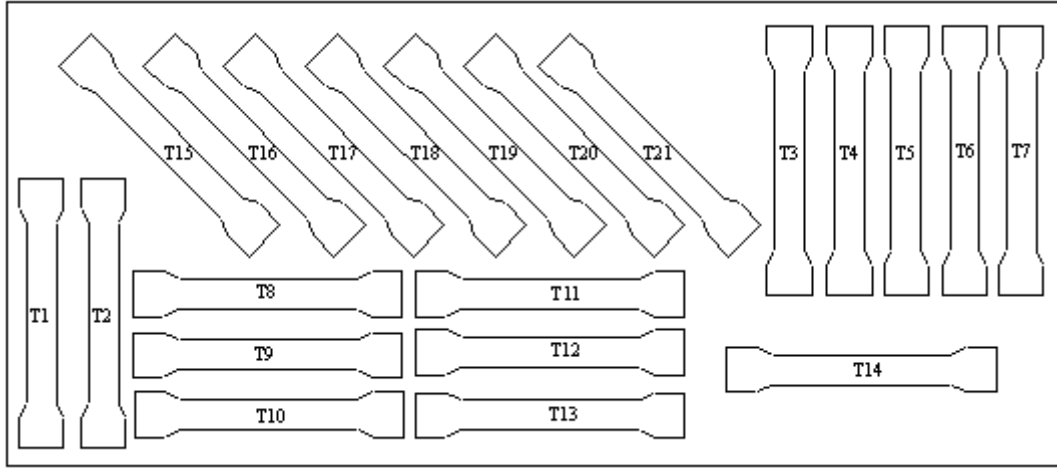
Şekil 5.1 Deney çubuğu

Standartlara uygun olarak belirlenen deney numuneleri haddelenmiş levhadan belirli açılarla çıkartılması gerekir. Esas amaç itibariyle 0° , 45° ve 90° lik açılarda tasarlanmış numuneler CNC robotta her biri teker teker işaretlenerek freze ucu yardımıyla çıkartılır. Bu açıların seçilmesinde elbet bir kasıt vardır ki o da şu dur;

Çekme testi test numunesi dikkate alındığı takdirde tek yönde haddelenmiş levhada 0° 'lik yani haddeleme yönüne paralel numunedeki mikro yapıda, yönlenmiş yapıya paralel bir numune almış oluyoruz. Buna karşılık 90° 'den alınmış numune için numunemiz yapıya dik bir yönelim sergileyecektir. 45° 'lik numune de ise bu durum her iki numuneye ait testi sonucunun ortasında bir değerde olması düşünülmektedir. Söz konusu numuneler şekil 5.2 ve şekil 5.3 de ki dizilimle çıkartılmıştır. Ayrıca numunenin boyutları da ilgili standarda göre (*TS138 EN 10002-1*) çizelge 5.1 de tablo halinde verilmiştir.



Şekil 5.2 Çift eksenli haddelenmiş levha ve numune dizilimi



Şekil 5.3 Tek eksenli haddelenmiş levha ve numune dizilimi

Çizelge 5.1 Çıkartılan numunelerin boyutları

No	Kalınlık	Genişlik	Alan (mm ²)
C01	1,52	20,08	30,52
C02	1,52	20,00	30,40
C03	1,52	19,43	29,53
C04	1,52	19,96	30,34
C05	1,52	20,02	30,43
C06	1,52	20,00	30,40
C07	1,52	20,00	30,40
C08	1,52	20,25	30,78
C09	1,52	20,25	30,78
C10	1,52	20,25	30,78
C11	1,52	20,21	30,72
C12	1,52	19,77	30,05
C13	1,52	19,71	29,96
C14	1,52	19,74	30,00
C15	1,52	20,10	30,55
C16	1,52	20,03	30,45
C17	1,52	20,03	30,45
C18	1,52	19,95	30,32
C19	1,52	19,97	30,35
C20	1,52	19,97	30,35
C21	1,52	20,00	30,40
T01	1,52	20,09	30,54
T03	1,52	20,23	30,75
T04	1,52	20,04	30,46
T05	1,52	20,04	30,46
T06	1,52	20,06	30,49
T07	1,52	20,08	30,52
T08	1,52	18,73	28,47
T09	1,52	18,63	28,32
T10	1,52	18,63	28,32
T11	1,52	18,98	28,85
T12	1,52	20,00	30,40
T14	1,52	20,10	30,55
T16	1,52	19,00	28,88
T17	1,52	19,03	28,93
T18	1,52	19,00	28,88
T19	1,52	19,03	28,93
T20	1,52	19,06	28,97
T21	1,52	19,06	28,97

5.3 Deney Cihazı

Deney İstanbul Teknik Üniversitesinin ayazapa kampüsünde uçak mühendisliği tarafından savunma sanayi için geliştirilecek yeni bir helikopter projesi için alınmış olunan MTS marka deney cihazı ile yapılmıştır. Cihaz 25 kN' luk masa üstü yorulma test sistemi ve 100 kN' luk yere monte çekme ve basma test sisteminden oluşmaktadır. Çekme testini yapacağımız 2. ünite 100 kN'luk dinamik eksenel yükleme, 120 kN luk statik yükleme yapabilmektedir. Çalışma sıcaklığı ise -40°C ile 177°C arasındadır.

5.4 Deneyin Yapılışı

Tek yöne ve çift yönde haddelenmiş levhalardan çıkartılan farklı açılardaki numunelerimiz test cihazına yerleştirilir. İlk ölçü boyu kavisin bittiği yer olarak alınırsa çeneler arası mesafe yaklaşık 140 mm olarak ayarlanmıştır. Çenelerin numuneyi sıkıştırma basıncı 5 mp olarak ayarlanır. Numunede herhangi bir burulma etkisi olmaması için çenelerin eksenleir özenle ayarlanmıştır. Çekme hızı olarak belirlenen 10^{-4} 1/s değeri ise şu şekilde cihaza uygulanmıştır.

Deney cihazı saniyede 10 mm uzadığı düşünülecek olursa gerinim değeri çeneler arasındaki mesafe olan 140 mm ile

$$\varepsilon = \frac{150 - 140}{140} = 0,0714 \quad (5.1)$$

bulunur. Çekme hızının yukarıdaki çalışmalardan anisotropi ye etkisinin olmadığı öğrenilmişti. Biz referans değer olarak 10^{-4} 1/s olarak alacağız. Bu durumda deney cihazı için kullanılan hız değeri;

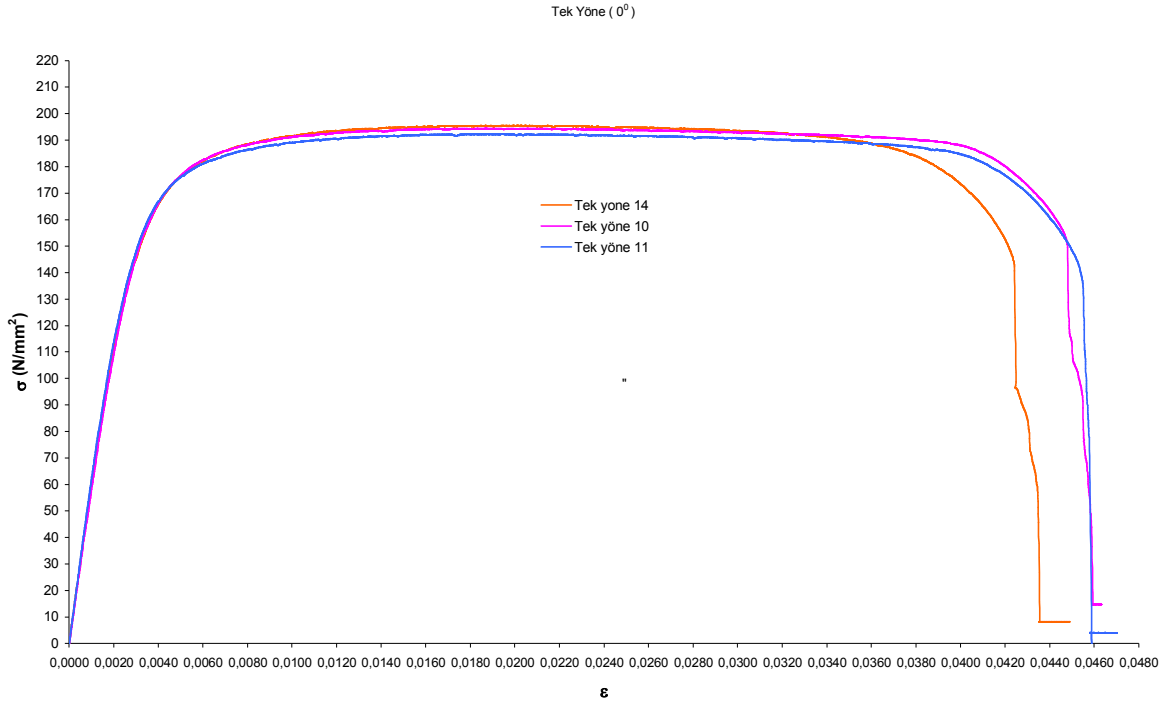
$$\frac{0,00714}{10^{-4}} \cong 700 \text{ s} \quad (5.2)$$

olarak bulunur.

Deney oda sıcaklığında yani 10°C ile 35°C arasında bir değerde yaklaşık 23°C \pm 5° C' de yapılmıştır.

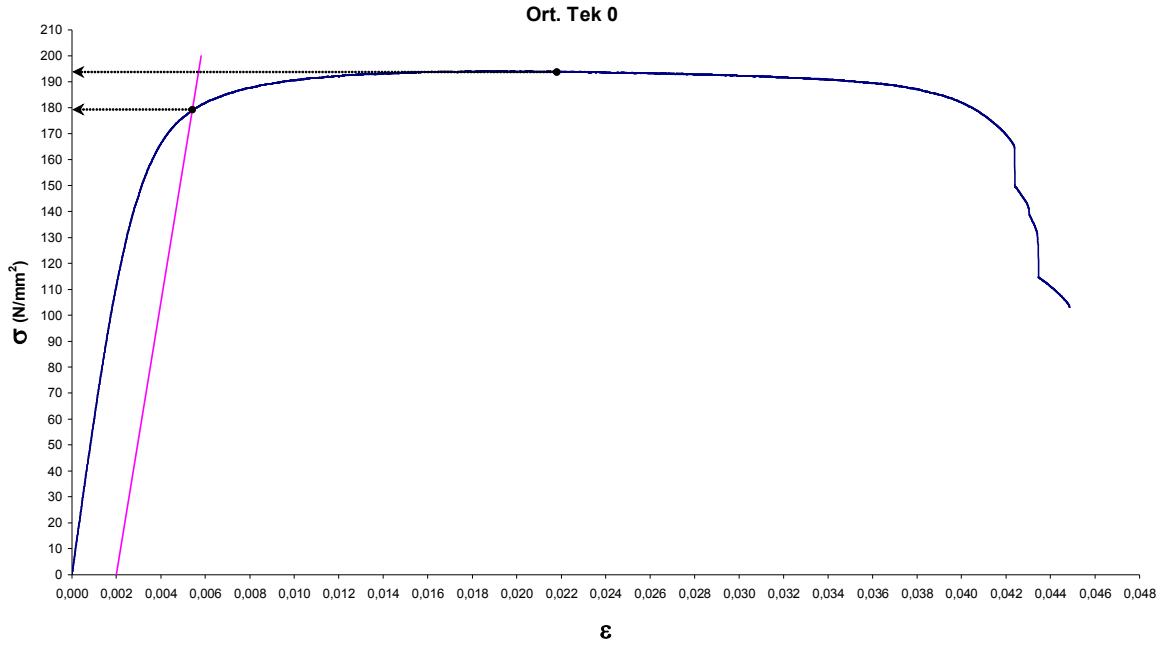
5.5 Deney Sonuçları

Deney yukarıda belirtilen şartlarda her levha için ve her levhada öngörülen açılarda ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 5.2 ve 5.3 de gösterilen isimlendirmeye sadık kalmak koşulu ile numunelerden bir kısmı için düzgün dotalar toplanabilmiştir. Grafik sonuçlarında T ile ifade edilen tek yönlü levhayı, \mathcal{C} ile ifade edilen ise çift yönlü levhaları temsil etmektedir. Ayrıca açı değerleri de 0° , 45° ve 90° olarak ayrılmıştır. Test cihazı yapılan deneye ait bi takım dotaları bize vermektedir. Bu dotalar içerisinde uzama miktarı ve uygulanan kuvvet önemlidir. Alınan bu değerler *Excel*'de işlenmiştir. Başlangıç boyu olarak cenelerin tutma mesafesi olan 140 mm alınmıştır. Her bir açıda 3-4 deney yapıp ortalamaları alınarak mühendislik σ - ϵ eğrileri çizilmiştir. Şekil 5.4 de yapılan deneylerin uyumunu göstermek için 3 deneyin sonucu verilmiştir.

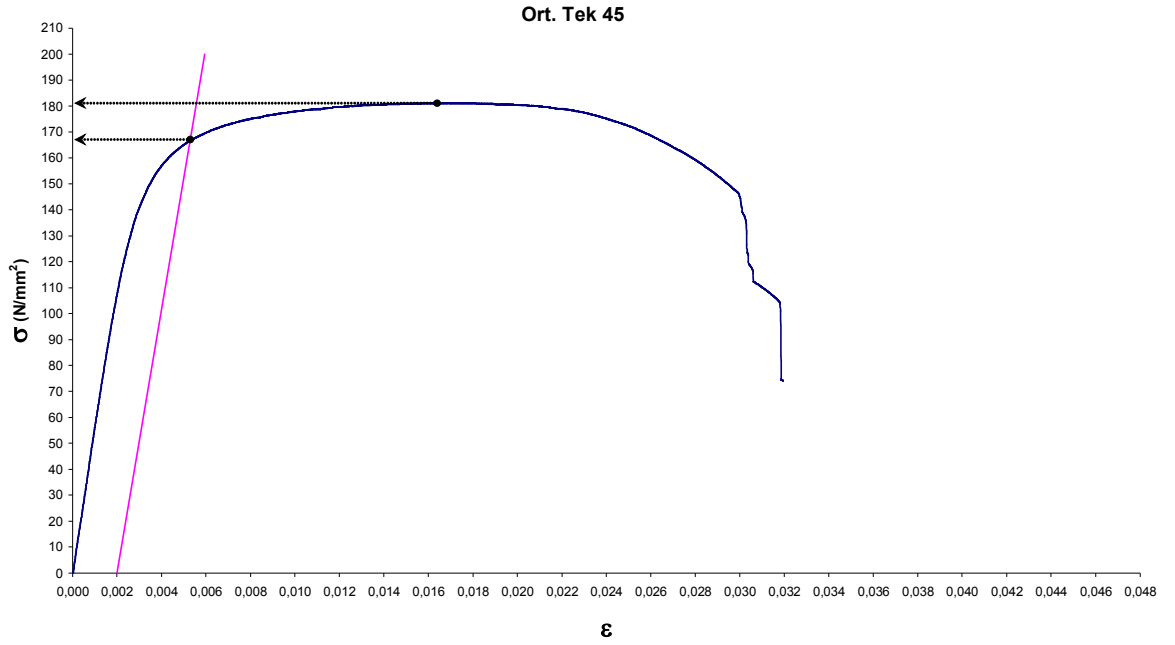


Şekil 5.4 Tek ekseninde haddelenmiş numunelere ait mühendislik gerilme gerinim grafikleri

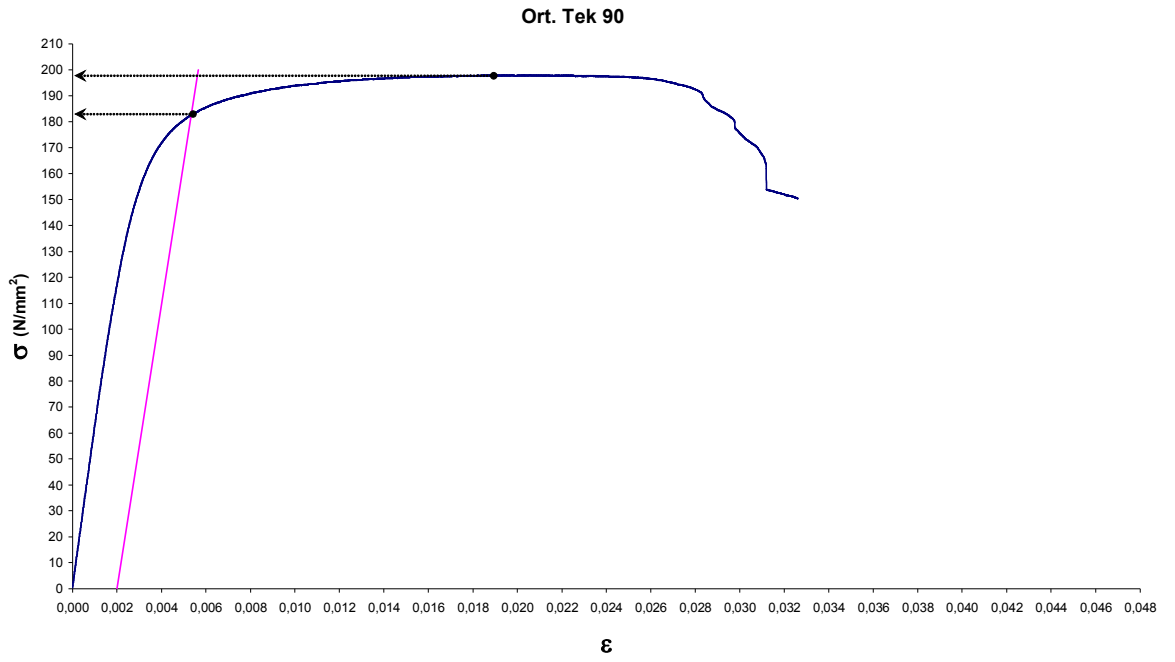
Şekil 5.5-5.10' da tek yönlü ve çift yönlü haddelenmiş levhalardan elde edilmiş numuneler kullanılarak yapılan çekme deneyi sonuçları ile akma ve kopma dayanımlarının belirlenmesi gösterilmiştir. Çizelge 5.2'de de elde edilen E , σ_{ak} ve σ_k değerleri verilmiştir.



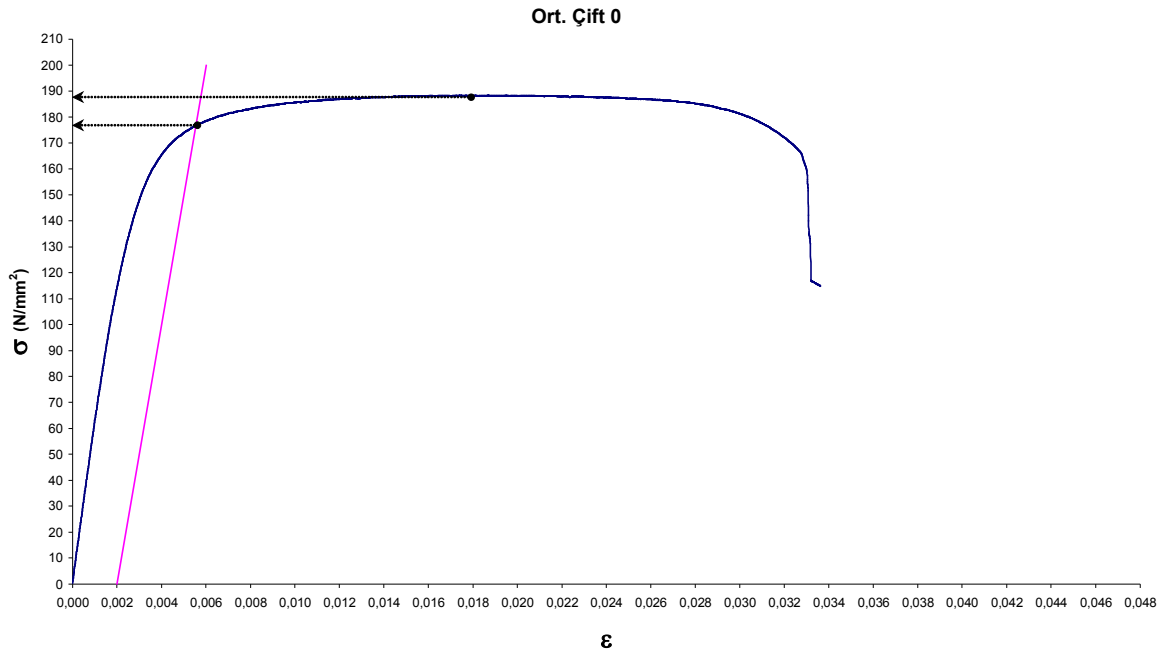
Şekil 5.5 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği. Tek yönlü haddeleme (0°)



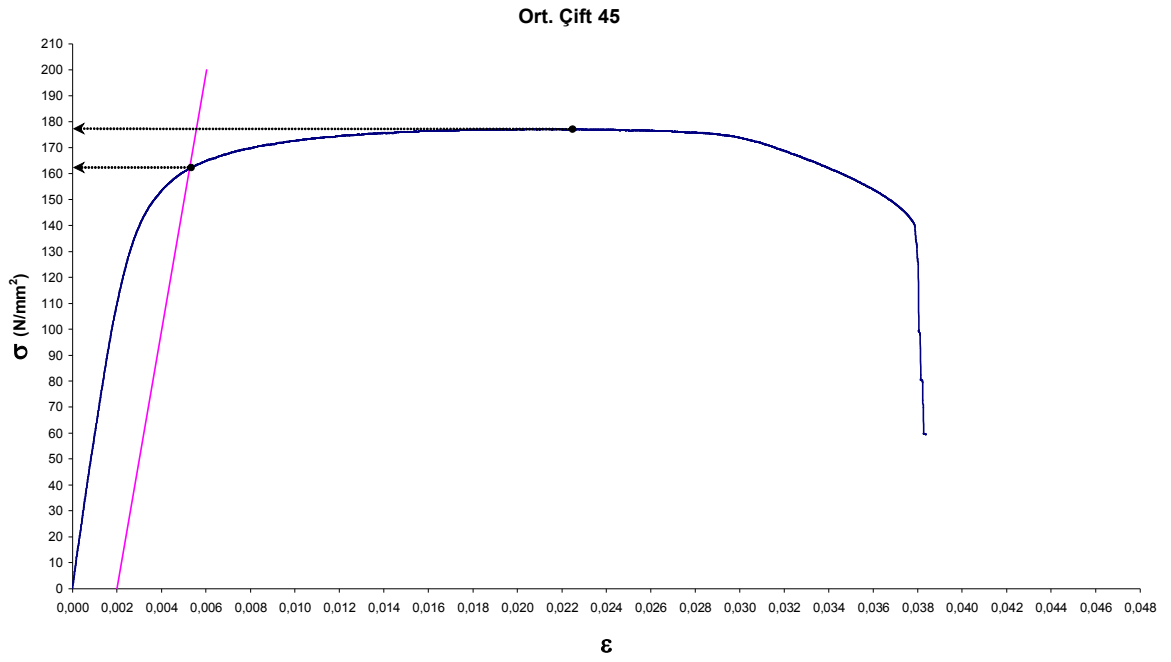
Şekil 5.6 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği. Tek yönlü haddeleme (45°)



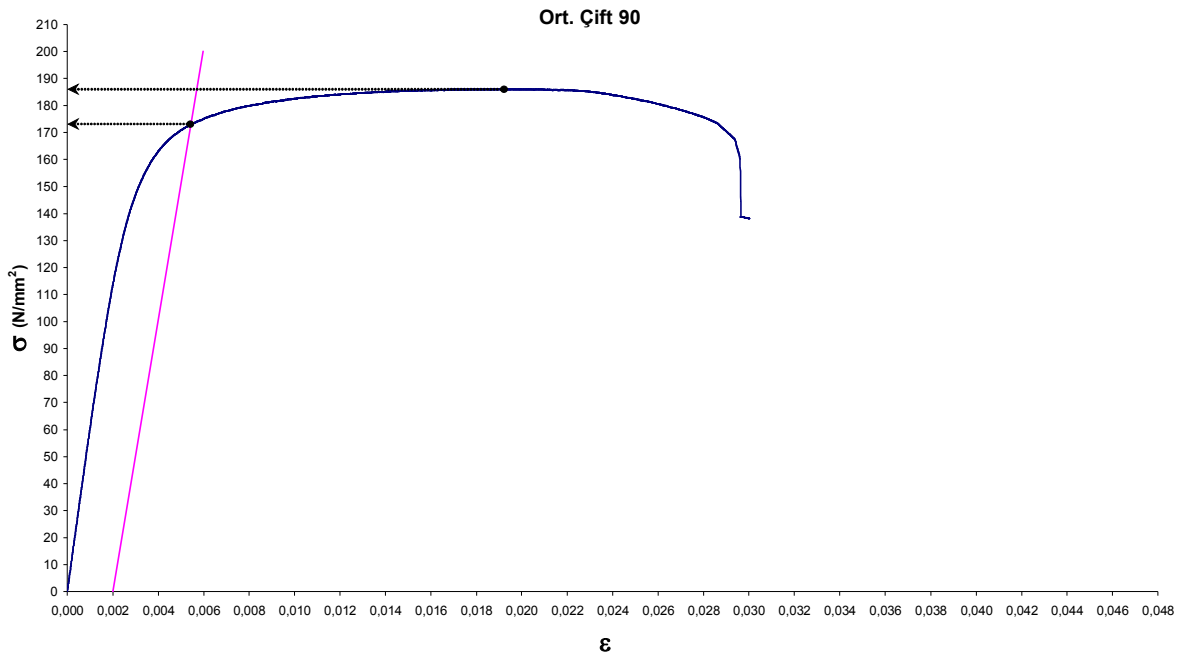
Şekil 5.7 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği. Tek yönlü haddeleme (90°)



Şekil 5.8 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği. Çift yönlü haddeleme (0°)



Şekil 5.9 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği. Çift yönlü haddeleme (45°)

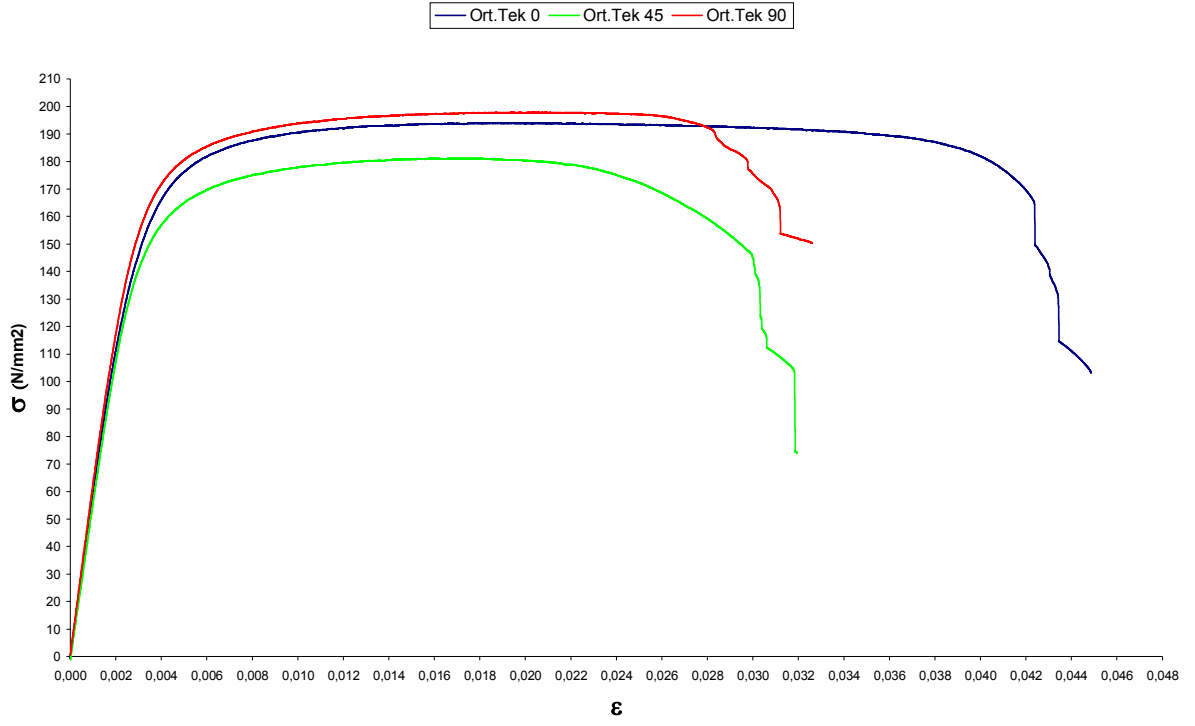


Şekil 5.10 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği. Çift yönlü haddelemede (90°)

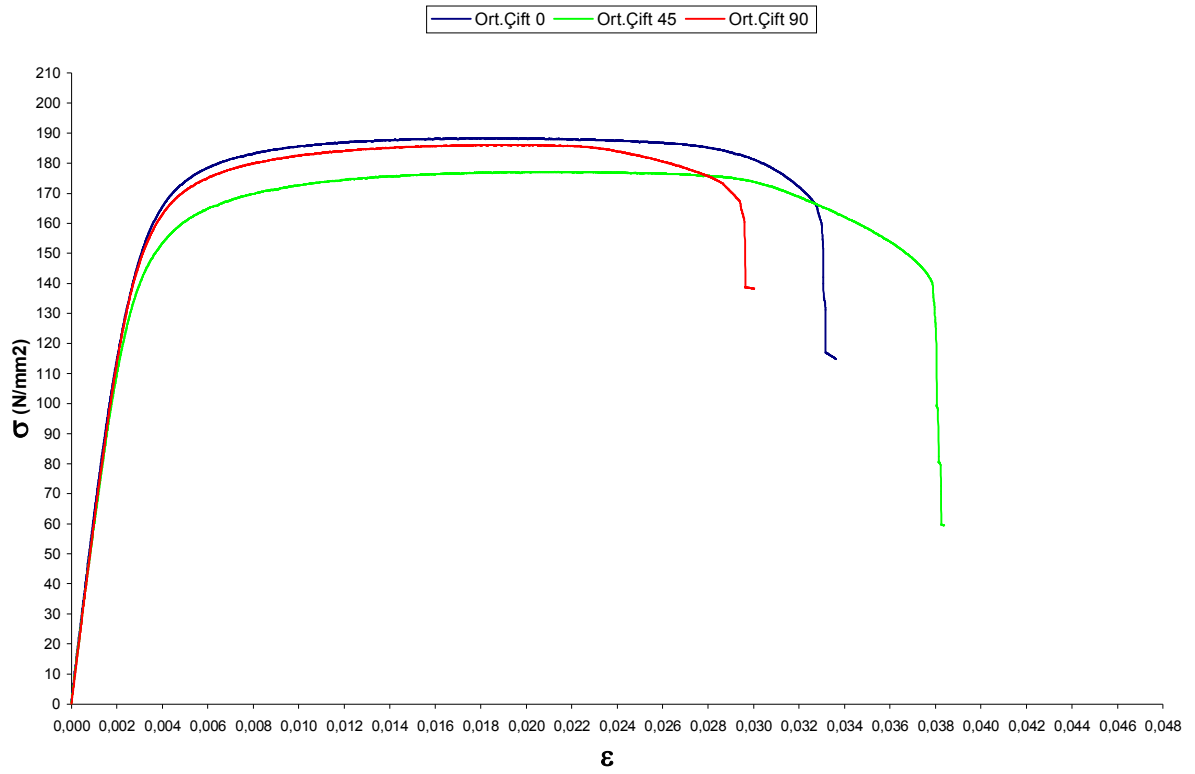
Çizelge 5.2 Deney Sonuçları

İmalat Yöntemi	E Elastisite Modülü (MPa)	σ_{ak} Akma Gerilmesi (MPa)	σ_{max} Max Gerilme (MPa)
T0°	52332	179,5	194
T45°	50828	167	181
T90°	54652	183	198
Ç0°	49805	177	188
Ç45°	49598	162	177,5
Ç90°	50430	173	186

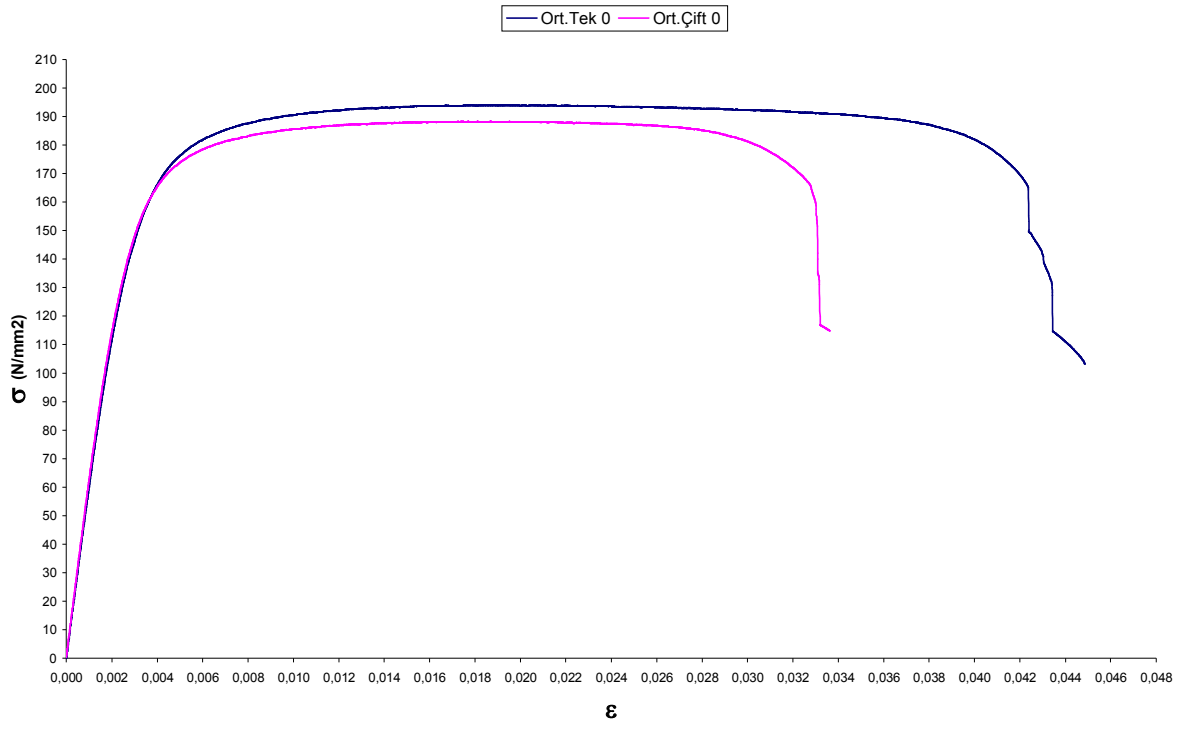
Şekil 5.11'den de görüldüğü üzere çekme deneyine tabii tuttuğumuz tek tarafa haddelenmiş ve 0°,45°ve 90°' lik açılarla aldığımız numunelerimize ait akma değerleri arasında $\sigma_{ak90} > \sigma_{ak0} > \sigma_{ak45}$ sıralaması yapılabilir. Aynı zamanda max gerilmeler için de aynı sıralama geçerlidir (çizelge 5.2). Akma ve max gerilmeler açısından bu ufak fark şekil 5.11'de gözükmele beraber yine aynı grafikte bir başka fark daha gözümüze çarpmaktadır. Sonuçlar şekil değişimler açısından değerlendirilecek olursa 0° ile alınmış numunenin diğer iki grup numuneye göre daha fazla uzamış olduğudur. Bu sonuç şu şekilde açıklanabilir. Çekme cihazı tüm numuneler için aynı kuvveti uygulamakla beraber numunelerimiz yapısal farklılıklarından dolayı farklı cevaplar vermektedir. Mikro düzeyde 0° yönelmiş tanecikler uygulanan kuvvet karşısında birbirleri üzerinde kayarak daha fazla uzamadan sonra kopmakta bu sayede daha gec boyun vermektedir. Yani plastik şekil değişimi daha fazladır. Nitekim gerek şekil 5.11'de gerek şekil 5.13'de bu fark gözükmektedir. Elde edilen sonuçlar gerilmeler açısından G.Winther ve N.Hansen in farklı strainlerdeki çekme deneyi sonuçları ile de uyum sağlamaktadır. Hatılanacak olunursa şekil 3.6 da da yine σ_{ak90} değeri σ_{ak0} değerinden büyük çıkmaktadır. Çift yöne haddelenmiş numunelere bakacak olursak benzer akama gerilmeleri farklarının burada da oluştuğu fakat bariz bir farkın olmadığıdır. Bu da çift yöne haddelenmiş numunedeki anizotropiyi ifade eder niteliktedir.



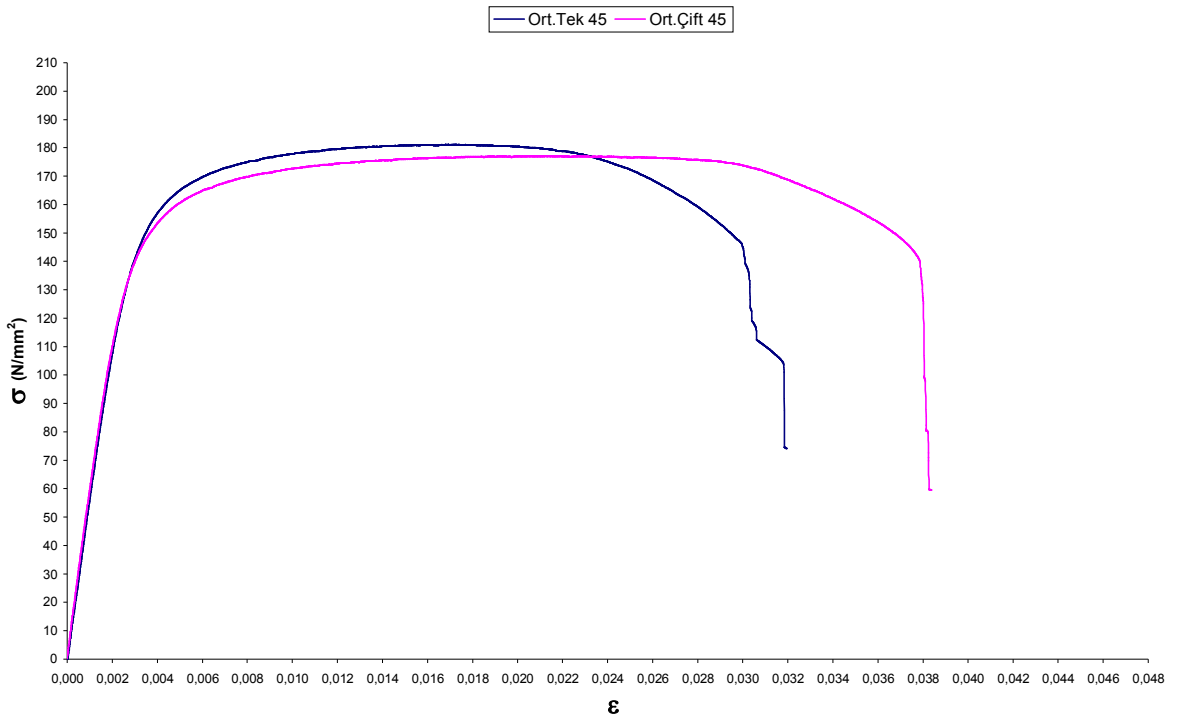
Şekil 5.11 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği. Tek eksen de haddeleme (Ort.)



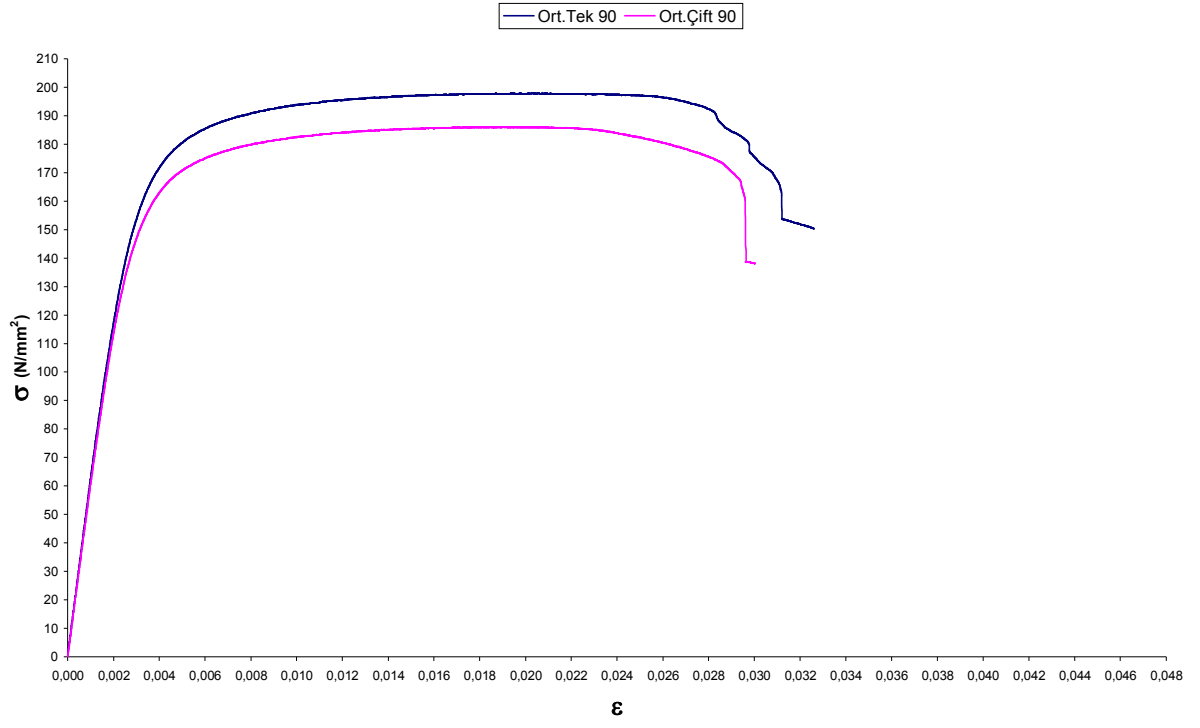
Şekil 5.12 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği. Çift eksen de haddeleme (Ort.)



Şekil 5.13 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği, tek - çift eksenli kıyaslaması (0°)



Şekil 5.14 Mühendisliki gerilme-gerinim grafiği, tek - çift eksenli kıyaslaması (45°)



Şekil 5.15 Gerilme-Gerinim grafiği, tek - çift eksenli kıyaslaması (90°)

6. MODELLEME ÇALIŞMALARI

Bölüm 2’de kısaca bahsedilen gerçek gerilme ve şekil değişimi grafiği ise sadece tek yönlü ve haddeleme yönüne paralel numune için *Şekil 6,2* da çizilmiştir.

Modelleme kısmında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çekme deneyi simüle edilmiştir. Bu amaçla sadece elastik davranış değil aynı zamanda plastik davranışta modellenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerin gerçekleştirilebilmesi için uygun malzeme modellerinin tanımlanması gerekir. Elastik davranış için metalik malzemelerde Hook kanunu geçerlidir. Ancak plastik bölgeyi tanımladığımızda malzeme dayanımına bağlı olarak çok sayıda farklı malzeme modelleri kullanılabilir. Uygun modelin seçilebilmesi için deneysel verilere ihtiyaç vardır. İşte bu amaçla bu tez çalışmasının modeller kısmında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları kullanılarak uygun malzeme modelinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla gerçek gerilme-gerinim eğrileri çizilmiş, plastik bölge için malzeme parametreleri (H; dayanım katsayısı, n; gerinim pekleşme üssü) belirlenmiştir.

Bu parametreler direk olarak sonlu elemanlar yöntemlerinin kullanıldığı yazılımlarda kullanılabilir gibi parametre belirtmeksizin direk deney sonuçlarını girerek de plastik bölge tanımlanabilir.

H ve n parametrelerinin belirlenebilmesi için *Şekil 6.2’* de gösterildiği gibi eşitlik 6.1 ve 6.2 kullanılarak deneysel gerçek gerilme-gerinim grafikleri çizilmiştir.

$$\epsilon_{ger} = \ln (\epsilon + 1) \quad (6.1)$$

$$\sigma_{ger} = \sigma (\epsilon + 1) \quad (6.2)$$

Denklem 6.3’e (Hook kanunu) göre elastik bölge grafiği çizilir.

$$\sigma = \epsilon \cdot E \quad (6.3)$$

Plastik bölge için gerçek datalardan bir grup alınır ve bu grup datanın ortalama doğru grafiği çıkartılır. Elde edilen bu ortalama eğri eşitlik 6.4’teki gibidir.

$$y = 0,0662X + 5,5651 \text{ (Şekil 6,1)} \quad (6.4)$$

$$\ln (\sigma) = \ln (H) + n \ln (\epsilon) \quad (6.5)$$

ise

Burada

$$n = 0,0662 \quad (6.6)$$

$$\ln(H) = 5,5651 \quad (6.7)$$

$$H = 261,1513 \quad (6.8)$$

olarak bulunur.

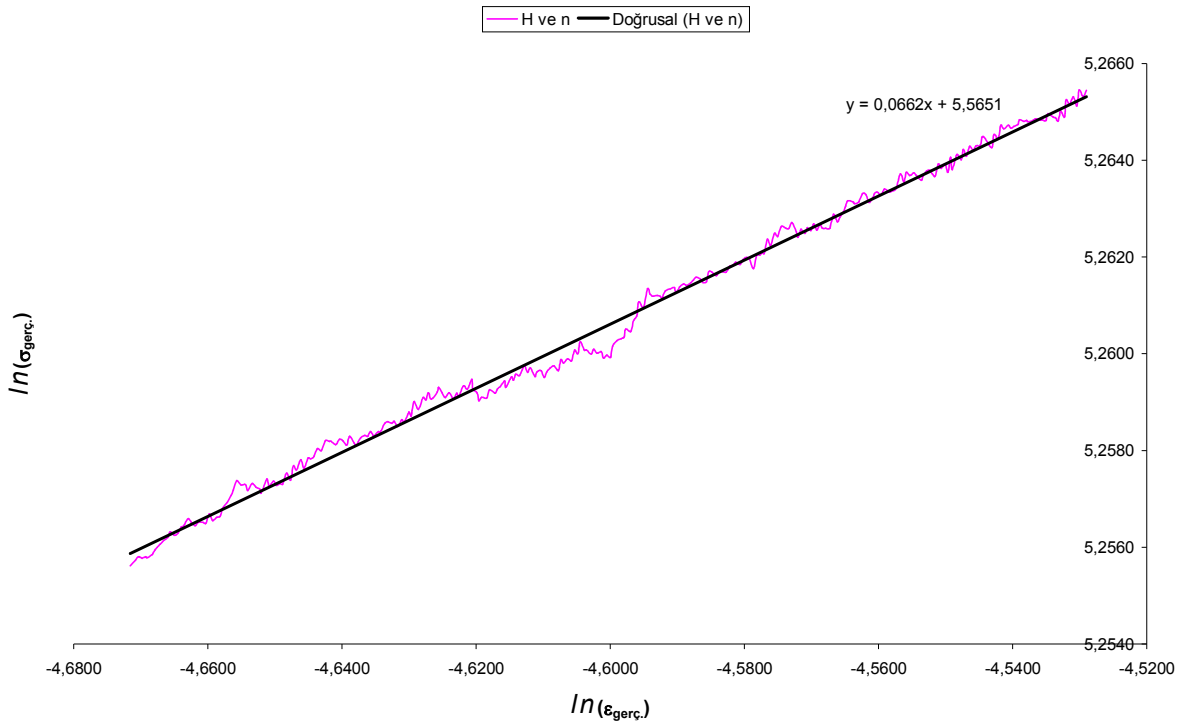
Modelde

$$\sigma = H \cdot \epsilon^n \quad (6.9)$$

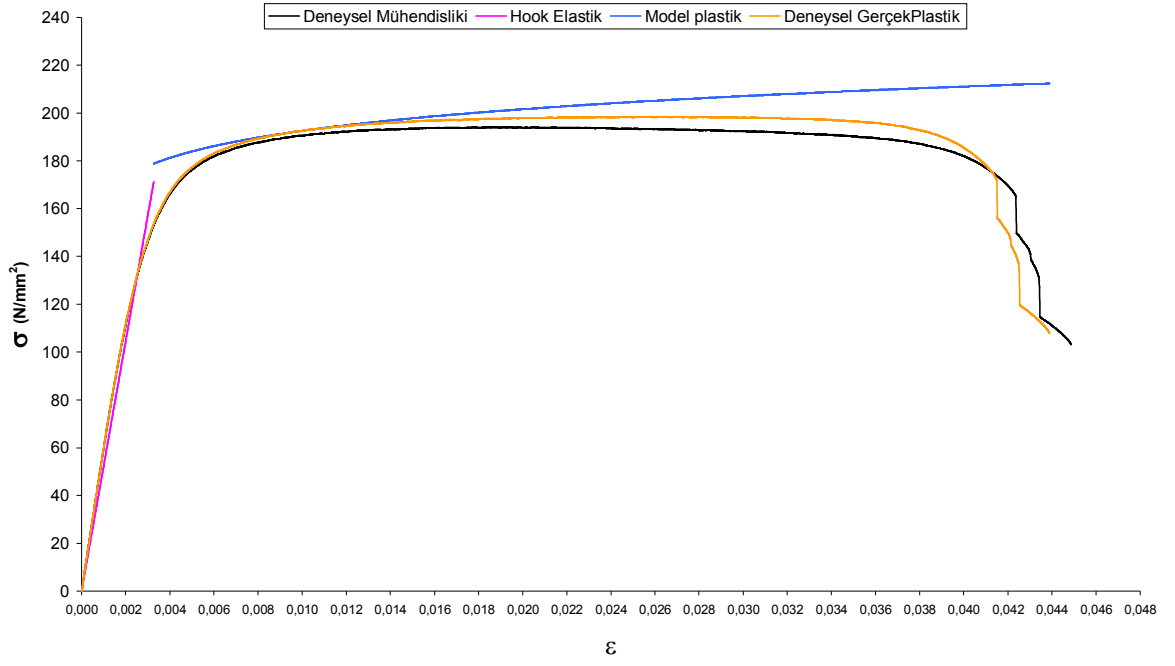
ise,

$$\sigma_{ger} = 261,1531 \epsilon^{0,0662} \quad (6.10)$$

eşitliğine göre plastik bölgede model plastik gerilme-gerinim grafiği çizilir (Şekil 6,2).



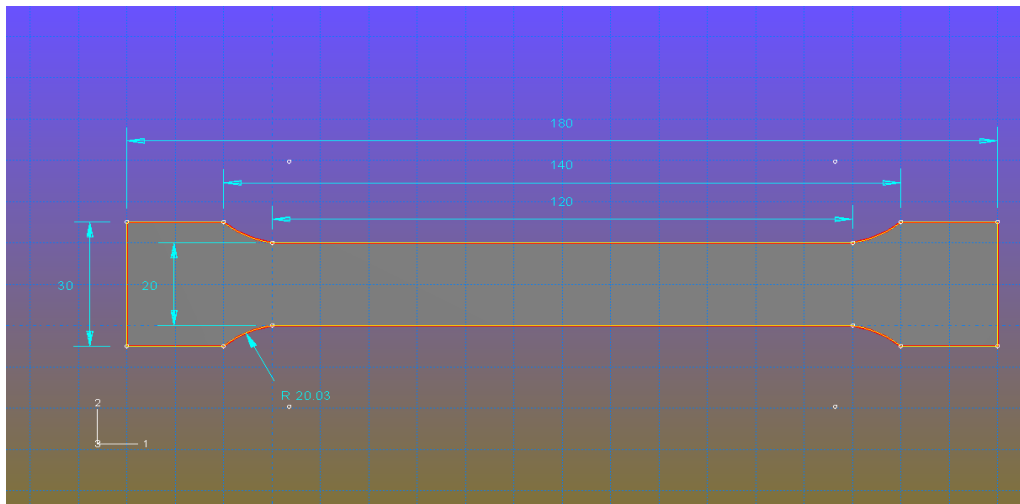
Şekil 6.1 H ve n sabitleri için ortalama fonksiyon



Şekil 6.2 Model, deneysel gerçek ve mühendisliki sonuçların mukayesesi

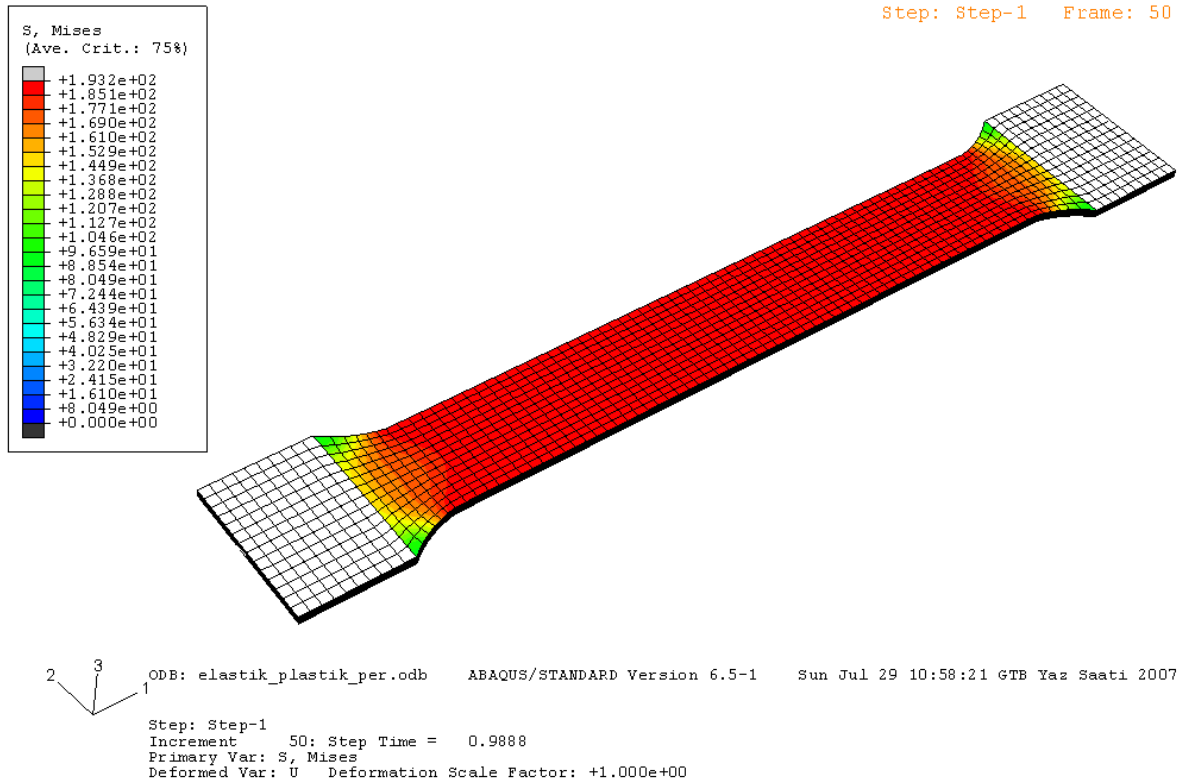
Yukarda anlatılan deneyler ve model tek yöne haddelenmiş numune için ilgili datalarla bir de sonlu elemanlar analiz programı olan *ABAQUS/CEA versiyon 6.5-1* 'de çözülmüş elastik ve plastik bölge grafikleri elde edilmiştir.

Öncelikle deney numunesinin CAD datası standartlara ve numunelerimize uyacak şekilde programın part modülünde oluşturulur. Bu data 1,5 mm ofsetlenerek 3 boyutlu model elde edilir (Şekil 6.3).



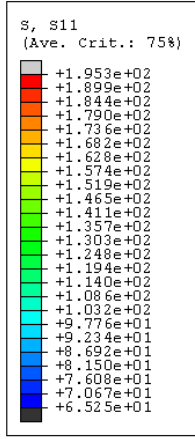
Şekil 6.3 Numune katı modeli

Malzeme modeli izotropik elastik ve izotropik plastik olarak tanımlanır. Bu amaçla elastik bölge için çekme deneylerinden elde edilen elastiklik modülü ve akma dayanımı gibi datalar girilir (Çizelge 5.2 ve 1.1). Plastik bölge için ise plastik bölgede alınan yaklaşık 100 gerilme ve şekil değişimi değeri programa girilir. Gerilmeler N/mm^2 , şekil değişimleri ise başlangıç noktası plastik bölge olduğu için 0 olacak şekilde tüm datalardan akma gerilmesine karşılık gelen şekil değişimi değeri çıkartılarak girilir. Kuvvet aynı deneydeki gibi çenelerin başladığı noktadan uygulanır. Parçanın bir tarafı sabit tutulurken diğer tarafında merkez noktasında tüm yüzeyi temsil eden bir yükleme yapılır. Bu değer 5790 N olarak gerilime değerinin max değeri düşünülerek atanır. Bu değer (2.26) σ_{max} 'ın (Çizelge 5.2) kesit alanı ile çarpılması ile bulunur.

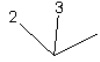
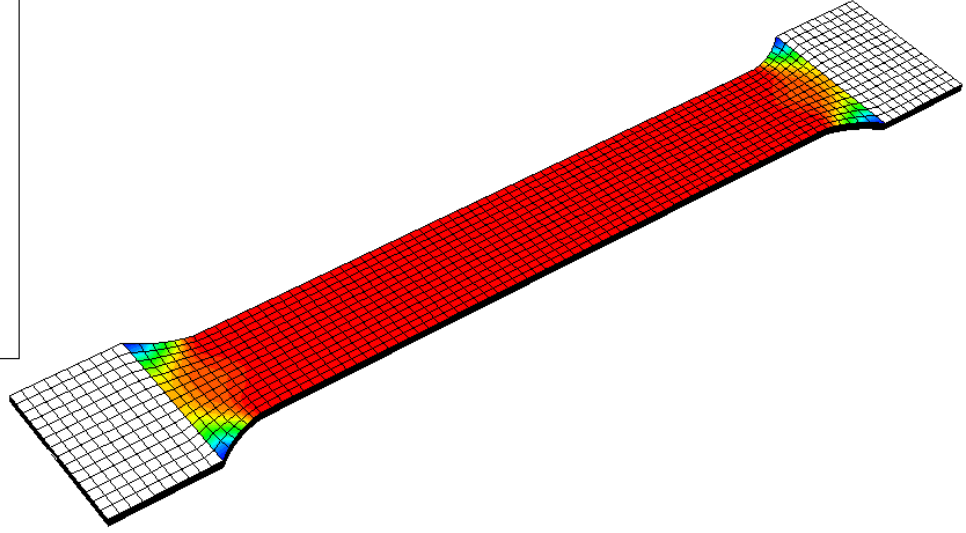


Şekil 6.4 Von-Misses gerilmesi

Deney sonucundan da görüleceği gibi simüle ettiğimiz çekme deneyinde çenelerin tuttuğunu varsaydığımız bölgelerde herhangi bir şekil değişimi yada gerilme söz konusu değildir (Şekil 6.4). Von-Misses değerlerine bakacak olursak normal olarak kesit alanının azaldığı boğaz noktalarında daha fazla gerilme oluşacaktır (Şekil 6.4). Max gerilme değeri de verdiğimiz yükleme gereği $193 N/mm^2$ yani 5790 N'dur. Şekil 6.5, 6.6 ve 6.7 de da yine gerime ve gerinim ile ilgili grafikler verilmiştir.



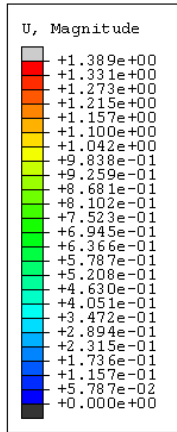
Step: Step-1 Frame: 50



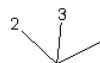
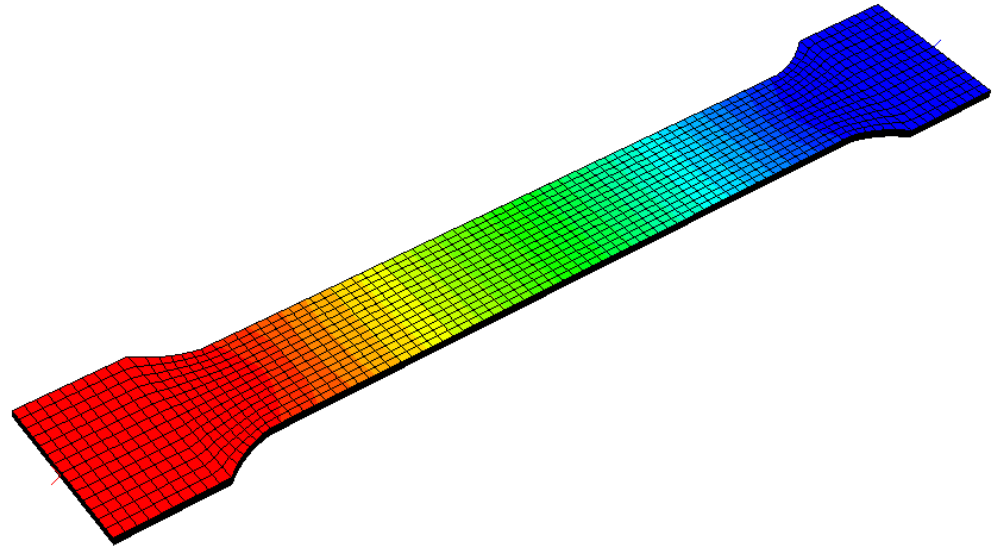
ODB: elastik_plastik_per.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Sun Jul 29 10:58:21 GTB Yaz Saati 2007

Step: Step-1
Increment 50: Step Time = 0.9888
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Şekil 6.5 Çekme yönündeki gerilme



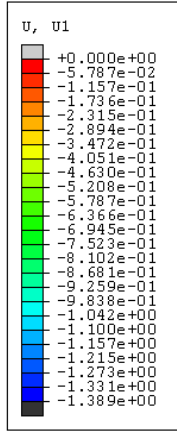
Step: Step-1 Frame: 50



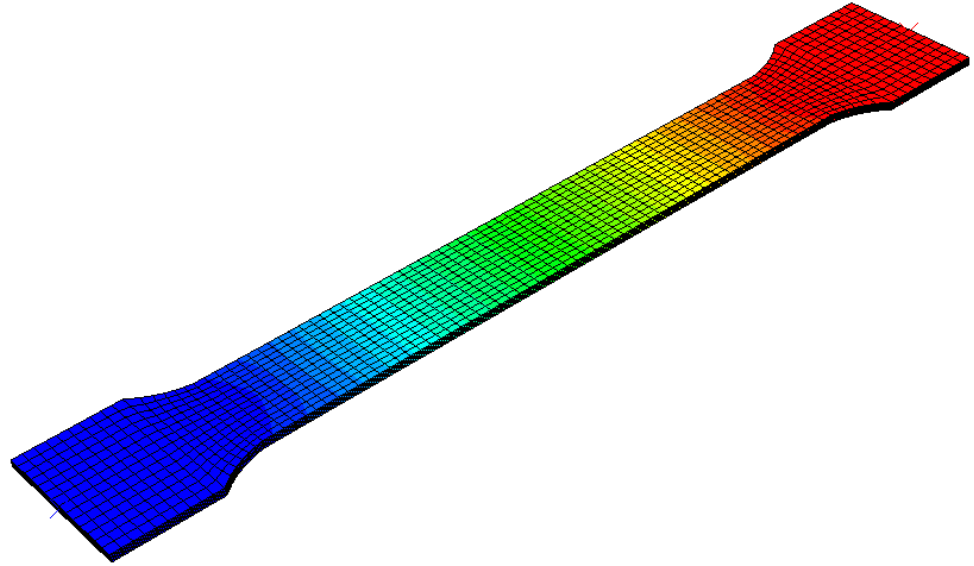
ODB: elastik_plastik_per.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Sun Jul 29 10:58:21 GTB Yaz Saati 2007

Step: Step-1
Increment 50: Step Time = 0.9888
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Şekil 6.6 Von-Misses gerilimi



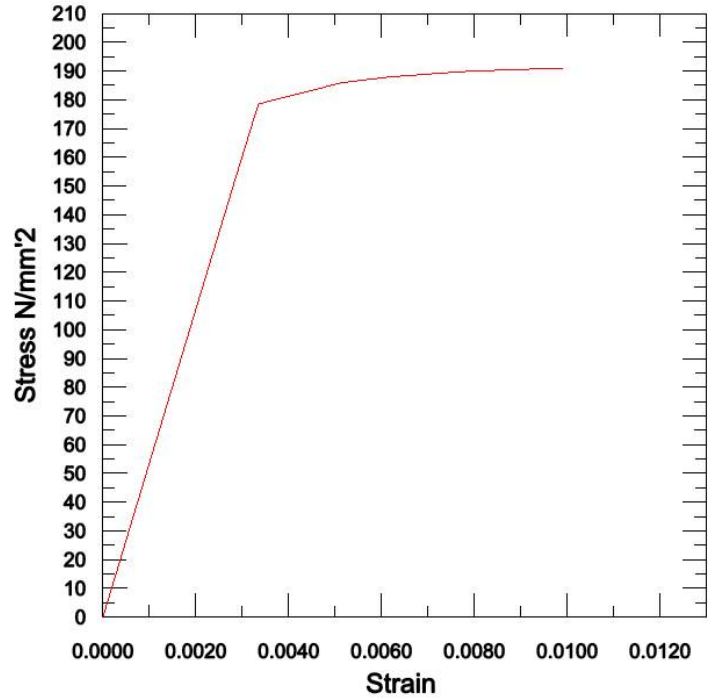
Step: Step-1 Frame: 50



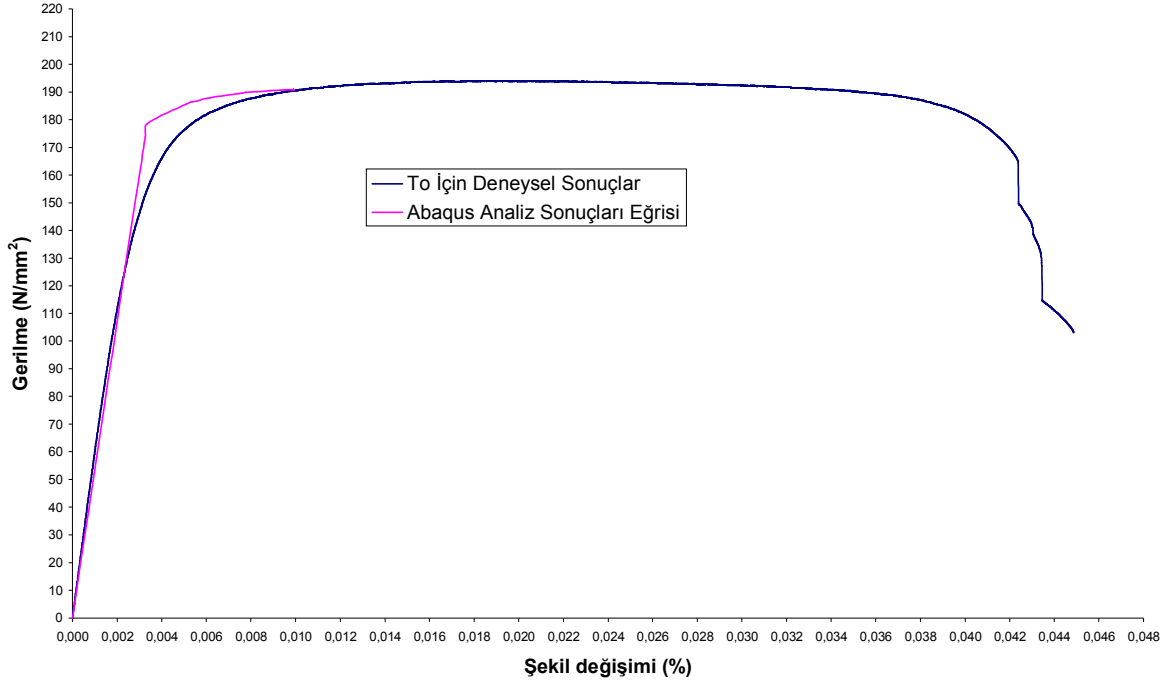
3
2 1 ODB: elastik_plastik_per.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Sun Jul 29 10:58:21 GTB Yaz Saati 2007
Step: Step-1
Increment 50: Step Time = 0.9888
Primary Var: U, U1
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Şekil 6.7 Çekme yönündeki gerinim

— Stress-Strain Curve



Şekil 6.8 Elastik ve plastik bölgede analiz sonucu gerilme ve şekil değişimi grafiği



Şekil 6.9 Deneysel datalarla sonlu elemanlar çözümü karşılaştırılması

Şekil 6.6’da tüm parça üzerindeki şekil değişimleri gösterilmiştir. Bu bağlamda mavi ile gösterilen kısımlarda her hangi bir boyut değişiminin olmaması gayet normaldir keza uygulanan kuvvet esas şekil değişiminin olacağı kırmızı ile ifade edilen diğer uçta olduğu gibidir. Şekil 6.7’de ise sadece çekme yönündeki şekil değişimi ifade edilmiştir.

Şekil 6.8’de simülasyon sonucu elde edilen programın ürettiği gerilme-gerinim eğrisi verilmiştir. Ayrıca şekil 6.9’da ise simülasyonlarda kullanılan σ - ϵ eğrisi ile deneysel datalar karşılaştırılmıştır.

SONUÇLAR

Endüstride, tek doğrultuda yapılan haddeleme işlemleri sonucunda elde edilen levhalarda plastik şekil verme esnasında gözlemlenen problemlerin (derin çekmede meydana gelen yırtılmalar gibi) giderilmesi amacıyla haddeleme işlemleri çift yönlü olarak yapılmaya başlanmıştır. Haddeleme işlemindeki bu farklılık malzeme yapısında değişimlere neden olmaktadır. Bu çalışmada iki farklı yöntemle (tek yönde ve çift yönde haddeleme) elde edilen levhaların mekanik özelliklerinin araştırılması yapılmıştır. Bu amaçla tek yönde ve çift yönde haddelenmiş levhalardan hadde yönünde ve bu yönle farklı açılar (0° ve 90° gibi) yapan numuneler kullanılarak çekme deneyleri yapılarak, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar:

- Tek yönde haddelenmiş levhanın haddeleme yönünde ve haddeye dik doğrultudaki mekanik özellikleri hemen hemen aynıdır, ancak hadde yönü ile 45° açı yapan doğrultuda elastiklik modülünde bir değişim meydana gelmemekle birlikte akma ve kopma dayanımı düşmüştür.
- Çift yönlü haddelemede ise üç açıda da mekanik özelliklerde herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Buda bu yöntemle üretilen levhalardaki yapının tek yönde haddelemeye göre daha izotropik olduğunu göstermiştir.
- Bunun yanında tek yönlü ve çift yönlü haddelenmiş levhaların plastik şekillendirme kabiliyetlerinin farklılığının ortaya konulması için ERICHSEN testi yapılması gerektiği belirlenmiştir.
- Deneysel çalışmaya ek olarak çekme deneyi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simule edilmiştir. Bu çalışmada çekme deneyi sonuçları kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır. Sadece elastik davranış değil, plastik davranış da modellenmiştir.
- Literatür çalışmaları göstermiştir ki, ortam sıcaklığı, haddeleme hızı, incelleme oranı gibi değerler anizotropiye büyük ölçüde etki eden faktörlerdir. Bahsedilen parametrelerin anizotropiye etkisinin araştırılması başka yüksek lisans çalışmalarına konu olabilir.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 01.08.1980

Doğum yeri İstanbul

Lise 1994-1997 Ataköy Lisesi

Lisans 1997-2001 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2004-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı

Çalıştığı kurumlar

2001-2003 Beko Elektrik A.Ş.

2005-Devam ediyor Çuhadaroğlu Metal Sanayi A.Ş.

KAYNAKLAR

Abedrabbo, N., Pourboghart, F., Carsley, J., (2007), "Forming of AA5182-0 and AA5754-0 at Elevated Temperatures Using Coupled Thermo-Mechanical Finite Element Models" Science Direct, International Journal of Plasticity, 23;841-875

Anand, L., (2002), "Introduction to the Macroscopic Theory of Plasticity", Mechanics & Materials 2

Anand, L., (2002), "Stress and Strain, Continued", Mechanics & Materials 2

Askeland D.R., (1992), The Science and Engineering of Materials, Chapman & Hall, London

Ashby, M.F. ve H Jones, D.R., (1994) Engineering Materials 2, BPC Wheatons Ltd Exeter, Great Britain

ASM Handbook Vol. 9, Metallography and Microstructure, (1985) ASM International, Materials Park, OH 44073

Budinski, K.G., (1996), Engineering Materials Properties and Selection, R.R. Donnelley & Sons Company, United States of America

Choi, Y., Walter, M.E., Lee J.K., Han C.S., (2006), "Observations of Anisotropy Evolution and Identification of Plastic Spin Parameters By Uniaxial Tensile Tests" Journal of Mechanics of Materials and Structures, 1-2:309-325

Chino, Y., Sassa, K., Kamiya, A., Mabuchi, M., (2006), "Enhanced Formability at Elevated Temperature of a Cross-Rolled Magnesium alloy Sheet" Materials Science and Engineering, A 441;349-356

Çapan, L., (2003), Metallerde Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, Beyoğlu-İstanbul

Dieter, G.E., (2001), Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company, London

Ferdinand, P., Beer, E., Johnston, R., DeWolf, T.J., (2002), Lecture Notes, "Transformations of Stress and Strain", Mechanics of Materials Ch7, The McGraw-Hill Companies, Inc.

Hashemi, J., Bennett, R., (2003), "Materials Characterization: Tensile Test", Materials and Mechanics Laboratory ME 3328

Kreji, V.J., (2001), "Determination of Mechanical & Forming Properties of Magnesium of Z31B Sheets via Tensile Tests", Precision Metal Forming Group, Singapore Institute of Manufacturing Technology,

Glicksman, M.E., Lupulescu, A., "Diffusion in Solids", Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 12180, USA

Onaran, K., (1997), Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul

Rollett, A.D. (2001), "Advanced Characterization and Microstructural Analysis", Department

of Materials Science and Engineering.

Simões, F.J.P, Alves de Sousa, R.J., Grácio, J.J.A., Barlat, F., Yoon,J,W., Department of Mechanical Engineering, Center for Mechanical Technology and Automation, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal, Alcoa, Inc., Alcoa Technical Center, 100 Technical Drive, Alcoa Center, PA 15069-0001, USA,

Yurci, M., (1997), Talaşsız Şekil Verme, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.

Winther,G., Li,Z.J., Hansen,N. (2004), “Anisotropy of Plastic deformation in rolled Aluminium”, Materials Science and Engineering, A 387-389;199-202

<http://www.cse.iitd.ernet.in/~%20cs1050176/Metal%20Forming%20Processes.ppt#292,6>,Change in grains structure in rolling

www.matpr.kth.se/education/Files/Extentor%204M1347,%20eng/4M1347-exam041209.doc

<http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfam1a.html>

http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/stress.cfm

<http://www.etialuminyum.com.tr/>

http://www.acametal.com.tr/aluminyum_islem_2.htm

<http://www.ensametal.com/aluminyum.asp>

http://www.ustunkardeslermetal.com/kul_biy_al_kul.htm

<http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfam1a.html>

<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=30&pageid=1006172110>

<http://www.byturk.us/malzemeyi-bicimlendirme-t57990.html?p=347764>

<http://www.estal.org/frame.htm>